

ISSN 0187-5779

# TERRA

OCTUBRE - DICIEMBRE DE 2003 • VOLUMEN 21 • NUMERO 4



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 2003-2005

Presidente	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Vicepresidente	Dr. José A. Cueto Wong
Secretario General	Ing. Andrés Espinosa Carmona
Tesorero	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Secretario Técnico	Dr. Enrique Salazar Sosa
Secretaria Relaciones Internacionales	Dr. Rogelio Juárez González
Vocales	Dr. Ernesto Frías Ramírez
	Dra. Christina Siebe Grabach
	M.C. Yolanda L. Fernández Pavia
	Dr. Juan Pedro Flores Marges
	Dra. Claudia Hidalgo Moreno
	Dr. David Cristóbal Acevedo
	M.C. Laura B. Reyes Sánchez

## 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.  
Octubre - Diciembre de 2003 Volumen 21 Número 4

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 y Fax: +01(595) 95 2 17 21  
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

### EDITOR

Dr. Antonio Vázquez Alarcón

### EDITOR ADJUNTO

Dr. Javier Z. Castellanos Ramos

### EDITORES TECNICOS

Dr. Manuel Sandoval Villa  
Ura. Edna Alvarez Sánchez  
Dr. Mateo Vargas Hernández  
Dr. David Espinosa Victoria  
Dra. Carmen Gutiérrez Castorena  
Dra. Ma. del Carmen González Chávez  
Dr. David Cristóbal Acevedo  
M.C. Jorge Alvarado López  
M.C. Langen Corlay Chee  
Ina Aalmers de Aguilar  
Diane Fumiko Miyoshi Udo

### EDITORES DE ESTILO

### EDITORIA 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  
Dr. Gabriel Alcántar González  
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. Antonio Turrent Fernández  
Dr. Jorge D. Etchevers Barra  
Dr. Juan José Peña Cabriales

### EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria
Dr. Elemer 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 Grez 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. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. José Rodríguez	Chile
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Rafael Villegas	Cuba
Dr. Ramón A. Rosell	Argentina

# TERRA

## MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

### BOARD

President  
Vicepresident  
Secretary  
Treasurer  
Technical Adviser  
International Relations  
Voters

Dr. Ma. Edna Alvarez Sánchez  
Dr. José A. Cueto Wong  
Ing. Andrés Espinosa Carmona  
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos  
Dr. Enrique Salazar Sosa  
Dr. Rogelio Juárez González  
Dr. Ernesto Frías Ramírez  
Dra. Christina Siebe Grabach  
M.C. Yolanda L. Fernández Pavia  
Dr. Juan Pedro Flores Marges  
Dra. Claudia Hidalgo Moreno  
Dr. David Cristóbal Acevedo  
M.C. Laura B. Reyes Sánchez

EDITOR  
ASSOCIATE EDITOR  
TECHNICAL EDITORS

Dr. Antonio Vázquez Alarcón  
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos  
Dr. Manuel Sandoval Villa  
Dr. Edna Alvarez Sánchez  
Dr. Mateo Vargas Hernández  
Dr. David Espinosa Victoria  
Dra. Carmen Gutiérrez Castorena  
Dra. Ma. del Carmen González Chávez  
Dr. David Cristóbal Acevedo  
M.C. Jorge Alvarado López  
M.C. Langen Corlay Chee  
Ina Aalmers de Aguilar  
Diane Fumiko Miyoshi Udo

STYLE EDITORS

ENGLISH EDITOR

## DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

- a) Soil Genesis, Morphology and Classification
- b) Soil Physics
- c) Soil Chemistry
- d) Pollution

### Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

- a) Plant Nutrition
- b) Water - Soil - Plant - Atmosphere Relationship
- c) Soil Biology
- d) Technology and Fertilizer Use
- e) Water Management and Use

### Division III: Use of the Soil Resource

- a) Soil Conservation
- b) Drainage and Restoration
- c) Soil Fertility
- d) Agrosystem Productivity

### Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending  
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science  
October - December, 2003 Volume 21 Num. 4

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 and Fax: +52 (595) 95 2 17 21  
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

### EDITORIAL STAFF

Cover design

Ina Aalmers de Aguilar  
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  
Dr. Gabriel Alcántar González  
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. Juan José Peña Cabriales  
Dr. Antonio Turrent Fernández  
Dr. Jorge D. Etchevers Barra

### INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria
Dr. Elemer 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. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. José Rodríguez	Chile
Dr. Karl Stahr	Germany
Dr. Bernardo Van Raij	Brazil
Dr. Rafael Villegas	Cuba
Dr. Ramón A. Rosell	Argentina

# TERRA

OCTUBRE - DICIEMBRE DE 2003 • VOLUMEN 21 • NUMERO 4  
OCTOBER - DECEMBER, 2003 • VOLUME 21 • NUMBER 4

## DIVISION I

- 449** Suelos agrícolas contaminados por metales pesados provenientes de depósitos de vehículos de desecho.  
Agricultural soils contaminated by heavy metals from a scrapyard of discarded vehicles.  
*Miguel Ángel Balderas-Plata, Lenom J. Cajuste,  
Jorge Alberto Lugo-de la Fuente y Antonio Vázquez-Alarcón*

## DIVISION II

- 461** Presión osmótica de la solución nutritiva y la producción de plántulas de melón.  
Osmotic pressure of the nutrient solution and the production of muskmelon seedlings.  
*Pablo Preciado-Rangel, Gustavo A. Baca-Castillo,  
Juan L. Tirado-Torres, Josué Kohashi-Shibata,  
Leonardo Tijerina-Chávez y Ángel Martínez-Garza*
- 471** Rendimiento y asignación de materia seca de una variedad de frijol en un sistema hidropónico y suelo.  
Yield and dry matter partition of a common bean variety in a hydroponic system and soil.  
*A. García-Esteva, J. Kohashi-Shibata, G.A. Baca-Castillo y  
J.A.S. Escalante-Estrada*
- 481** Tolerancia de tubérculos de papa cv. Alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad.  
Tolerance of potato tubers cv. Alpha in sprouting stage to salinity stress.  
*E. Sánchez-Bernal, M. Ortega-Escobar, V. González-Hernández,  
G. Ruelas-Angeles, J. Kohashi-Shibata y N. García-Calderón*

493 Bacterias y hongos hidrocarbonoclastas de rizósfera frijol y maíz, en un suelo contaminado con petróleo.  
Hydrocarbonoclastic bacteria and fungi of the rhizosphere of bean and corn, in a soil with petroleum pollution.  
*Elizabeth Hernández-Acosta, Ronald Ferrera-Cerrato,  
María del Carmen Gutiérrez-Castorena,  
Refugio Rodríguez-Vázquez, Juan Enrique Rubiños-Pantay  
Luis Fernández-Linares*

503 Crecimiento y fisiología de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq en simbiosis con hongos micorrízicos arbusculares.  
Growth and physiology of *Citrus volkameriana* Tan & Pasq in arbuscular mycorrhizal symbiosis.  
*Alejandro Alarcón, María del Carmen González-Chávez y  
Ronald Ferrera-Cerrato*

513 Mejoramiento del manejo de distritos y módulos de riego utilizando Sistemas de Información Geográfica.  
Improvement of management of irrigation modules and districts using Geographic Information Systems.  
*Enrique Mejía-Saenz, Adolfo Exebio-García,  
Enrique Palacios-Vélez, Ana Laura Santos-Hernández y  
Ma. Eugenia Delgadillo-Piñón*

523 Evaluación económica del proceso de transferencia del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, México.  
Economic evaluation of the transfer process of the Irrigation District 011 Alto Rio Lerma, Guanajuato, Mexico.  
*Enrique Mejía-Saenz, Enrique Palacios-Vélez,  
Jesús Chávez-Morales, Fedro Zazueta-Ranahan,  
Leonardo Tijerina-Chávez y Eduardo Casas-Díaz*

533 Respuesta del plátano variedad Enano Gigante a tres espaciamientos de drenaje subsuperficial, en La Chontalpa, Tabasco.  
Response of the Grand Nain banana at three subsuperficial drainage spacings in "La Chontalpa", Tabasco.  
*Santiago Yzquierdo-Arébalos, Eugenio Carrillo-Ávila y  
Oscar L. Palacios-Vélez*

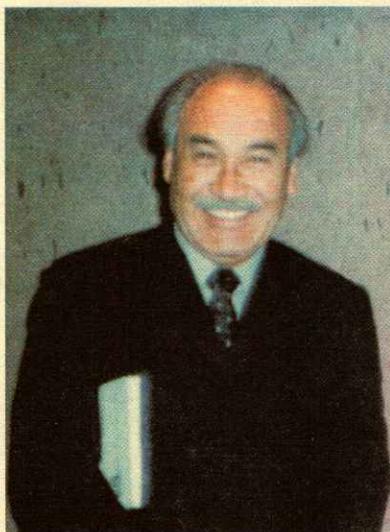
### DIVISION III

- 545** Predicción del tiempo oportuno para planear y operar sistemas de labranza.  
Timeliness prediction for tillage planning and operation.  
*Martín Cadena-Zapata, Santos Campos-Magaña, Eduardo Narro-Farías y Tomás Gaytán-Muñiz*
- 551** Labranza reducida y convencional en la distribución espacial de la maleza y rendimiento de frijol.  
Effect of reduced and conventional tillage on the spatial distribution of weed and dry bean yield.  
*Mario D. Amador-Ramírez*
- 561** Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de avena forrajera con tres sistemas de labranza.  
Nitrogen mineralization in the soil and oat forage production under three tillage systems.  
*Enrique Salazar-Sosa, Alfredo Beltrán-Morales, Manuel Fortis-Hernández, Juan Antonio Leos-Rodríguez, José Antonio Cueto-Wong y Cirilo Vázquez-Vázquez*
- 569** Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de maíz forrajero con tres sistemas de labranza.  
Nitrogen mineralization in the soil and corn forage production under three tillage systems.  
*Enrique Salazar-Sosa, Alfredo Beltrán-Morales, Manuel Fortis-Hernández, Juan Antonio Leos-Rodríguez, José Antonio Cueto-Wong, Cirilo Vázquez-Vázquez y Juan José Peña-Cabriales*

Revisores y Editores Técnicos de este número Reviewers and Technical Editors of this number	577
Revisores y Editores Técnicos Volumen 21, Número 1 Reviewers and Technical Editors Volume 21, Number 1	578
Índice de Autores Volumen 21 / Authors index Volume 21	579
Normas para publicación / Instructions to authors	581

## IN MEMORIAM

M. en C. ALFREDO ECHEGARAY ALEMAN (1922 – 2003)



*Más que un mentor ... un amigo*

Pionero de las investigaciones sobre biotecnología y sus aplicaciones en la agricultura, formador de varias generaciones de universitarios, el maestro Echegaray dedicó 53 años de su vida a la docencia e investigación en la Escuela Nacional de Agricultura, hoy Universidad Autónoma Chapingo, en el Colegio de Postgraduados, así como en la Universidad Nacional Autónoma de México y en el Instituto Politécnico Nacional. En estas instituciones impartió cursos de Bacteriología General, Fitopatología, Biotecnología Agrícola, Microbiología General, Industrial, de Suelos y Pecuaria, entre otros.

El maestro Echegaray era originario del Distrito Federal; egresó como Químico Bacteriólogo Parasitólogo de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN y estudió la Maestría en Ciencias en el Colegio de Postgraduados; como becario de la Fundación Rockefeller, se especializó en Microbiología del Suelo, en Davis-Universidad de California.

La labor docente, así como el trabajo de investigación, vocación de servicio y entrega, cualidades ejemplares del maestro Alfredo Echegaray, lo hicieron acreedor a un merecido prestigio entre sus compañeros y estudiantes, que hoy lo recordamos. Cabe destacar, además, su don de gente, calidez humana, capacidad de análisis crítico y clara manera de transmitir el conocimiento. Gracias a ellos logró despertar el interés de sus estudiantes y colaboradores en áreas de investigación fundamentales para el desarrollo del país. Su espartana disciplina personal y su amor por la ciencia contribuyeron a ubicar a sus alumnos en la realidad, a veces difícil de enfrentar, pero indispensable de atender como compromiso de todo universitario. Los que tuvimos la oportunidad de conocerle, de ser depositarios de su confianza, de recibir sus oportunos consejos y constructivas críticas, tuvimos la suerte de tener en él a un amigo, más que un mentor.

Descanse en Paz, Maestro Echegaray.

# SUELOS AGRÍCOLAS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS PROVENIENTES DE DEPÓSITOS DE VEHÍCULOS DE DESECHO

## Agricultural Soils Contaminated by Heavy Metals from a Scrapyard of Discarded Vehicles

Miguel Ángel Balderas-Plata<sup>1†</sup>, Lenom J. Cajuste<sup>1</sup>, Jorge Alberto Lugo-de la Fuente<sup>2</sup> y  
Antonio Vázquez-Alarcón<sup>3</sup>

### RESUMEN

El propósito de este trabajo fue determinar el grado de contaminación por metales pesados provenientes de depósitos de vehículos de desecho en suelos agrícolas que se encuentran en la periferia de éstos. Las muestras de suelo (0 a 10 y 10 a 30 cm de profundidad) se tomaron a lo largo de un trayecto a intervalos regulares de 5 m, hasta una distancia de 25 m. Se observó que en el suelo estudiado, en el ejido de San Gabriel Jilotepec (ESAJ), los contenidos de Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn presentan una distribución homogénea y la concentración más elevada de ellos se tuvo en la capa superficial del suelo (0 a 10 cm), localizada en el punto inicial del trayecto donde se tomaron las muestras. El índice de "Zn equivalente", criterio empleado para determinar el potencial tóxico del suelo, señala que el suelo del sitio de ESAJ puede considerarse como potencialmente tóxico, por presentar valores de Zn equivalente superiores a 250  $\mu\text{g g}^{-1}$ . La presencia de Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Ni y Zn en el suelo del sitio estudiado, en concentraciones superiores a las detectadas en el suelo control, indica un aporte de estos elementos a partir del depósito de vehículos de desecho. Además, se realizó una evaluación del riesgo de la contaminación por metales pesados en pasto ryegrass (*Lolium multiflorum*) en condiciones controladas. Aun cuando las concentraciones detectadas en las plantas de los tratamientos en los que se les adicionaron 300  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Cu (Cu300) y 600  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Zn (Zn600) al suelo, superaron los valores permisibles para esta especie, no se observaron efectos nocivos en su desarrollo; sólo

en las plantas del tratamiento Cu300, se presentaron algunos síntomas indicadores de las altas concentraciones de Cu a las que se expusieron las plantas.

*Palabras clave:* Contaminación de suelos, Zn equivalente, trayecto.

### SUMMARY

The purpose of this work was to determine the level of contamination from heavy metals proceeding from discarded vehicles left in scrapyards in agricultural soils located in the vicinity of such yards. Soil samples (at 0-10 and 10-30 cm depth) were collected from the sites following a longitudinal transect at regular intervals of 5 m from the scrapyard up to a distance of 25 m. It was observed that in the site of the "ejido" of San Gabriel Jilotepec (ESAJ) the contents of Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, and Zn show a homogeneous distribution and their highest concentration was found in the top layer of the soil (0-10 cm), located at the initial point of the transect. The index of "equivalent Zn", a criterion to determine the toxic potential of the soil, shows that the soil of the site of ESAJ is considered potentially toxic, presenting equivalent Zn values above 250  $\text{mg g}^{-1}$ . The presence of Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, and Zn in the soil with maximum concentrations compared with those detected in the control soil, shows a contribution of these elements from the scrapyard of discarded vehicles. A risk assessment of contamination by heavy metals in Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) was also carried out under controlled conditions. Even though the concentrations detected in the plants of the treatments in which 300  $\text{mg g}^{-1}$  Cu (Cu300) and 600  $\text{mg g}^{-1}$  Zn (Zn600) were added to the soil exceeded the permissible levels of concentration for this species, no deficiency symptoms of plant growth were observed; only in the plants of the Cu300 treatment some symptoms indicative of the high concentration of Cu to which the plants were exposed were observed.

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

<sup>†</sup> Autor responsable ([mplata@colpos.colpos.mx](mailto:mplata@colpos.colpos.mx)).

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario 100, 50000 Toluca, México.

<sup>3</sup> Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

*Index words:* Soil pollution, equivalent Zn, transect.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, y en las condiciones actuales en las que se han desarrollado las actividades agrícolas en México, pueden apreciarse diversas fuentes de contaminación que, con el paso del tiempo, tienden a provocar la alteración del suelo y a repercutir en la producción de los cultivos. Esto se debe a la adición de diversas sustancias, como: fertilizantes, pesticidas, aguas negras y lodos residuales de origen industrial y doméstico, vertidos industriales y elementos menores (Bonilla-Fernández *et al.*, 1993; Gutiérrez-Castrejón, 1993; Seoánez *et al.*, 1999).

Los elementos menores o metales pesados pueden participar en una serie de procesos al incorporarse al ciclo del agua, principalmente en la fase relacionada con el suelo, llegando a acumularse en éste como resultado de reacciones químicas, vía procesos de adsorción, solubilización, precipitación y cambios en sus estados de oxidación, o pueden estar presentes en tejidos vegetales, debido a la asimilación por la planta. En consecuencia, el uso agrícola de estos suelos contaminados por metales pesados, aparentemente, produce cultivos normales, pero potencialmente peligrosos para el consumo humano y animal (Fergusson, 1990; Vázquez *et al.*, 2001).

La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante varios años. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación (CONSUMER, 2001).

En suelos de uso agrícola, la distribución y concentración de los elementos traza son incrementadas significativamente a través de los años por la adición de distintas sustancias que los contienen en menor o mayor proporción, debido a actividades realizadas por el hombre: minería, refinación, uso de agroquímicos y depósitos de vehículos de desecho, lo que ha provocado que los metales se encuentren en cantidades y formas que la naturaleza no ha originado (Cala-Rivero *et al.*, 1985; Abdelrahman y Al-Ajmi, 1994; Kabata-Pendias, 1995; Cajuste y Laird, 2000).

Vergara (1999) consideró que las principales fuentes de contaminación por Pb son la gasolina, la actividad minera, la actividad industrial, las

fundidoras, las baterías rotas de vehículos, las soldaduras y pinturas utilizadas en vehículos; el acero, además de contener Pb, también contiene Zn. El forro de frenos y el embrague desprenden Ni y el revestimiento antioxidante de numerosos componentes del vehículo contiene Cr<sup>6+</sup>. Cajuste y Laird (2000) han reportado semejantes observaciones e indicaron que la mayoría de los demás metales pesados también pueden provenir de estas fuentes.

En los últimos años, se han incrementado, de manera considerable, los depósitos de vehículos de desecho; los restos de estos vehículos son fuente de contaminación por Pb, Cd, Zn, Cu, aceite, líquido de frenos, lubricantes y, sobre todo, una gran cantidad de óxidos de hierro, originados por procesos mecánicos (trititación, prensado, fraccionamiento e intemperismo) de los vehículos, trozos de partes de hierro y piezas mecánicas; los fluidos y fragmentos originados pueden penetrar en el perfil del suelo, dando como resultado un deterioro progresivo de la calidad del suelo en los alrededores de los depósitos de vehículos de chatarra (Chicharro-Martín *et al.*, 1998).

Chicharro-Martín *et al.* (1998) observaron un incremento en los contenidos totales de Pb, Cd, Cr, Cu, Ni y Zn, y también de óxidos de Fe y Mn en los alrededores de un depósito de vehículos de desecho en San Martín de la Vega (Madrid, España), los cuales decrecían claramente con la distancia. En la capa superficial (0 a 2 cm) los contenidos de óxidos de Fe y Mn fueron altos y decrecían con la profundidad.

La concentración de los metales traza en la solución del suelo es un buen índice de la movilidad de éstos en el suelo, además de ser útiles en el momento de medir el grado de contaminación de los mismos (Cala-Rivero *et al.*, 1985; Kabata-Pendias, 1995).

Se han formulado criterios, aceptados de manera internacional, que permiten evaluar el potencial tóxico de los suelos, uno de estos criterios consiste en el llamado "Zn equivalente". Este criterio indica la relación que existe entre tres metales potencialmente tóxicos, Cu, Ni y Zn, siendo el Cu y Ni dos y ocho veces potencialmente superior al Zn, respectivamente. De acuerdo con este criterio, aquellos suelos que presentan valores superiores a 250 µg g<sup>-1</sup> de Zn equivalente pueden considerarse como potencialmente tóxicos (Andreu y Bouluda, 1995).

Conociendo el peligro que representan los metales pesados, al ser considerados la mayoría de ellos como elementos tóxicos que pueden ser bioacumulables e

integrarse a la red trófica o a los ciclos biogeoquímicos, surgió la necesidad de determinar el potencial tóxico de los suelos contaminado por Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn en su contenido total. También se cuantificaron en su fracción disponible en áreas agrícolas que se encuentran en la periferia de depósitos de vehículos de desecho, debido a que los metales pesados pueden llegar a representar un riesgo para la salud humana, además de provocar alteraciones irreversibles en los ecosistemas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se seleccionó por ser un terreno agrícola con cultivo de maíz de riego que se encuentra avecinado por un depósito de vehículos de desecho. El depósito tiene un tiempo de residencia superior a 20 años y no tiene alguna una barrera física (barda, canal o carretera) que impida un flujo de las partículas del suelo, así como las que se desprenden de los vehículos de desecho hacia el terreno agrícola, además de que el flujo se viera favorecido por la pendiente. Se ubica en el municipio de Jilotepec, km 35 de la carretera Atacomulco-Jilotepec, dentro del ejido de San Gabriel (ESAJ) en el estado de México. El clima de la zona es templado subhúmedo (humedad moderada), de verano largo, con precipitación de invierno inferior a 5% y poca oscilación térmica (García, 1988; Gobierno del Estado de México, 1993a,b). El suelo representativo de esta zona pertenece a la clase de los Vertisoles, se desarrolla sobre rocas volcánicas, siendo éstas de intermedias a básicas dominando las calcialcalinas, asociados a materiales piroclásticos (Gobierno del Estado de México, 1993b).

Las muestras de suelo (de 0 a 10 y de 10 a 30 cm de profundidad) se tomaron siguiendo un trayecto a intervalos regulares de 5 m desde la periferia del depósito hasta una distancia de 25 m. Además de estas muestras, se obtuvo un suelo testigo, el cual se ubicó en el lado opuesto del depósito donde se realizó la toma de muestras del transecto, sitio que se consideró sin influencia del depósito de vehículo de desecho al encontrarse en una zona de mayor altitud, por lo que los escurrimientos provenientes del depósito no influyen en la concentración de los metales presentes (Chicharro *et al.*, 1998).

Las muestras de suelo se secaron y se molieron. Para las muestras utilizadas para la cuantificación de los metales totales, se utilizó un tamiz con malla de 0.149 mm y, para los metales extraídos, uno con malla

de 2 mm. Las determinaciones de las propiedades físicas y químicas se realizaron de acuerdo con las técnicas descritas por Jackson (1982): pH en agua y KCl, en una relación 1:2.5, materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black modificado, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes intercambiables recuperados con acetato de amonio, y la textura por el método de Bouyoucos.

Los contenidos totales de los metales se extrajeron a través del método de digestión húmeda, con una mezcla de HNO<sub>3</sub>:HCl:HClO<sub>4</sub> (4:1:1) (Perkin-Elmer, 1982). Las fracciones extraídas se obtuvieron con la solución extractora de DTPA 0.005 M de acuerdo con el método propuesto por Lindsay y Norvell (1978). La cuantificación de los metales se realizó por absorción atómica con un equipo Perkin-Elmer 3110.

## Experimento de Invernadero

Una vez que se determinaron los metales en concentración por encima de los límites normales del suelo, de acuerdo con lo propuesto en el Cuadro 1, se diseñó un experimento en invernadero para evaluar el riesgo de la concentración crítica de dos metales (Cu y Zn) y el efecto que pudiera tener en la especie [pasto ryegrass italiano (*Lolium multiflorum*)] por la adición de metales al suelo.

El diseño del experimento fue de tipo factorial 2 x 2 con arreglo al azar de los cuatro tratamientos (cada uno con seis repeticiones), los factores que se consideraron fueron la concentración del metal y, en segundo lugar, la planta. Los valores del factor metal son dos concentraciones de éste: para el primer valor se consideró la concentración promedio encontrado en el suelo de Cu en "ESAJ" (considerado como el tratamiento testigo); el segundo valor, una

Cuadro 1. Valores típicos e intervalos de metales pesados en suelo.

Elemento	Valor típico	Intervalo		
		µg g <sup>-1</sup>		
Cd	0.06 <sup>†</sup>	0.01	-	7 <sup>†</sup>
Co	8 <sup>†</sup>	1	-	40 <sup>†</sup>
Cr	20 <sup>†</sup>	5	-	1000 <sup>†</sup>
Cu	20 <sup>†</sup>	2	-	100 <sup>‡</sup>
Fe	2000 <sup>†</sup>	10000	-	300000 <sup>‡</sup>
Mn	850 <sup>†</sup>	100	-	4000 <sup>†</sup>
Ni	40 <sup>†</sup>	10	-	100 <sup>‡</sup>
Pb	10 <sup>†</sup>	2	-	200 <sup>‡</sup>
Zn	50 <sup>†</sup>	10	-	300 <sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Kabata-Pendias y Pendias (1992); <sup>‡</sup> Bohn *et al.* (1993).

concentración de  $300 \mu\text{g g}^{-1}$  de Cu (tratamiento problema "Cu300"). El factor planta contempla la concentración de Cu en dos órganos de la planta (*Lolium multiflorum*): la parte aérea y la radicular. Un diseño similar al expuesto anteriormente se aplicó para demostrar el efecto del Zn en la planta (*L. multiflorum*) considerando una concentración en el tratamiento problema "Zn600" de  $600 \mu\text{g g}^{-1}$  de Zn en suelo y la concentración de Zn detectada en el suelo de "ESAJ" como el tratamiento testigo. Las dosis del metal (Cu o Zn) se aplicaron en forma de sulfato ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  o  $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). El suelo de las unidades experimentales se dejó secar a temperatura ambiente, se molió y se tamizó con una malla de 2 mm, para la posterior determinación de los metales en su forma total y disponible, la cual se realizó de acuerdo con lo descrito anteriormente para las muestras de suelo del sitio problema.

Una vez llevado a cabo el experimento de invernadero, las plantas cultivadas se cosecharon después de siete semanas de la germinación; éstas se lavaron (agua corriente, solución detergente 0.1% y agua destilada), luego se separaron en su porción aérea y radicular; finalmente, se secaron hasta peso constante a una temperatura de  $80^\circ\text{C}$ . La extracción de metales de la planta se realizó por el método de "cenizas secas" (Perkin-Elmer, 1982).

Con el propósito de establecer si existían diferencias significativas entre las distintas propiedades del suelo y las concentraciones de metales en el sitio problema, con respecto al sitio control, los datos experimentales se sometieron a una prueba de t-student de aproximación de Welch. Para establecer relaciones entre las variables físicas y químicas medidas en el suelo y para las concentraciones totales y disponibles de los metales en el suelo, se empleó un análisis de correlación múltiple. Se aplicaron dos diseños factoriales  $2 \times 2$  para evaluar el riesgo de la concentración crítica de Cu y Zn y el efecto que se pudiera tener en plantas (*Lolium multiflorum*), cultivadas en un sustrato al que se le aplicaron metales, todo en condiciones de invernadero.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suelo estudiado en ESAJ es medianamente ácido, con contenido de materia orgánica (MO) medio, una capacidad de intercambio catiónico (CIC) considerada como baja, un contenido medio de los cationes de cambio  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  y bajo el de  $\text{Mg}^{2+}$ . Al

comparar los resultados de las diferentes propiedades del suelo con el suelo control, se observa que se presentan diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ) con pH ( $t = 10.36$ ), con MO ( $t = 6.79$ ) y con el contenido de los cationes de cambio  $\text{Mg}^{2+}$  ( $t = 2.16$ ) y  $\text{Na}^+$  ( $t = 3.65$ ). La textura del sitio es franco-arcillosa; el contenido de arcilla y limo es similar al del suelo testigo, mientras que el de arena es menor (Cuadro 2).

Las concentraciones de los metales pesados en sus formas total y disponible (Cuadros 3 y 4) en el suelo se consideran como normales, al no rebasar los límites del suelo de acuerdo con lo propuesto por Kabata-Pendias y Pendias (1992) y Bohn *et al.* (1993) (Cuadro 1).

Al comparar las concentraciones totales de los metales del suelo de ESAJ con el suelo testigo, se presentan diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ ) para los siguientes metales analizados: Cd ( $t = 3.36$ ), Co ( $t = 3.09$ ), Cr ( $t = 5.89$ ), Fe ( $t = 4.64$ ), Mn ( $t = 9.47$ ), Ni ( $t = 2.85$ ) y Zn ( $t = 1.85$ ); en todos los casos fueron mayores las concentraciones en las muestras problema que en las muestras testigo. El encontrar concentraciones más elevadas de estos metales permite inferir que el depósito de vehículos de chatarra está originando un efecto negativo en el suelo analizado, al aportar ciertas cantidades de estos metales.

La concentración de los metales Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn fue mayor en la muestra tomada junto al depósito de vehículos (punto inicial de muestreo) y a la profundidad de 0 a 10 cm, que en los demás puntos de muestreo. La distribución de las concentraciones de estos metales y del Mn, a lo largo del trayecto en ambas capas de suelo analizadas (0 a 10 y 10 a 30 cm), es homogénea; no se observó una tendencia a incrementar o disminuir en su concentración, conforme se aleja del depósito de vehículos de chatarra. El Co y Fe tienen la tendencia a incrementar su concentración de forma continua a lo largo del trayecto, casi duplicándose ésta desde el punto inicial de muestreo (0 m) hasta el final de éste (25 m).

Al comparar las concentraciones de los metales extraídos con DTPA en ESAJ (Cuadro 4) con las del suelo testigo, se presentan diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ ) en la concentración de Fe ( $t = 10.26$ ), Mn ( $t = 5.66$ ), Ni ( $t = 4.69$ ) y Zn ( $t = 2.09$ ). La concentración del Cd, Cu, Ni, Pb y Zn del sitio problema es mayor que en el sitio testigo, lo que hace presumir que el sitio ESAJ probablemente esté recibiendo aportes de estos

Cuadro 2. Algunas propiedades físicas y químicas del suelo en el ejido de San Gabriel, Jilotepec.

Muestra <sup>†</sup>		pH		MO <sup>‡</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	CIC <sup>§</sup>	Arcilla	Limo	Arena	Textura <sup>¶</sup>
Dis.	Prof.	H <sub>2</sub> O	KCl									
m	cm			%	cmol kg <sup>-1</sup>			%				
0	0 a 10	6.2	5.6	3.8	7.2	0.2	1.22	37	29.6	24.0	46.4	F
0	10 a 30	6.0	5.5	2.0	5.6	0.9	0.70	28	22.6	30.0	47.4	F
5	0 a 10	5.4	5.2	2.5	5.6	0.6	0.39	32	25.6	30.0	44.4	F
5	10 a 30	5.7	5.1	2.7	5.5	0.6	0.23	32	24.6	31.0	44.4	F-a
10	0 a 10	5.6	5.2	2.5	5.8	1.4	0.58	39	29.8	29.8	40.4	F-a
10	10 a 30	5.7	5.2	2.2	5.9	1.4	0.48	32	33.6	27.0	39.4	F-a
15	0 a 10	5.9	5.3	1.8	5.9	0.8	0.73	35	28.6	27.0	44.4	F-a
15	10 a 30	5.8	5.2	1.3	5.5	1.3	0.65	33	36.7	22.9	40.4	F-a
20	0 a 10	5.6	5.3	1.2	5.2	0.6	0.73	31	33.7	23.0	43.3	F-a
20	10 a 30	5.8	5.2	0.9	5.4	0.8	0.53	33	33.6	27.0	39.4	F-a
25	0 a 10	5.8	5.4	1.4	5.7	0.3	0.96	34	32.8	24.8	42.4	F-a
25	10 a 30	5.7	5.3	1.3	5.1	1.4	0.81	30	37.8	26.8	35.4	F-a
Promedio		5.8	5.3	2.0	5.7	0.9	0.66	33	30.8	26.9	42.3	F-a
σ		0.2	0.15	0.82	0.5	0.4	0.26	3.0	4.8	2.8	3.4	-
Tes <sup>#</sup>	0 a 10	5.1	4.9	3.8	6.4	0.4	0.49	33	33.6	27.0	39.4	F-a
Tes <sup>#</sup>	10 a 30	5.3	4.7	3.4	5.5	0.9	0.29	34	33.6	24.0	42.4	F-a

<sup>†</sup> Dis. = distancia; Prof. = profundidad; <sup>‡</sup> Materia orgánica; <sup>§</sup> Capacidad de intercambio catiónico; <sup>¶</sup> Textura: F = franca, F-a = franca-arcillosa; <sup>#</sup> Con: suelo testigo.

Cuadro 3. Concentración de metales totales en suelo del ejido de San Gabriel, Jilotepec (ESAJ).

Muestra		Cd	Co	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Distancia	Profundidad									
m	cm	μg g <sup>-1</sup>								
0	0 a 10	3.19	12.3	102.9	22.9	17662	538	57.2	126.0	495.0
0	10 a 30	1.35	8.6	15.7	10.5	15912	449	8.3	19.9	47.0
5	0 a 10	1.43	7.8	19.8	14.4	14850	435	10.9	23.7	68.5
5	10 a 30	1.40	9.2	15.2	11.7	15825	500	10.2	19.9	45.8
10	0 a 10	0.91	8.6	24.8	14.0	20337	398	17.1	23.3	88.6
10	10 a 30	0.93	8.9	21.8	13.8	18462	444	15.2	21.5	69.0
15	0 a 10	0.90	13.1	22.0	13.8	20325	444	15.8	21.0	67.6
15	10 a 30	0.89	12.6	17.3	16.4	28737	501	15.6	19.7	58.6
20	0 a 10	0.86	13.1	20.1	14.6	27537	553	13.4	22.2	63.5
20	10 a 30	0.94	15.2	14.7	15.5	28725	498	14.6	17.7	44.1
25	0 a 10	0.95	14.8	18.1	15.8	29687	541	15.0	18.5	55.6
25	10 a 30	1.01	15.4	18.4	17.4	29500	596	15.5	18.5	54.5
Promedio		1.23	11.6	25.9	15.1	22297	491	17.4	29.3	96.5
σ		0.65	2.8	24.4	3.1	6021	59	12.8	30.5	126.1
Testigo	0 a 10	0.51	9.0	18.0	7.5	13925	349	6.8	17.3	31.3
Testigo	10 a 30	0.68	9.2	16.1	7.7	14537	313	6.9	15.1	26.5

metales provenientes del depósito de vehículos de chatarra; las concentraciones de Fe y Mn fueron menores en las muestras problema que en las muestras testigo. El Ni y Zn fueron los únicos metales determinados que presentaron, tanto en su forma total, como extraídos con DTPA, una diferencia estadísticamente significativa al ser comparados con sus respectivos testigos; en ambos casos fue mayor la concentración en el sitio problema.

La concentración de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn más alta se presenta en la muestra de la capa superior, localizada junto al depósito de vehículo de chatarra. En el resto de los puntos evaluados, la concentración de Cd se mantuvo constante en las dos capas y a lo largo del trayecto. El Cu, Fe, Pb y Zn mostraron una tendencia a disminuir su concentración desde el límite del depósito de vehículos de chatarra hasta el final del trayecto (25 m). El Mn y el Ni tuvieron un

Cuadro 4. Concentración de metales extraídos con DTPA en suelo del ejido de San Gabriel, Jilotepec.

Muestra		Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Distancia	Profundidad							
m	cm	----- $\mu\text{g g}^{-1}$ -----						
0	0 a 10	1.04	32.77	67	32	15.8	22.0	45.5
0	10 a 30	0.15	2.58	51	27	4.0	2.8	11.4
5	0 a 10	0.13	3.17	56	105	2.1	2.5	16.7
5	10 a 30	0.06	2.53	82	49	0.9	2.9	10.9
10	0 a 10	0.11	3.90	70	64	3.4	1.7	19.9
10	10 a 30	0.10	3.95	52	61	2.8	1.9	14.7
15	0 a 10	0.02	1.41	28	41	0.1	1.3	7.4
15	10 a 30	ND	0.70	23	33	ND	1.3	3.4
20	0 a 10	0.03	1.22	35	53	ND	1.4	5.3
20	10 a 30	0.02	0.28	14	21	ND	0.8	1.1
25	0 a 10	0.04	0.60	27	43	ND	1.3	2.7
25	10 a 30	0.01	0.66	24	37	ND	1.0	2.3
Promedio		0.15	4.48	44	47	4.1	3.4	11.8
$\sigma$		0.30	9.00	22	22	5.3	5.9	12.3
Testigo	0 a 10	0.05	1.62	109	120	0.6	2.2	5.8
Testigo	10 a 30	0.03	0.94	108	47	0.6	1.8	2.9

Co y Cr no se detectaron en el suelo. ND: No detectado.

comportamiento irregular a lo largo del trayecto, tendencia que se observó en ambas capas de suelo, además de que el Ni sólo se detectó hasta 15 m de distancia.

Con relación a los valores encontrados para el pH en ESAJ, los metales tienen la siguiente conducta: el Cd puede ser altamente movilizado (Kabata-Pendias y Pendias, 1992), puede darse una menor adsorción de Co y una mayor de Cu (Kuo y Baker, 1980; Graham, 1981; McLaren *et al.*, 1986); mayor solubilidad y disponibilidad para el Cr y Pb; en el caso del Cr, éste puede precipitar, ya que lo hace a pH cercano a 5.5 (Bartlett y Bruce, 1979; Cala y Rodríguez, 1989; Kabata-Pendias y Pendias, 1992); el Mn puede encontrarse altamente soluble, provocando problemas de toxicidad, por otro lado, también puede ser adsorbido por las arcillas (Seoánzes *et al.*, 1999); la disponibilidad del Ni puede ser considerable (Weeb, 1970; Kabata-Pendias y Pendias, 1992); el Zn, en ambos sitios, puede ser fácilmente movilizado y lixiviado, quedando altamente soluble y disponible.

La solubilidad y disponibilidad del Cd puede favorecerse por bajos valores de la CIC que se presenta en el suelo, provocando una disminución en los sitios de intercambio (McBride *et al.*, 1997). En el caso del Pb, la concentración de este elemento puede incrementarse de manera gradual e inhibir procesos microbianos del suelo.

Por los valores de MO presentes, la disponibilidad de Cd, Co (en su forma total como disponible), Cu, Cr

(se favorece la reducción de  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$ ) y Ni (se encuentra adsorbido por la MO o por quelatos) se reduce (Weeb, 1970; Bartlett y Bruce, 1979; Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Römkens y Salomons, 1998; Navarro, 2000); con el Mn puede observarse una insolubilización (Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Seoánzes *et al.*, 1999), puede favorecerse la reducción de Pb (Kabata-Pendias y Pendias, 1992) y también su movilidad y, por lo tanto, su disponibilidad; y para el Zn puede enlazarse con componentes orgánicos originando formas estables (Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Seoánzes *et al.*, 1999; Navarro, 2000).

La arena, fracción dominante, favorece que el contenido de Co, Cr, Cu, Mn, Ni y Zn sea bajo, debido a que se produce una alta movilización y estos metales pueden perderse por lixiviación o lavado del suelo (Weeb, 1970; Franck *et al.*, 1976; Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Seoánzes *et al.*, 1999; Navarro, 2000). Sin embargo, para el caso del Co, al existir una mayor cantidad de arcillas, fuente importante de intercambio iónico, éste puede no perderse, al igual que otros iones (Navarro, 2000).

En el Cuadro 5, se presenta la matriz del análisis de correlación múltiple para conocer el grado de relación entre variables. El pH y el Mn disponible presentaron una correlación negativa ( $r = -0.76$ ,  $P < 0.037$ ). Esta relación negativa del pH con este metal se debe a que a pH ácido, como se presenta en este sitio, la solubilidad y disponibilidad del Mn se incrementa, originando que la fracción disponible

**Cuadro 5. Correlación múltiple entre las propiedades (físico-químicas) y metales pesados determinados del suelo del ejido de San Gabriel, Jilotepec.**

	pH-agua	Ca <sup>2+</sup>	Arcilla	Co	Cu
Fe			0.8479 (0.0005)	0.8573 (0.0004)	
Mn				0.7512 (0.0049)	
Zn					0.9657 (0.0001)
Mn disponible	-0.7658 (0.0037)				
Zn disponible		0.8970 (0.0001)			

disminuya al ser rápidamente absorbida por las plantas (Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Navarro, 2000).

El Ca<sup>2+</sup> presenta una correlación positiva con el Zn extraído por DTPA ( $r = 0.89$ ,  $P < 0.0001$ ). Kabata-Pendias y Pendias (1992) sugirieron que suelos ricos con Ca pueden provocar una inmovilización del Zn, sin embargo, en este sitio las concentraciones de Ca en el suelo es media de acuerdo con la clasificación de Etchevers *et al.* (1971), y el de Zn es alto considerando el valor típico (Cuadro 5). Estas condiciones, concentración media de Ca y las altas concentraciones de Zn, permiten que el efecto que pueda ser provocado por el Ca sea disminuido, favoreciendo una mayor disponibilidad del Zn.

El porcentaje de arcilla presenta una correlación positiva con el Fe ( $r = 0.84$ ,  $P < 0.0005$ ). La relación positiva que se guarda entre el contenido de arcilla y el Fe se debe probablemente a que el contenido de arcilla sea un factor importante para la no-asimilabilidad y movimiento del Fe soluble. Las arcillas son las encargadas de retenerlo mediante procesos simples de adsorción (Navarro, 2000).

El Co tiene correlaciones positivas con Fe ( $r = 0.85$ ,  $P < 0.0004$ ) y con Mn (0.75,  $P < 0.0049$ ); estas posibles relaciones se deben a que el Co se encuentra asociado ampliamente con los óxidos de Fe y Mn donde éste está adsorbido en la superficie (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

El Cu tiene una correlación positiva con Zn ( $r = 0.96$ ,  $P < 0.0001$ ); se dice que las deficiencias del Zn están asociadas a las del Cu, por lo que el comportamiento de uno en el suelo está directamente ligado al del otro (Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Navarro, 2000).

## Zn Equivalente

De manera general, las muestras de suelo presentan valores de Zn equivalente entre 150 y 230  $\mu\text{g g}^{-1}$  (Cuadro 6). No se observa una tendencia a disminuir el valor del índice de contaminación con la distancia del trayecto de muestreo. Algunas muestras del suelo y el valor promedio de ESAJ presentan valores superiores a 250  $\mu\text{g g}^{-1}$ , por lo que se considera al suelo de este sitio como potencialmente tóxico. El suelo testigo presenta valores de Zn equivalente que no se consideran como potencialmente tóxicos.

## Experimento en Invernadero

Los valores de pH del suelo en el experimento en invernadero para el tratamiento testigo son ligeramente ácidos, los del tratamiento de Cu300 y Zn600 se consideran medianamente ácidos; el contenido de MO es medio en los diferentes tratamientos y la CIC es baja; el contenido de Ca<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> en los diferentes tratamientos es alto, y medio el de Mg<sup>2+</sup> y Na<sup>+</sup> (Cuadro 7). La adición del Cu y Zn al suelo utilizado en los tratamientos no modificó las propiedades de pH y MO, por lo que los valores reportados en este experimento en invernadero fueron muy similares a los encontrados en el mismo suelo antes de ser empleado para este propósito; los valores de la CIC son más bajos que los que se presentaron en el suelo antes de realizar el experimento; las

**Cuadro 6. Valores del índice de contaminación "Zn equivalente" en las muestras de suelo del ejido de San Gabriel Jilotepec.**

Distancia	Muestra		Zn Equivalente $\mu\text{g g}^{-1}$
		Profundidad	
m		cm	
0		0 a 10	1158
0		10 a 30	144
5		0 a 10	195
5		10 a 30	158
10		0 a 10	275
10		10 a 30	234
15		0 a 10	238
15		10 a 30	218
20		0 a 10	211
20		10 a 30	190
25		0 a 10	212
25		10 a 30	215
Control		0 a 10	121
Control		10 a 30	113

**Cuadro 7. Valores promedio de las propiedades químicas del suelo utilizado para el experimento en invernadero.**

Tratamiento	pH-H <sub>2</sub> O	pH-KCl	MO <sup>†</sup> %	CIC <sup>‡</sup>	cmol kg <sup>-1</sup> de suelo			
					Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
Testigo	6.2±0.16	4.9±0.06	2.07±0.12	17.6±0.75	12.22±0.81	1.62±0.35	0.79±0.04	0.18±0.01
Cu300	5.8±0.04	4.7±0.01	1.8±0.04	16.8±0.19	11.45±1.09	2.26±0.38	0.80±0.02	0.19±0.01
Zn600	5.7±0.02	4.7±0.01	1.8±0.09	16.6±0.16	10.40±0.92	2.89±0.63	0.83±0.02	0.18±0.01

<sup>†</sup>materia orgánica; <sup>‡</sup>capacidad de intercambio catiónico.

concentraciones de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> se incrementaron en el suelo después de la adición de Cu y Zn.

**Cu en suelo.** De acuerdo con los valores típicos de metales pesados en suelo reportados por Kabata-Pendias y Pendias (1992) y Bohn *et al.* (1993) que se incluyen en el Cuadro 1, la concentración de Cu total y extraído con DTPA en el suelo en el tratamiento testigo se consideran como normales, mientras que las del tratamiento Cu300 superaron la concentración máxima permisible, por lo que puede considerarse al suelo de este tratamiento como tóxico en cuanto a Cu (Cuadro 8). La disponibilidad del Cu, resulta ser muy elevada.

Resulta difícil predecir el comportamiento del Cu en los suelos, ya que tanto el pH, como el contenido de MO juegan un papel complejo en la dinámica de este elemento. Como mencionó Navarro (2000), las discrepancias que se presentan por los valores de pH bajos y los contenidos de MO, pueden explicarse de la siguiente manera: cuando el pH aumenta, la cantidad de Cu fijado a la MO tiende a disminuir, ya que al aumentar la concentración de OH<sup>-</sup>, la disminución de los grupos hidroxilos fenólicos como lugares de adsorción de Cu en la MO son menos probables; por consiguiente, menos lugares cargados negativamente pueden existir, y el ion dominante CuOH<sup>+</sup> no es fácilmente fijado, por lo tanto, su concentración disponible en el suelo puede ser considerablemente alta.

**Cu en planta.** El efecto de la concentración de Cu en el suelo (Testigo y Cu300) sobre su asimilación en

hoja y raíz del pasto ryegrass italiano (*Lolium multiflorum*) propicia que se presentan diferencias estadísticamente significativas (F = 1925.01, P < 0.05) en la concentración de Cu del tratamiento testigo y el Cu300; la concentración de Cu en la planta de este último tratamiento es superior (92 veces mayor) a la detectada en el tratamiento testigo (Figura 1). El contenido de Cu en la planta, en hoja y raíz es estadísticamente diferente (F = 214.68, P < 0.05), se observa que éste es más elevado en la raíz que en la hoja, como lo demuestra el Cuadro 8.

La concentración de Cu que se detectó, tanto en hoja, como en raíz del pasto ryegrass italiano (*Lolium multiflorum*), en el tratamiento testigo se considera como normal para el pasto (Cuadro 9), y no representa riesgo alguno para este cultivo. En el tratamiento Cu300, las concentraciones detectadas, tanto en hoja, como en raíz, se consideran como tóxicas para el pasto; debido a las altas concentraciones de este elemento detectado en el suelo de manera disponible, la asimilación por la planta se facilita a través de una absorción pasiva, en especial cuando la concentración de Cu en solución está en el intervalo tóxico para la planta. De manera general, las plantas absorben al Cu mediante un mecanismo de absorción activa. De acuerdo con Navarro (2000), la movilidad del Cu en las plantas es menor que la de otros elementos y se retiene, por lo general, en hojas y raíces. Este autor mencionó además que, aunque el Cu puede detectarse en distintos órganos de la planta, es en las hojas verdes donde se presenta en mayor concentración.

**Cuadro 8. Concentración de metales en suelo, hoja y raíz de pasto ryegrass italiano (*Lolium multiflorum*).**

Muestra	Cu total suelo	Zn total suelo	Cu disp. suelo	Zn disp. suelo	µg g <sup>-1</sup>			
					Cu-hoja	Cu-raíz	Zn-hoja	Zn-raíz
Testigo	3.05±0.49	103.9±17	2.79±0.04	13.56±0.76	6.92±7.93	8.49±5.15	57.80±17.3	110.21±24.7
Cu300	257.47±41.30	ND	158.59±9.82	ND	433.24±58.07	874.53±67.47	ND	ND
Zn600	ND	467.10±20.33	ND	19.95±1.74	ND	ND	154.73±27.6	393.38±234.4

ND = no determinado.

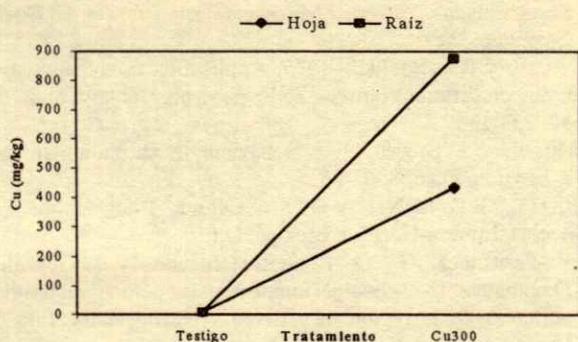


Figura 1. Concentración de Cu en hoja y raíz en pasto ryegrass italiano (*Lolium multiflorum*).

Algunas plantas del pasto ryegrass italiano utilizado en el tratamiento de Cu300 presentaron síntomas producidos por exceso de Cu, como mencionó Navarro (2000), estos fueron: un gran número de raíces de gran tamaño (de hasta 30 cm) y gruesas, pero con un número reducido de hojas (en algunos casos una sola) y de un tamaño pequeño de 7 a 10 cm de largo.

**Zn en suelo.** De acuerdo con Kabata-Pendias y Pendias (1992) y Bohn *et al.* (1993), la concentración total y extraída con DTPA de Zn en el suelo del tratamiento testigo son normales (Cuadro 2), al igual que la concentración extractable con DTPA en el tratamiento de Zn600 (Cuadro 8); la concentración total del tratamiento de Zn600 rebasa el valor máximo permisible en el suelo, por lo que este suelo puede considerarse contaminado por Zn. La baja disponibilidad del metal presente en el suelo puede deberse a que el Zn es fácilmente adsorbido por componentes minerales y orgánicos en muchos tipos de suelos, y por la MO mediante la formación de complejos de alta estabilidad con los ácidos húmicos y fúlvicos.

**Zn en planta.** El efecto de la concentración de Zn en el suelo sobre la planta indicó que se presentan diferencias estadísticamente significativas ( $F = 38.91$ ,

Cuadro 9. Intervalos de concentración de Cu y Zn en tejido vegetal.

Cu	Zn	Fuente
----- $\mu\text{g g}^{-1}$ -----		
1-20	12-47	Kabata-Pendias y Pendias (1992)
2.50	5-10	Alcántar y Sandoval (1999)
1-25	20-100	Navarro (2000)

$P < 0.05$ ) en la concentración de Zn de las plantas (hoja y raíz) del tratamiento testigo y del Zn600. La concentración de este último fue tres veces mayor que la detectada en el tratamiento testigo.

Las concentraciones de Zn en las hojas y raíces son estadísticamente diferentes ( $F = 21.10$ ,  $P < 0.05$ ); éstas son mayores en la raíz que en la hoja, como se observa en la Figura 2. Este comportamiento se debe a la poca movilidad dentro de la planta, comportamiento similar se presenta cuando las plantas crecen en suelos ricos en Zn (Tinker, citado por Cervantes y Moreno, 1999; Navarro, 2000).

La prueba de análisis de varianza para determinar el efecto de la concentración de Zn en el suelo (testigo y Zn600) sobre su asimilación por la planta (en hoja y raíz del pasto ryegrass italiano), señala que no se establece ninguna interacción ( $F = 64.31$ ,  $P < 0.05$ ) entre las concentraciones de Zn por tratamiento (testigo y Zn600) y la parte de la planta (hoja y raíz), como lo muestra la Figura 2.

De acuerdo con lo propuesto por Kabata-Pendias y Pendias (1992) y Alcántar y Sandoval (1999) (Cuadro 9), tanto las hojas, como las raíces de las plantas de los tratamientos testigo y Zn600 presentan contenidos de Zn por encima de los intervalos de concentración normal que pueden contener las plantas, los cuales son considerados como nocivos para la planta. Con lo propuesto por Navarro (2000), sólo la raíz es la que presenta concentraciones por encima del intervalo aceptado como normal para una planta. En el tratamiento Zn600, las concentraciones, tanto de hoja, como de raíz, se encuentran por encima del valor máximo considerado como normal para las plantas, por lo que las concentraciones detectadas en la planta pueden tomarse como nocivas.

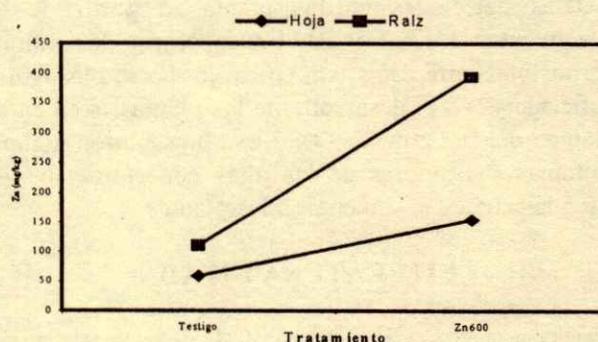


Figura 2. Concentración de Zn en hoja y raíz en pasto ryegrass italiano (*Lolium multiflorum*).

En estas condiciones, las altas concentraciones de Zn en la planta pueden provocar la inhibición del transporte de electrones fotosintéticos; alteraciones en la concentración de Cu, Fe, Ca y Mg; modificación de la permeabilidad de membranas (Cervantes y Moreno, 1999).

Durante el periodo que duró el experimento (ocho semanas) el desarrollo del cultivo fue satisfactorio en todos los tratamientos. Se observó un mayor crecimiento en los tratamientos Cu300 y Zn600, aun cuando las concentraciones detectadas se consideran nocivas, al superar los valores propuestos en el Cuadro 9, tomados como los intervalos normales de concentración para una planta. Algunos investigadores han sugerido que las plantas crean mecanismos de resistencia a los metales, con lo que no se ve alterado su desarrollo. Kabata-Pendias y Pendias (1992) mencionaron que cuando algunas especies vegetales crecen en suelos ricos en Zn o contaminados por Zn, éstas acumulan una gran cantidad de metal sin mostrar signos de toxicidad.

### CONCLUSIONES

- Las concentraciones de los metales pesados detectados en el suelo en sus formas total y disponible no son tóxicas, debido a que no superan los intervalos de concentración considerados como permisibles en el suelo. Sin embargo, la presencia de Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Ni y Zn en el suelo estudiado, en concentraciones superiores a las que se detectaron en el sitio testigo, indica un aporte de estos elementos a partir del depósito de vehículos de desecho. El índice de Zn equivalente señala que el suelo de ESAJ puede considerarse como potencialmente tóxico. En el experimento de invernadero, las concentraciones de metales detectadas en las plantas a partir de los tratamientos Cu300 y Zn600 superaron los valores permisibles para éstas; sin embargo, no se observaron deficiencias en el desarrollo de las plantas; sólo en las plantas del tratamiento Cu300 se presentaron algunos síntomas indicadores de las altas concentraciones de Cu a las cuales se sometieron las plantas.

### LITERATURA CITADA

- Abdelrahman, H.A. y H. Al-Ajmi. 1994. Heavy metals in some water and wastewater irrigated soils of Oman. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 25: 605-613.
- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación Especial 10. Colegio de Postgraduados. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Andreu, V. y R.J. Bouluda. 1995. Application of contamination index on different farming soils. *Environ. Contam. and Tox.* 54: 228-236.
- Bartlett, R. y J. Bruce. 1979. Behaviour of chromium in soil. *J. Environ. Qual.* 8: 63-65.
- Bohn, H.L., B.L. McNeal y G.O. O'Connor. 1993. Química de suelos. Limusa-Noriega. México, D.F.
- Bonilla-Fernández, G., G. Romero-Hernández y J. González-Domínguez. 1993. Evaluación de metales pesados en terrenos agrícolas de la región de Atlixco y Huequechula, Edo. de Puebla. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 9(3): 26.
- Cajuste, L.J. y R.J. Laird. 2000. The relationships between the phytoavailability and the extractability of heavy metals in contaminated soils. pp. 189-198. *In: Iskandar, I.K. (ed.). Environmental restoration of metals-contaminated soils.* Lewis Publishers. New York.
- Cala-Rivero, V. y J. Rodríguez-Sanchidrián. 1989. Estudio de la contaminación por metales pesados en la Vega de Aranjuez. I y II. *Anal. Edaf. Agrobiol.* 49: 189-193.
- Cala-Rivero, V., J. Rodríguez-Sanchidrián y A. Guerra-Delgado. 1985. Contaminación de metales pesados en suelos de la Vega de Aranjuez. (I) Pb, Cd, Cu, Zn, Ni y Cr. *Anal. Edaf. Agrobiol.* 32: 1595-1608.
- Cervantes, C. y R. Moreno S. 1999. Contaminación ambiental por metales pesados. AGT Editor. México, D.F.
- Chicharro-Martín, A., V. Cala-Rivero y M.T. Larrea-Marín. 1998. Contamination by heavy metals in soils in the neighbourhood of a scrapyard of discarded vehicles. *The Science of the Total Environ.* 212: 145-152.
- CONSUMER. 2001. Medio ambiente. Metales pesados, toda una amenaza. *Consumer Digital* 34. Barcelona, España.
- Etchevers, J.D., W. Espinoza G. y E. Riquelme. 1971. Manual de fertilidad y fertilizantes. 2a ed. Facultad de Agronomía. Universidad de Concepción. Chillan, Chile.
- Fergusson, J.E. 1990. The heavy elements: Chemistry environment impact and health effects. Pergamon Press. London, UK.
- Franck, R., K. Ishidra y P. Suda. 1976. Metals in agricultural soils of Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 56: 181-197.
- García, E. 1988. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Offset Larios. México, D.F.
- Gobierno del Estado de México. 1993a. Atlas ecológico de la cuenca hidrológica del Lerma. Vol. I. Gobierno del Estado de México. Toluca, México.
- Gobierno del Estado de México. 1993b. Atlas general del Estado de México. Vol. II. Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral. Toluca, México.
- Graham, R.D. 1981. Absorption of copper by plant roots. pp. 389-397. *In: Graham, R.D. (ed.). Copper in soils and plants.* Academy Press. New York.
- Gutiérrez-Castrejón, T. 1993. Efecto de aguas negras sobre la biomasa y actividades microbianas en suelos agrícolas del Estado de Hidalgo. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 9(3): 38.
- Jackson, L.M. 1982. Análisis químico de suelos. Omega. Madrid, España.
- Kabata-Pendias, A. 1995. Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils. pp. 3-18. *In: Solomons, W., U. Förstner y P. Mader. Heavy metals: Problems and solutions.* Springer Verlag. Berlin, Germany.

- Kabata-Pendias, A. y H. Pendias. 1992. Trace elements in soils and plants. 2nd ed. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Kuo, S. y A.S. Baker. 1980. Sorption of copper, zinc and cadmium by some acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 969-974.
- Lindsay, W.L. y W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428.
- McBride, M., S. Sauvé y W. Hendershot. 1997. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European J. Soil Sci.* 48: 337-346.
- McLaren, R.G., D.M. Lawson y R.S. Swift. 1986. Sorption and desorption of cobalt by soils and soil components. *J. Soil Sci.* 37: 413-426.
- Navarro, G. 2000. Química agrícola. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Perkin-Elmer. 1982. Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry. Perkin-Elmer Corporation. Norwalk, CT.
- Römkens, P.F. y W. Salomons. 1998. Cd, Cu and Zn solubility in arable and forest soils: Consequences of land use changes for metal mobility and risk assessment. *Soil Sci.* 163(11): 859-871.
- Seoánzes, C., A.J. Chacón, A. Gutiérrez e I. Angulo. 1999. Contaminación de suelos: Estudios, tratamiento y gestión. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Vázquez A., A., L.J. Cajuste, C. Siebe G., G. Alcántar G. y M. de L. de la Isla de B. 2001. Cadmio, níquel y plomo en aguas residuales, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia* 35: 267-271.
- Vergara, A. 1999. Desechos tóxicos en Chile. *Revista Electrónica de Ciencia Abierta*. Julio. Universidad Católica de Chile. Chile.
- Weeb, M. 1970. The mechanism of acquired resistance to  $\text{Co}^{+2}$  and  $\text{Ni}^{+2}$  in gram positive and gram negative bacteria. *Biochemistry Biophysic. Acta* 222: 400-446.

# PRESIÓN OSMÓTICA DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA Y LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS DE MELÓN

## Osmotic Pressure of the Nutrient Solution and the Production of Muskmelon Seedlings

Pablo Preciado-Rangel<sup>1†</sup>, Gustavo A. Baca-Castillo<sup>1§</sup>, Juan L. Tirado-Torres<sup>1</sup>,  
Josué Kohashi-Shibata<sup>1</sup>, Leonardo Tijerina-Chávez<sup>1</sup> y Ángel Martínez-Garza<sup>2</sup>

### RESUMEN

La presión osmótica de la solución nutritiva afecta la absorción de agua y nutrimentos y, por consiguiente, el crecimiento y la nutrición de las plántulas durante su desarrollo en contenedores. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de diferentes presiones osmóticas y porcentajes en la concentración de una variante de la solución nutritiva de Steiner, y tres tratamientos adicionales (entre ellos se incluyó uno con fertilización al suelo) sobre el crecimiento y la absorción nutrimental en plántulas de dos híbridos de melón (*Cucumis melo* L.): Crusier y Gold Eagle. A 33 días después de la siembra, se tomaron datos del crecimiento y se determinó la absorción nutrimental de las plántulas. Con la presión osmótica de 0.72 atm (0.073 MPa) en la solución nutritiva se lograron mayor crecimiento y mayor absorción nutrimental de las plántulas; no existieron diferencias significativas en el crecimiento y en la absorción nutrimental por efecto del aumento gradual en los porcentajes en la concentración de la solución nutritiva. Con la utilización de las soluciones nutritivas se obtuvieron plántulas con mayor crecimiento y absorción nutrimental que las obtenidas con la fertilización al suelo.

*Palabras clave:* Crecimiento de plántulas, análisis nutrimental, *Cucumis melo* L.

### SUMMARY

The osmotic pressure of the nutrient solution affects the absorption of water and nutrients and, consequently, the growth and nutrition of the muskmelon seedling during its growth under greenhouse conditions. The objective of the present

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, <sup>2</sup> Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, México. <sup>†</sup> Autor responsable.

<sup>§</sup> bacag@colpos.colpos.mx

investigation was to evaluate the effect of several osmotic pressures and concentrations of Steiner's universal modified solution, plus three additional treatments (the fertilizer was directly applied in soil in one of them) on the growth and nutrient uptake in two hybrids seedlings of muskmelon (*Cucumis melo* L.): Crusier and Gold Eagle. Growth data were taken at 33 days after sowing and the uptake of nutrients was determined. The best growth and the highest nutrient uptake of the muskmelon seedlings were obtained with 0.72 atm (0.073 MPa) osmotic pressure of the nutrient solution. No significant effects in the growth and the nutrient uptake were obtained for any treatment with increasing concentrations of the nutrient solution. Seedlings growing with nutrient solutions presented higher growth as well as greater nutrient uptake compared to soil fertilized seedlings.

*Index words:* Growth of seedlings, nutrient concentration, *Cucumis melo* L.

### INTRODUCCIÓN

La producción de plántulas vigorosas y bien desarrolladas en el invernadero es un requisito para el trasplante, ya que algunas condiciones ambientales en el campo, como el viento, el agua y la temperatura, provocan estrés, lo cual reduce la sobrevivencia al trasplante (Dufault, 1986). Uno de los factores que afectan el desarrollo vegetativo, la calidad y el crecimiento de las plántulas antes de ser trasplantadas al campo y después del trasplante es la nutrición de la misma (Weston y Zandstra, 1989; Liptay *et al.*, 1992). La fertilización en esta etapa vegetativa contribuye en gran medida a la producción de plántulas vigorosas, con tallos leñosos y buen crecimiento radical, lo cual permite disminuir el estrés al ser trasplantadas en campo. El método más usual de fertilización en esta etapa fenológica es la aplicación de soluciones nutritivas en cada riego; sin embargo, el exceso de sales en la solución utilizada y, en ocasiones, la misma naturaleza salina del agua, incrementan la salinidad total y el pH del medio, inhibiendo el

crecimiento de la plántula (Dufault, 1987). Además, los cambios en la concentración de la solución nutritiva afectan el crecimiento de la planta (Nonami *et al.*, 1992). La concentración iónica total y consiguiente presión osmótica es una característica de gran importancia en la solución nutritiva, ya que una alta presión osmótica disminuye la energía libre del agua y, por lo tanto, restringe la absorción de agua y algunos nutrimentos (Asher y Edwards, 1983; Ehret y Ho, 1986; Al-Harbi, 1994; Marschner, 1995; Kafkafi y Bernstein, 1996), se requiere una mayor cantidad de energía para llevar a cabo este proceso fisiológico. Uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico es el crecimiento celular, se reduce la expansión celular y el área foliar (Núñez, 1991). Como resultado ocurre una disminución en el crecimiento de las plántulas. Esta disminución se debe en parte al aumento en el gasto de energía realizado por la planta, para adquirir el agua y realizar el aporte bioquímico para sobrevivir, se desvía energía que debería ser utilizada para los procesos asociados al crecimiento y rendimiento, incluyendo elongación celular, síntesis de metabolitos y componentes celulares (Tanji, 1990). Cuando dicho déficit es severo, la fotosíntesis y la transpiración son afectadas debido a la disminución de la turgencia, lo que origina el cierre estomático y el bloqueo a la difusión de  $\text{CO}_2$  hacia el mesófilo (Núñez, 1991; Kumar y Singh, 1994). En cambio, una baja presión osmótica, al contener un déficit en la cantidad de nutrimentos en la solución nutritiva, puede inducir deficiencias nutrimentales (Steiner, 1973, 1980; Ehret y Ho, 1986). Por otro lado, Armenta (1998) observó un mayor vigor y una mayor concentración nutrimental en plántulas de tomate al incrementar de forma gradual la concentración en la solución nutritiva con la cual se irrigaban los semilleros. En México, la Comarca Lagunera es una importante región productora de melón, donde se cultiva predominantemente el híbrido del melón Crusier, de alto rendimiento, precoz y con fruto de color excelente; se está tratando de promover el híbrido del melón Gold Eagle, debido a su alta tolerancia a enfermedades en particular a la cenicilla (*Erysiphe polygoni*); la duración de su ciclo

vegetativo es intermedia (Harris Moran Seed Co., s/f). Debido a lo anteriormente señalado, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de tres presiones osmóticas de una variante de la solución nutritiva universal de Steiner y el aumento gradual de la concentración de la solución nutritiva sobre el crecimiento y los requerimientos nutrimentales de plántulas en dos híbridos de melón.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó entre octubre y noviembre de 1998, con una duración de 33 días, en un invernadero ubicado en Montecillo, estado de México, con temperaturas promedio de 38/15 °C (día/noche). Semillas de los híbridos de melón (*Cucumis melo* L.) Crusier y Gold Eagle se sembraron en contenedores de polietileno de forma cónica con un volumen individual de 50 cm<sup>3</sup>; se utilizó como sustrato un suelo agrícola de textura migajón arcillo arenoso esterilizado en un autoclave, el cual de acuerdo con la clasificación FAO es Typic Ustifluent (Soil Survey Staff, 1994); los análisis físicos y químicos se muestran en el Cuadro 1.

Los tratamientos se diseñaron a partir de modificaciones de la solución nutritiva universal de Steiner (Steiner, 1984) que consistieron en incrementar la concentración de  $\text{NO}_3^-$  con relación al total de aniones y la concentración de  $\text{K}^+$  con relación al total de cationes (13.28 me L<sup>-1</sup> de  $\text{NO}_3^-$ , 0.71 me L<sup>-1</sup> de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , 2.49 me L<sup>-1</sup> de  $\text{SO}_4^{2-}$ , 8.06 me L<sup>-1</sup> de  $\text{K}^+$ , 3.775 me L<sup>-1</sup> de  $\text{Ca}^{2+}$  y 1.675 me L<sup>-1</sup> de  $\text{Mg}^{2+}$ , cuando la presión osmótica es de 0.073 MPa); los cambios en la solución nutritiva indicados se realizaron de acuerdo con la metodología indicada por Steiner (Steiner, 1984). Se evaluaron tres presiones osmóticas (0.036, 0.073 y 0.109 MPa) y tres porcentajes iniciales de dilución (25-50-100, 35-70-100 y 45-90-100). Los tratamientos consistieron en nueve soluciones nutritivas (Cuadro 2) resultantes de la combinación de las presiones osmóticas y los porcentajes de dilución, más tres tratamientos testigo adicionales: Tratamientos 10, 11 y 12; el 10 corresponde por su presión osmótica al centroide de la parte factorial,

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

Da <sup>†</sup>	pH	CE	MO	NT	P	K	Ca	Mg	CIC
g cm <sup>-3</sup>	1.2	dS m <sup>-1</sup>	---	% ---	mg kg <sup>-1</sup>	---	cmol kg <sup>-1</sup>	---	---
1.31	8.2	0.63	1.78	0.0821	12.54	2.22	24	4.66	33.46

<sup>†</sup> Da = densidad aparente. CE = conductividad eléctrica. MO = materia orgánica. NT = nitrógeno total. CIC = capacidad de intercambio catiónico.

**Cuadro 2. Descripción de tratamientos, presión osmótica (PO) y porcentajes de dilución de la solución nutritiva en función del tiempo.**

Tratamiento	PO	Días de aplicación <sup>†</sup>		
		10	10	10
	MPa			
1	0.036	25% de 0.036	50% de 0.036	100% de 0.036
2	0.036	35% de 0.036	70% de 0.036	100% de 0.036
3	0.036	45% de 0.036	90% de 0.036	100% de 0.036
4	0.073	25% de 0.073	50% de 0.073	100% de 0.07
5	0.073	35% de 0.073	70% de 0.073	100% de 0.073
6	0.073	45% de 0.073	90% de 0.073	100% de 0.073
7	0.109	25% de 0.109	50% de 0.109	100% de 0.109
8	0.109	35% de 0.109	70% de 0.109	100% de 0.109
9	0.109	45% de 0.109	90% de 0.109	100% de 0.109
10	0.073	100% de 0.073	100% de 0.073	100% de 0.073
11 <sup>††</sup>	0.073	100% de 0.073	100% de 0.073	100% de 0.073
12		Fertilización al suelo y utilización de agua destilada		

<sup>†</sup> Cada 10 días se incrementó el porcentaje de la concentración de la solución nutritiva. <sup>††</sup> La composición química de este tratamiento es la de la solución universal de Steiner.

el 11 corresponde a la solución nutritiva de Steiner y el 12 corresponde a la dosis de fertilización utilizada por los productores de melón en la Comarca Lagunera, la cual consiste en aplicar 2 g de urea y 6 g de superfosfato triple a un volumen de suelo de 1570 cm<sup>3</sup>, siempre y cuando dicho suelo no sea demasiado arcilloso (CENAMAR, s/f). La estructura de los tratamientos corresponde a un factorial completo 3<sup>2</sup>, más los tres tratamientos adicionales con 12 repeticiones. El diseño experimental fue completamente al azar. El primer riego a las plántulas en sus contenedores individuales, después de la siembra, se dio con agua destilada hasta el escurrimiento de una a tres gotas; los dos días siguientes se procedió en la misma forma. Posteriormente; se utilizó solución nutritiva cuya concentración se incrementó cada 10 días, excepto para los Tratamientos 10 y 11, en los cuales se aplicó 100% de la concentración; el Tratamiento 12 se regó únicamente con agua destilada (Cuadro 2).

Las soluciones nutritivas se prepararon siguiendo los lineamientos indicados por Steiner (Steiner, 1984), con sales inorgánicas y agua destilada. En todas las soluciones nutritivas, las concentraciones de los micronutrientes fueron: 8, 1.6, 0.023, 0.011 y 0.865 mg L<sup>-1</sup> de Fe, Mn, Zn, Cu y B, respectivamente. El Fe se proporcionó como Fe-EDTA (Steiner y Van Winden, 1970).

Las plántulas en sus contenedores individuales se regaron cada día a las 7:00 h AM y a la 1:30 h PM (horario natural); estos riegos se dieron hasta el escurrimiento de una a tres gotas por contenedor; dicho horario se estableció con base en los resultados

de Baca *et al.* (1991). El consumo relativo de solución nutritiva por plántula se determinó cada 10 días, en promedio, para los 12 tratamientos (con una variación menor que 10%) y fue de tres a 12 días: 80 mL; de 13 a 22 días: 160 mL; y de 23 a 32 días: 250 mL (490 mL en total por plántula). Se determinó la capacidad de retención de agua del suelo: a capacidad de campo (0.01 MPa) fue de 23.98% (en peso) y al punto de marchitez permanente (1.52 MPa) de 13.01%, lo cual equivale a una capacidad de retención total de agua por contenedor de 7.1 g. De 23 a 32 días, se aplicaron en total 250 mL de solución nutritiva por contenedor (12.5 g por riego, por contenedor en promedio), o sea que, en esta etapa, los riegos rebasaron la capacidad de campo del suelo (pero no la capacidad de saturación) y con fluctuaciones rápidas entre los dos riegos diarios, aproximadamente hasta el punto de marchitez permanente. La duración del experimento fue de 33 días después de la siembra, tiempo recomendado por Vavrina (1998). Las mediciones para evaluar la respuesta a los factores en estudio se realizaron a 33 días después de la siembra en seis plántulas y consistieron en: diámetro de tallo (DT), el cual se midió inmediatamente debajo de los cotiledones con un vernier, la altura de plántula (AP) con un escalímetro, el número de hojas verdaderas (NH) y el área foliar (AF) con el integrador de área foliar (LICOR, LI-3000), el contenido de clorofila con el SPAD-502, los pesos secos del vástago (PSV) y de la raíz (PSR), en una estufa con circulación forzada de aire a 70 °C, hasta peso constante. Se calculó la relación vástago/raíz (V/R), el por ciento del peso seco de la raíz con relación al peso fresco de la misma

(% PSR) y, en la misma forma, el contenido de agua en la raíz (CAR). Se molió el material seco y se realizó el análisis químico para determinar la concentración nutrimental del vástago. El N total se determinó por el método microkjeldahl (Brearen y Mulvaney, 1982). El resto de los nutrimentos por el método de digestión húmeda convencional (Alcántar y Sandoval, 1999) y la cuantificación de éstos se realizó en un espectrofotómetro de inducción con plasma acoplada (ICP-AES), marca Varian. El análisis de varianza de las variables de respuesta se hizo mediante la evaluación de los factores principales del diseño factorial: 1) presiones osmóticas y 2) el porcentaje de dilución en la concentración de la solución nutritiva. Se determinó también la interacción entre los diferentes factores y se comparó el efecto de cada uno de los tratamientos adicionales con la media de los tratamientos correspondientes al diseño factorial.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variables de Crecimiento

Al comparar las variables de crecimiento de ambos híbridos mediante el análisis de varianza, se encontró que, excepto en la relación vástago/raíz y en el contenido de clorofila, el híbrido Gold Eagle (HGE) fue significativamente superior al Crusier (HC). El mayor contenido de clorofila del HC, probablemente fue debido a que en la solución nutritiva se utilizó una mayor concentración de N (14 me L<sup>-1</sup>, cuando la presión osmótica fue de 0.073 MPa) que la requerida por este híbrido en particular que es de 12 me L<sup>-1</sup> (Preciado *et al.*, 2002); dichos resultados destacaron el mayor vigor del HGE (Cuadro 3).

El análisis de varianza de las variables de crecimiento de cada uno de los híbridos por separado (Cuadro 4) señala que, en el HGE, al aumentar la presión osmótica de la solución nutritiva, el contenido de agua en la raíz (CAR) disminuyó, resultado que coincide con lo encontrado por Schildwacht (1989),

mientras que el por ciento del peso seco de la raíz aumentó, ya que una presión osmótica relativamente alta provoca un grado ligero de estrés hídrico en la plántula, el cual también se manifiesta en que se inhibe probablemente el crecimiento del vástago, mientras que la producción de carbohidratos se canaliza preferentemente hacia la raíz (Schildwacht, 1989). Los resultados anteriores coinciden con lo encontrado por Lauchli y Epstein (1990), Izzo *et al.* (1991), Cremer *et al.* (1991), Poljakoff-Mayber y Lerner (1994), Ho y Adams (1995), Nonami *et al.* (1995) y Udagawa (1995), quienes indicaron que, al existir una concentración relativamente alta de sales en la solución en la cual se encuentra la raíz, el crecimiento de la parte aérea se reduce de manera significativa, ya que una alta presión osmótica requiere que la planta realice un ajuste osmótico para mantener un gradiente favorable para la absorción de agua y nutrimentos, dando como resultado una disminución en el crecimiento del vástago de la planta.

En el HC, el mayor CAR se obtuvo con la presión osmótica de 0.073 MPa (Cuadro 4), mientras que con 0.109 MPa dicho contenido disminuyó por la razón anteriormente señalada; con la presión osmótica de 0.036 MPa en la solución nutritiva, el CAR también disminuyó. Lo anterior probablemente fue debido al menor crecimiento de la raíz, con la consecuente disminución en la absorción de agua y de nutrimentos, reflejándose también en el limitado crecimiento vegetativo de la parte aérea.

Los resultados anteriores coinciden con los de Steiner (1973), Ehret y Ho (1986), Smith *et al.* (1992) y Udagawa (1995), quienes indicaron que una baja presión osmótica en la solución nutritiva, al contener una menor cantidad de nutrimentos en la solución nutritiva de lo que la planta necesita, puede inducir deficiencias nutrimentales y, por ende, un menor crecimiento de la raíz y del vástago. Cabe destacar que los resultados encontrados en el CAR en función de la presión osmótica de la solución nutritiva,

**Cuadro 3.** Diferencias entre híbridos en la altura de plántula (AP), diámetro de tallo (DT), número de hojas (NH), peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR), relación vástago/raíz (V/R), área foliar (AF) y el contenido de clorofila (SPAD).

Híbrido	AP	DT	NH	PSV	PSR	V/R	AF	SPAD
	cm	mm	#	----- mg	-----		cm <sup>2</sup>	
Crusier	5.30 b <sup>†</sup>	3.88 b	4.48 b	245.19 b	96.64 b	2.74 a	39.69 b	48.26 a
Gold Eagle	9.10 a	4.44 a	4.72 a	324.63 a	117.03 a	2.90 a	48.30 a	45.59 b

<sup>†</sup> Medias con la misma letra dentro de cada columna no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey (P ≤ 0.05).

**Cuadro 4.** Efecto de la presión osmótica (PO), porcentaje de dilución (DIL), su interacción y el cultivar sobre la altura de plántula (AP), diámetro de tallo (DT), número de hojas (NH), peso seco de vástago (PSV), porcentaje del peso seco de raíz (% PSR), contenido de agua en la raíz (CAR), relación vástago/raíz (V/R), área foliar (AF) y el contenido de clorofila (SPAD) en plántulas de melón.

Efecto <sup>†</sup>	AP	DT	NH	PSV	PSR	CAR	V/R	AF	SPAD	
	cm	mm	#	mg	%			cm <sup>2</sup>		
<b>Crusier</b>										
PO	0.036	4.06 a <sup>†</sup>	3.78 a	4.11 a	213.89 a	8.37 a	91.62 b	1.93 b	33.43 b	44.66 c
	0.073	6.47 a	4.07 a	5.00 a	265.56 a	5.45 b	94.54 a	3.34 a	48.46 a	47.90 b
	0.109	5.36 a	3.77 a	4.33 a	256.11 a	8.20 a	91.79 b	2.95 a	37.16 b	52.21 a
DIL	25	4.74 a	3.80 a	4.27 a	230.56 a	6.71 a	93.28 a	2.73 a	36.07 a	48.91 a
	35	5.20 a	3.88 a	4.66 a	240.56 a	6.58 a	93.41 a	2.76 a	39.11 a	48.56 a
	45	5.96 a	3.95 a	4.50 a	264.44 a	8.73 a	91.26 a	2.72 a	43.90 a	47.30 a
PO x DIL	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Gold Eagle</b>										
PO	0.036	7.82 a	4.55 a	4.33 a	282.78 b	6.66 c	93.33 a	2.81 b	42.57 b	41.78 b
	0.073	9.63 a	4.56 a	5.11 a	348.89 a	8.98 b	91.01 b	3.58 a	55.23 a	44.90 b
	0.109	9.84 a	4.21 a	4.72 a	342.22 ab	14.02 a	85.97 c	2.32 b	47.11 ab	50.10 a
DIL	25	8.94 a	4.37 a	4.72 a	317.22 a	9.16 a	90.83 a	2.82 a	49.60 a	42.78 b
	35	8.82 a	4.42 a	4.77 a	312.78 a	9.47 a	90.52 a	2.94 a	45.15 a	47.73 a
	45	9.53 a	4.53 a	4.66 a	343.89 a	11.03 a	88.96 a	2.94 a	50.16 a	46.26 ab
PO x DIL	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>†</sup>Las presiones osmóticas están expresadas en MPa y las diluciones en porcentaje. <sup>†</sup>Medias con la misma letra dentro de cada columna y cada factor, no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ns = no significativo.

indicaron una máxima absorción de agua por la raíz con la presión osmótica de 0.073 MPa.

Por otra parte, las diferencias mostradas entre ambos híbridos en las variables de crecimiento (altura de plántula y por ciento del peso seco de la raíz), causadas por la presión osmótica de la solución nutritiva, se debieron a la variabilidad genética que presentaron ambos híbridos en la tolerancia a las sales (Nelson y Paris, 1984; Grattan y Grieve, 1992; Shannon, 1997). Esta característica es en particular importante cuando el agua de riego presenta cierto grado de salinidad.

En el resto de las variables de crecimiento analizadas de ambos híbridos (Cuadro 4), a pesar de que corresponden a diferentes valores, se observa una respuesta similar a la presión osmótica de la solución nutritiva, ya que con 0.073 MPa se lograron los mayores valores en: diámetro de tallo, número de hojas, peso seco del vástago y relación vástago/raíz y área foliar.

Con los incrementos graduales en la concentración de la solución nutritiva estudiados no existieron diferencias significativas en las variables de crecimiento evaluadas, con excepción del contenido de clorofila en el HGE (Cuadro 4). De lo anterior, se desprende que puede utilizarse cualquier incremento gradual de la concentración en la solución nutritiva; sin embargo, con el incremento gradual inicial de

45-90-100% en la concentración de la solución nutritiva, se lograron los mayores valores en ambos cultivares en la altura de plántula, diámetro de tallo, peso seco del vástago, por ciento del peso seco de la raíz y el área foliar (Cuadro 4); de lo anterior se desprende que, probablemente, los incrementos graduales iniciales debieron de ser mayores para causar efectos significativos en las anteriores variables. Por otra parte, al analizar el conjunto de tratamientos en ambos híbridos, destacó el Tratamiento 6: presión osmótica de 0.073 MPa e incremento gradual inicial de 45-90-100% en la concentración de la solución nutritiva, por lograr los mayores valores en altura de plántula, diámetro de tallo, peso seco del vástago y área foliar.

Con relación a los tratamientos adicionales, al comparar la media de cada una de las variables de crecimiento de los tratamientos que integraron el diseño factorial contra las correspondientes de cada uno de los testigos (Cuadro 5), se observa que, en el HGE, el CAR de los Tratamientos 10, 11 y 12 fue significativamente menor con relación a la media del factorial y lo contrario ocurrió con el por ciento del peso seco de la raíz. El Tratamiento 10 limitó la absorción de agua con respecto al grupo de tratamientos del factorial, ya que, aunque ambos tienen la misma composición química en la solución nutritiva, la diferencia radica en que las soluciones

**Cuadro 5. Comparación de medias entre la parte factorial y los testigos de ambos cultivares sobre la altura de plántula (AP), diámetro de tallo (DT), número de hojas (NH), peso seco de vástago (PSV), porcentaje del peso seco de raíz (% PSR), contenido de agua en la raíz (CAR), relación vástago/raíz (V/R), área foliar (AF) y el contenido de clorofila (SPAD) en plántulas de melón.**

Tratamiento	AP cm	DT mm	NH #	PSV mg	PSR %	CAR	AF cm <sup>2</sup>	SPAD	V/R
<b>Crusier</b>									
Factorial	5.19 a <sup>†</sup>	3.87 a	4.47 a	245.18 a	7.34 a	92.65 a	39.69 a	48.26 b	2.73 a
10 <sup>†</sup>	6.43 a	3.63 a	5.16 a	265.00 a	10.42 a	89.57 a	43.00 a	53.55 a	2.84 a
Factorial	5.19 a	3.87 a	4.47 a	245.18 a	7.34 a	92.65 a	39.69 a	48.26 a	2.73 a
11 <sup>§</sup>	5.70 a	3.83 a	4.16 a	323.33 a	11.11 a	88.88 a	48.73 a	47.30 a	3.28 a
Factorial	5.19 a	3.87 a	4.47 a	245.18 a	7.34 b	92.65 a	39.69 a	48.26 a	2.73 a
12 <sup>†</sup>	4.13 a	3.20 b	6.50 a	239.83 a	16.28 a	83.72 b	48.96 a	43.45 b	1.97 b
<b>Gold Eagle</b>									
Factorial	9.09 a	4.44 a	4.72 a	324.62 a	9.88 b	90.10 a	48.30 a	45.59 a	2.90 a
10	10.33 a	4.06 a	5.16 a	316.67 a	18.03 a	81.96 b	39.80 a	47.55 a	2.66 a
Factorial	9.09 a	4.44 a	4.72 a	324.62 b	9.88 b	90.10 a	48.30 a	45.59 a	2.90 a
11	8.66 a	3.80 b	4.83 a	400.00 a	15.68 a	84.31 b	52.38 a	46.55 a	3.35 a
Factorial	9.09 a	4.44 a	4.72 a	324.62 a	9.88 b	90.10 a	48.30 a	45.59 a	2.90 a
12	10.86 a	3.70 b	6.00 a	358.33 a	15.01 a	84.98 b	53.03 a	42.35 a	3.03 a

<sup>†</sup> Medias con la misma letra dentro de cada columna y cada factor no presentan diferencias significativas según la prueba DMS ( $P \leq 0.05$ ). <sup>‡</sup> Corresponde por su presión osmótica al centroide del factorial, aplicado sin dilución. <sup>§</sup> Corresponde a la solución nutritiva de Steiner, aplicada sin dilución. <sup>†</sup> Fertilización al suelo.

nutritivas integrantes del factorial se aplicaron diluidas y la del Tratamiento 10 sin diluir (Cuadro 2).

Con el Tratamiento 11 ocurrió un proceso similar, a pesar de la diferencia en la composición química de las soluciones integrantes del factorial y la de dicho tratamiento. En el Tratamiento 12, el cual consistió en la fertilización al suelo previa a la siembra (la que practican los productores en la región) con la consecuente elevación de la presión osmótica de la solución del suelo, también el resultado se debe a la diferencia en la concentración de las soluciones aplicadas. En el HC, sólo en el caso del Tratamiento 12 se determinó una disminución en el CAR, con relación a la media del factorial (Cuadro 5); la explicación señalada en el caso del HGE se aplica aquí también. Los resultados del CAR y el por ciento del peso seco de la misma en ambos híbridos permiten destacar que el HC fue menos afectado cuando las soluciones nutritivas se aplicaron sin diluir con relación al HGE. Los anteriores resultados concuerdan con lo señalado por Nerson y Paris (1984), Grattan y Grieve (1992) y Shannon (1997).

El mayor por ciento del peso seco de la raíz en ambos híbridos para el Tratamiento 12 probablemente fue debido a la gran cantidad de fertilizante fosfatado que se utilizó en este tratamiento, ya que de acuerdo con Caradus *et al.* (1995) y Samuel *et al.* (1993), el fósforo estimula el crecimiento de la raíz. El mayor contenido de clorofila en los tratamientos que integran la parte factorial podría deberse a que en estos

tratamientos se utilizó mayor cantidad de N, que para el Tratamiento 12.

### Análisis Nutricional

El análisis de varianza de la concentración y de la extracción nutricional permitió destacar que el HGE con respecto al HC logró la mayor concentración y extracción de todos los nutrientes analizados, con excepción de la concentración del N (Cuadro 6), la cual fue mayor en la solución nutritiva con respecto a la que requiere este híbrido en particular (Preciado *et al.*, 2002); en consecuencia, las plántulas del HC presentaron una concentración alta de N (consumo de lujo), la cual probablemente, a su vez, ocasionó una disminución del peso seco del vástago (Cuadro 3) y una disminución en la extracción de N (Cuadro 6).

El análisis de varianza de cada uno de los híbridos por separado (Cuadro 7) indicó que con las presiones osmóticas de 0.073 y de 0.109 MPa en la solución nutritiva, se lograron valores mayores en ambos híbridos en la concentración y extracción de P, en la concentración y extracción de N y en la extracción de Ca y Mg en el HGE y en la concentración y extracción de Ca en el HC. Estos resultados coinciden con el comportamiento de las variables de crecimiento producido con la presión osmótica de 0.073 MPa en ambos cultivares (Cuadro 4).

Ambos cultivares presentaron distintas concentraciones y extracciones de nutrientes

**Cuadro 6. Prueba de medias en ambos híbridos sobre la concentración y extracción nutrimental.**

Híbrido	Concentración					Extracción				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
	g kg <sup>-1</sup>					mg planta <sup>-1</sup>				
Crusier	47.0 a <sup>†</sup>	3.08 b	37.50 b	41.71 b	10.89 b	5.86 b	0.35 b	4.83 b	5.23 b	1.34 b
Gold Eagle	43.5 b	3.35 a	49.22 a	46.22 a	12.22 a	7.26 a	0.48 a	8.83 a	7.57 a	2.01 a

<sup>†</sup> Medias con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales, según la prueba de Tukey (P ≤ 0.05).

(Cuadro 6); al respecto, Preciado *et al.* (2002) demostraron que dichos cultivares tienen diferentes requerimientos nutrimentales de N y de K en la etapa de plántulas. El HC requirió 12 me NO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup> cuando la presión osmótica fue de 0.073 MPa, dado que la concentración que se aplicó en las soluciones nutritivas fue de 14 me NO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>, no hubo diferencia significativa por efecto de la presión osmótica. El HGE requiere 14 me NO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup> cuando la presión osmótica es de 0.073 MPa, misma concentración que se aplicó, por lo que la planta no cubrió su necesidad con la solución nutritiva con una presión osmótica de 0.036 MPa.

Las concentraciones de Ca y Mg en el HGE aumentaron significativamente, conforme aumentó la presión osmótica de la solución nutritiva (Cuadro 7). Lo mismo ocurrió con el por ciento del peso seco de la raíz (Cuadro 4). Esta última variable determina el tamaño de la raíz, el cual, a su vez, afecta el acceso radical del Ca y Mg por contacto directo con el suelo

y el posterior intercambio iónico, el cual contiene una proporción relativamente alta de dichos nutrimentos (Cuadro 1). Ambos híbridos presentaron significativamente la menor concentración y extracción de fósforo con la menor presión osmótica de la solución nutritiva (Cuadro 7), lo que coincide con lo señalado por Steiner (1973), Sonneveld y Voogt (1990), Udagawa (1995), y Hu y Schmidhalter (1997), quienes indicaron que, con una menor presión osmótica en la solución nutritiva, la absorción de P disminuye; la menor concentración y extracción de P cuando la presión osmótica fue baja: 0.036 MPa, se explican en función del crecimiento menor de la raíz, también con dicha presión osmótica (Cuadro 4), lo cual, a su vez, causó la disminución del acceso a la raíz del P por difusión (Kafkafi *et al.*, 1982).

Al igual que con las variables de crecimiento (Cuadro 4), con los incrementos graduales en la concentración de la solución nutritiva no se presentaron diferencias significativas en la

**Cuadro 7. Efecto de la presión osmótica (PO) porcentaje de dilución (DIL), su interacción y el cultivar sobre la concentración y extracción nutrimental en plántulas de melón.**

Efecto <sup>†</sup>	Concentración					Extracción					
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	
	g kg <sup>-1</sup>					mg planta <sup>-1</sup>					
	<b>Crusier</b>										
PO	0.036	46.7 a <sup>†</sup>	2.21 b	37.60 a	34.27 b	9.86 a	4.97 a	0.23 b	4.00 a	3.74 b	1.05 b
	0.073	45.7 a	2.97 a	41.12 a	41.83 ab	11.0 a	6.10 a	0.39 a	5.41 a	5.61 ab	1.46 ab
	0.109	51.0 a	3.37 a	39.26 a	50.25 a	11.96 a	6.51 a	0.43 a	5.08 a	6.35 a	1.51 a
DIL	25	45.4 a	3.06 a	40.45 a	41.51 a	11.38 a	5.23 a	0.35 a	4.64 a	4.89 a	1.31 a
	35	50.9 a	2.66 a	36.23 a	41.34 a	10.51 a	6.13 a	0.32 a	4.40 a	5.12 a	1.29 a
	45	47.1 a	2.83 a	41.30 a	43.51 a	10.96 a	6.22 a	0.37 a	5.46 a	5.70 a	1.43 a
PO x DIL		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	<b>Gold Eagle</b>										
PO	0.036	41.7 b	2.28 b	52.85 a	35.70 c	11.12 c	5.90 b	0.32 b	7.57 a	5.02 b	1.57 b
	0.073	45.2 ab	3.11 a	57.78 a	46.98 b	12.45 b	7.67 a	0.52 a	9.82 a	7.98 a	2.10 a
	0.109	48.2 a	3.49 a	53.20 a	57.32 a	13.93 a	8.21 a	0.60 a	9.10 a	9.77 a	2.37 a
DIL	25	44.9 a	3.12 a	54.33 a	46.32 a	12.35 a	6.91 a	0.49 a	8.53 a	7.30 a	1.92 a
	35	45.8 a	2.91 a	58.26 a	47.25 a	12.94 a	7.14 a	0.45 a	9.08 a	7.36 a	2.01 a
	45	44.5 a	2.85 a	51.24 a	46.43 a	12.21 a	7.22 a	0.50 a	8.89 a	8.10 a	2.11 a
PO x DIL		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>†</sup> Las presiones osmóticas están expresadas en MPa y las diluciones en porcentaje. <sup>†</sup> Medias con la misma letra dentro de cada columna y cada factor no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey (P ≤ 0.05). ns = no significativo. \* = significativo (P ≤ 5%).

concentración y extracción de los nutrimentos en ambos híbridos, por lo que se podría utilizar cualquier incremento gradual en la concentración de la solución nutritiva; sin embargo, las mayores extracciones en ambos híbridos se lograron con el incremento gradual inicial de 45-90-100% en la concentración de la solución nutritiva (Cuadro 7), en correspondencia con el mayor peso seco del vástago logrado con este mismo incremento (Cuadro 4).

Es conveniente aclarar que la respuesta de las plántulas a los nutrimentos fue en forma diferencial y acorde con las fuentes de variación del diseño factorial, lo que permite descartar el posible efecto de falta de oxígeno en la raíz, lo que, a su vez, hubiese provocado una disminución de absorción activa de los nutrimentos.

Con relación a los tratamientos adicionales, en el Tratamiento 10 existió diferencia significativa en la concentración y extracción del K en el HGE (Cuadro 8), ya que, probablemente, con la aplicación de las soluciones nutritivas diluidas, como es el caso de los tratamientos integrantes del diseño factorial, normalmente favorecen la absorción de Ca, pero restringen la absorción de K (Steiner, 1973, 1980), a menos que la concentración de K en dichas soluciones sea mayor que la requerida por el cultivo y, entonces, predomina la absorción del K sobre la de Ca. En este caso, el HGE requiere  $7 \text{ me K}^+ \text{ L}^{-1}$  (cuando la presión osmótica en la solución nutritiva es de 0.073 MPa) y

con las soluciones se aplicaron  $8.5 \text{ me K}^+ \text{ L}^{-1}$ , de acuerdo con lo indicado por Preciado *et al.* (2002).

La concentración y la extracción de K y la concentración de Mg en el Tratamiento 11 fueron menores significativamente con respecto a la media del factorial en el HGE (Cuadro 8); lo anterior confirma lo encontrado en el Tratamiento 10 para el K. En el caso de la concentración de Mg, la explicación es la indicada anteriormente (acceso nutrimental por contacto); en el caso de la concentración y extracción del P, las diferencias significativas encontradas en el Tratamiento 11 para el HGE se debieron al efecto de difusión anteriormente indicado.

Finalmente, el promedio de la concentración del P en el Tratamiento 12 fue mayor que el promedio de los tratamientos integrantes del factorial en el HC (Cuadro 8); por el contrario, en el HGE, los tratamientos integrantes del factorial lograron los mayores valores en la concentración y extracción del N y K y de la concentración de Ca, mientras que la concentración y la extracción del P fueron mayores en el Tratamiento 12 al compararlos con la media del factorial. Los valores menores en las concentraciones y extracciones de N y K, y los mayores de P, se debieron a que los productores de melón en la Comarca Lagunera sólo utilizan una baja cantidad de N y una alta cantidad de P, en comparación con las soluciones nutritivas completas utilizadas en el

**Cuadro 8. Comparación de la media del factorial contra los testigos en los híbridos Crusier y Gold Eagle sobre la concentración y extracción nutrimental.**

Tratamiento	Concentración					Extracción				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
	g kg <sup>-1</sup>					mg planta <sup>-1</sup>				
<b>Crusier</b>										
Factorial	47.8 a <sup>†</sup>	2.85 a	39.32 a	42.12 a	10.95 a	5.86 a	0.35 a	5.05 a	5.23 a	1.34 a
10 <sup>†</sup>	50.7 a	3.61 a	38.20 a	49.80 a	12.33 a	6.69 a	0.48 a	5.06 a	6.58 a	1.63 a
Factorial	47.8 a	2.85 a	39.32 a	42.12 a	10.95 a	5.86 a	0.35 a	5.05 a	5.23 a	1.34 a
11 <sup>§</sup>	39.1 a	2.77 a	28.00 a	38.93 a	9.36 a	6.49 a	0.44 a	4.42 a	6.20 a	1.49 a
Factorial	47.8 a	2.85 b	39.32 a	42.12 a	10.95 a	5.86 a	0.35 a	5.05 a	5.23 a	1.34 a
12 <sup>¶</sup>	44.4 a	4.89 a	29.86 a	32.70 a	10.46 a	5.55 a	0.63 a	3.78 a	4.09 a	1.31 a
<b>Gold Eagle</b>										
Factorial	44.9 a	2.96 a	54.61 a	46.66 a	12.50 a	7.26 a	0.48 a	8.83 a	7.59 a	2.01 a
10	47.3 a	3.51 a	39.50 b	52.83 a	12.16 a	7.42 a	0.57 a	6.21 b	8.37 a	1.88 a
Factorial	44.9 a	2.96 b	54.61 a	46.66 a	12.50 a	7.26 a	0.48 b	8.83 a	7.59 a	2.01 a
11	43.9 a	3.91 a	29.63 b	43.76 a	10.73 b	8.81 a	0.78 a	5.91 b	8.72 a	2.14 a
Factorial	44.9 a	2.96 b	54.61 a	46.66 a	12.50 a	7.26 a	0.48 b	8.83 a	7.59 a	2.01 a
12	25.1 b	6.19 a	37.76 b	38.03 b	11.30 a	4.55 b	1.11 a	6.78 b	6.85 a	2.02 a

<sup>†</sup> Medias con la misma letra dentro de cada columna y cada factor no presentan diferencias significativas según la prueba DMS ( $P \leq 0.05$ ). <sup>‡</sup> Corresponde por su presión osmótica al centroide del factorial, aplicado sin dilución. <sup>§</sup> Corresponde a la solución nutritiva de Steiner, aplicado sin dilución. <sup>¶</sup> Fertilización al suelo.

presente trabajo; cabe señalar que a la mayor concentración y extracción de P (Cuadro 8) correspondió un mayor desarrollo de la raíz, sin embargo, el peso seco del vástago no aumentó (Cuadro 5).

### CONCLUSIONES

- El híbrido Gold Eagle presentó, con respecto al híbrido Crusier, mayores valores en cuanto a las variables de crecimiento, concentración y extracción nutrimental y fue menos tolerante a alta presión osmótica de la solución nutritiva.
- Con la presión osmótica de 0.073 MPa en la solución nutritiva se obtuvieron plántulas de ambos híbridos con el mayor crecimiento vegetativo y las mayores concentraciones y extracciones nutrimentales.
- Con los incrementos iniciales graduales en la concentración de la solución nutritiva, no se manifestaron diferencias significativas en el crecimiento, la concentración y la extracción nutrimental en ambos híbridos.
- Con el suministro de soluciones nutritivas, se obtuvieron plántulas con mayor crecimiento vegetativo y mayor concentración nutrimental, que las obtenidas con la fertilización al suelo que se aplica en la Comarca Lagunera.

### AGRADECIMIENTO

Se agradece el apoyo otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Proyecto CONACYT G009-B).

### 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.
- Al-Harbi, A.R. 1994. Effect of manipulating nutrient solution salinity on the growth of cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth in NFT. *Acta Hort.* 361: 267-273.
- Armenta B., A.D. 1998. Relaciones óptimas de aniones y cationes en la solución nutritiva en riego por goteo para la producción de tomate. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Asher, C.J. y D.G. Edwards. 1983. Modern solution culture techniques. pp. 94-119. *In: Pirson, A. y M.H. Zimmermann* (eds.). *Encyclopedia of Plant Physiology*. Vol 15-A. Springer Verlag, New York.
- Baca C., G.A., S. Alcalde B., R.J. Laird y A. Martínez G. 1991. Efecto de la solución nutritiva, el riego, el sustrato y la densidad de siembra en tres cultivos hortícolas en hidroponía al aire libre. II. Melón y jitomate. *Agrociencia* 2: 33-55.
- Brearen, L. y C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-634. *In: Page, A.L., R.H. Miller y D.R. Keeney* (eds.). *Methods of soils analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9. 2nd edition. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Caradus, J.R., A.D. Mackay, J. Dunlop y V.D. Bosch. 1995. Relationships between shoot and root characteristics of white clover cultivars differing in response to phosphorus. *J. Plant Nutr.* 18: 2707-2722.
- CENAMAR. Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego. s/f. Producción de melón por trasplante. Gómez Palacio, Durango, México.
- Cremer, G.R., E. Epstein y A. Läuchli. 1991. Effects of sodium, potassium and calcium on salt-stressed barley. II. Elemental analysis. *Physiol. Plantarum* 81: 197-202.
- Dufault, R.J. 1986. Influence of nutritional conditioning on muskmelon transplant quality and early yield. *J. Am. Soc. HortScience* 111: 698-703.
- Dufault, R.J. 1987. Use of slow-release nitrogen and phosphorous fertilizer in celery transplant production. *HortScience* 22: 1268-1270.
- Ehret, D.L. y C. Ho. 1986. Effects of osmotic potential in nutrient solution on diurnal growth of tomato fruit. *J. Exp. Bot.* 182: 1294-1302.
- Grattan, S.R. y C.M. Grieve. 1992. Mineral element acquisition and growth response of plant grown in saline environments. *Agriculture, Ecosyst. and Environ.* 38: 275-300.
- Harris Moran See Co. s/f. Reference Guide. Modesto, CA.
- Ho, L.C. y P. Adams. 1995. Nutrient uptake and distribution in relation to crops quality. *Acta Hort.* 396: 33-44.
- Hu, Y. y U. Schmidhalter. 1997. Interactive effects of salinity and macronutrient level on wheat. II. Composition. *J. Plant Nutr.* 20: 1169-1182.
- Izzo, R., F.N. Izzo y M.F. Quartacci. 1991. Growth and mineral absorption in maize seedling as affected by increasing NaCl concentration. *J. Plant Nutr.* 14: 687-699.
- Kafkafi, U. y N. Bernstein. 1996. Root growth under salinity stress. pp. 445-451. *In: Warsel, Y., A. Eshel y U. Kafkafi* (eds.). *Plant root, the hidden half*. 2nd edition. Marcel Dekker, New York.
- Kafkafi, U., N. Valoras y J. Letey. 1982. Chloride interaction with nitrate and phosphate nutrition: in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *J. Plant Nutr.* 5: 1369-1385.
- Kumar, A.D. y P. Singh. 1994. Influence of water stress on photosynthesis, transpiration, water use efficiency and yield on *Brassica juncea* L. *Field Crop Res.* 37: 95-101.
- Lauchli, A. y E. Epstein. 1990. Plant response to saline and sodic condition. *In: Tanji, K.K.* (ed.). *Agricultural salinity assessment and management*. Am. Soc. Civil Eng. Manuals Rep. Eng. Practice 71: 13-137.
- Liptay, A., S. Nicholls y P. Sikkema. 1992. Optimal mineral nutrition of tomato transplant in the greenhouse for maximum performance in the field. *Acta Hort.* 319: 489-491.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition. Academic Press. San Diego, CA.
- Nerson, H. y H.S. Paris. 1984. Effects of salinity on germination, seedling growth and yield of melons. *Irrig. Sci.* 5: 65-273.
- Nonami, H., K. Mohri, T. Fukuyama y Y. Hashimoto. 1992. Growth regulation of plant seedling by ion concentration management in hydroponic culture. *Acta Hort.* 319: 77-483.

- Nonami, H., K. Tanimoto, A. Tabuchi, T. Fukuyama T. y Y. Hashimoto. 1995. Salt stress under hydroponic conditions causes changes in wall extension during growth. *Acta Hort.* 396: 91-98.
- Núñez B., A. 1991. La fisiología del frijol bajo condiciones de sequía. *Rev. Fitotecnia Mexicana* 14: 269-275.
- Poljakoff-Mayber, A. y H.R. Lerner. 1994. Plants in saline environment. pp. 65-96. *In: M. Pessaraki (ed.). Plant and crop stress.* Marcel Dekker, New York.
- Preciado R., P., G.A. Baca C., J.L. Tirado T., J. Kohashi S., L. Tijerina Ch. y A. Martínez G. 2002. Nitrógeno y potasio en la producción de plántulas de melón. *Terra* 20: 267-276.
- Samuel, L.L., W. Tisdale, J.B. Nelson y J. Havlin. 1993. Soil and fertilizers. 5th ed. MacMillan. New York.
- Schildwacht, P.M. 1989. Changes in the osmotic potential of the root as a factor in the decrease in the root-shoot ratio of *Zea mays* plants under water stress. pp. 235-239. *In: Loughman, B.C. (ed.). Structural and functional aspects of transport in root.* Kluwer Academic Publishers. Boston, MA.
- Shannon, M.C. 1997. Adaptation of plants to salinity. *Adv. Agron.* 60: 75-121.
- Smith, M.A.L., L.A. Spomer, R.A. Shibli y S.L. Knight. 1992. Effect of NaCl salinity on miniature dwarf tomato "Micro-Tom": II Shoot and root growth responses, fruit production and osmotic adjustment. *J. Plant Nutr.* 15: 2339-2341.
- Soil Survey Staff. 1994. Claves de la taxonomía de suelos. Trad. al español por C.A. Ortiz S. y Ma. C. Gutiérrez C. Publicación Especial 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Sonneveld, C. y W. Voogt. 1990. Response of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.) to an unequal distribution of nutrient root environment. pp. 509-514. *In: M.L. van Beusichem (ed.). Plant nutrition-physiology and applications.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Steiner, A.A. 1973. The selective capacity of plant for ions and its importance for the composition and treatment of nutrient solution. I.S.O.S.C. Proceedings 3<sup>rd</sup> International Congress on Soilless Culture. Sassari, Italy. pp. 43-53.
- Steiner, A.A. 1980. The selective capacity of plant for ions and its importance for the composition and treatment of nutrient solution. I.S.O.S.C. Proceedings 5<sup>th</sup> International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands. pp. 83-95.
- Steiner, A.A. 1984. The Universal Nutrient Solution. Sixth Int. Congr. on Soilless Culture. I.S.O.S.C. Proceeding. The Netherlands. pp: 633-649.
- Steiner, A.A. y H. Van Winden. 1970. Recipe for ferric salt of ethylenediamintetra acetic acid. *Plant Physiol.* 46: 862-863.
- Tanji, K.K. 1990. Agricultural salinity assessment and management. American Society of Engineers. New York.
- Udagawa, Y. 1995. Some response of dill (*Anethum graveolens*) and thyme (*Thymus vulgaris*), growing in hydroponic, to the concentration of nutrient solution. *Acta Hort.* 396: 203-207.
- Vavrina, C.S. 1998. Transplant age in vegetables crops. *HortTech.* 8: 550-555.
- Weston, L.A. y B.H. Zandstra. 1989. Transplant age and N and P nutrition effects on growth and yield of tomatoes. *HortScience* 24: 88-90.

# RENDIMIENTO Y ASIGNACIÓN DE MATERIA SECA DE UNA VARIEDAD DE FRIJOL EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO Y SUELO

## Yield and Dry Matter Partition of a Common Bean Variety in a Hydroponic System and Soil

A. García-Esteva<sup>1†</sup>, J. Kohashi-Shibata<sup>1</sup>, G.A. Baca-Castillo<sup>1</sup> y J.A.S. Escalante-Estrada<sup>1</sup>

### RESUMEN

Frecuentemente se reportan altos rendimientos para los cultivos, en particular en hortalizas cultivadas bajo sistemas hidropónicos en invernadero. Sin embargo, en la literatura revisada sobre frijol, no se consignan los correspondientes rendimientos de un suelo bien preparado. El objetivo del presente trabajo fue determinar el rendimiento de grano, sus componentes, la biomasa y su asignación en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en un sistema hidropónico y en un suelo bien preparado, sin restricciones de humedad y fertilidad. La variedad de mata (Tipo I) Cacahuete-72, se sembró en invernadero en recipientes de plástico de 50 L de capacidad a una densidad de población equivalente a 60 plantas m<sup>-2</sup>. Para el sistema hidropónico, se empleó la solución completa de Steiner, modificada para la fase vegetativa y reproductiva y agrolita como sustrato. Para el cultivo en suelo, se utilizó un suelo rico en materia orgánica mezclado con arena en una proporción de 2:1 con adición de fertilizantes. El diseño del experimento fue completamente al azar con cinco repeticiones. Comparado con el sistema hidropónico, la biomasa total fue significativamente menor (16%) en el cultivo en suelo y el rendimiento de grano (605 g m<sup>-2</sup>) fue 13% inferior, debido a una menor acumulación de materia seca en raíz, tallo, ramas, lámina foliar y a un menor número de vainas normales.

**Palabras clave:** *Phaseolus vulgaris* L., biomasa, componentes del rendimiento.

### SUMMARY

High yields have frequently been reported for crops, particularly vegetables grown under greenhouses with hydroponic systems. However, in

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, km 36.5 carretera México-Texcoco, 56230 Montecillo, estado de México. <sup>†</sup> Autor responsable (esteva@colpos.colpos.mx).

Recibido: Octubre de 2001. Aceptado: Mayo de 2003.  
Publicado en Terra 21: 471-480.

the literature on bean, corresponding yields from a well-prepared soil are not provided. The objective of the present work was to determine grain yield and yield components, and biomass and its partition for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in a hydroponic system and in well-prepared soil. Bush bean (Type I) variety Cacahuete-72 was planted in a greenhouse with a density equivalent to 60 plants·m<sup>-2</sup> in plastic containers with a capacity of 50 L. For the hydroponic system, a complete Steiner solution modified for the vegetative and reproductive phase, and a Perlite substrate were employed. For the soil culture, a soil rich in organic matter mixed with sand in a 2:1 ratio was employed. Chemical fertilizers were added and watering was provided. The design of the experiment was completely randomized with five replications. Compared to the hydroponic system, the soil culture produced a significant 16 percent lower biomass and a grain yield of 605 g m<sup>-2</sup> (13 percent less than that of the hydroponic system). This response was due to a lower dry matter accumulation in root, stem, branches, and leaf lamina and to a lower number of normal pods.

**Index words:** *Phaseolus vulgaris* L., biomass, yield components.

### INTRODUCCIÓN

En la literatura revisada, no se consignan resultados de estudios donde se comparen los rendimientos obtenidos en frijol cultivado en hidroponía y en un suelo sin restricciones de humedad y fertilidad. Dicha comparación permitiría probar la bondad de la hidroponía, puesto que, frecuentemente, se señalan altos rendimientos con este sistema de cultivo, en especial en hortalizas (Penningsfeld y Kurzmann, 1975; Benoit y Ceustermans, 1987; Schwarz, 1995).

Un alto rendimiento de grano en un cultivo, de acuerdo con Yoshida (1972), puede lograrse mediante una apropiada combinación de la variedad, el ambiente y las prácticas agronómicas. Dentro de los factores del ambiente, en condiciones de campo, la

temperatura y la humedad relativa no son factibles de ser modificadas desde un punto de vista operativo, sin embargo, en ambientes semicontrolados como los invernaderos, sí es factible. Según Kohashi (1990), algunos de los factores relativos al suelo como son su fertilidad, humedad y el contenido de materia orgánica, también son factibles de ser modificados desde un punto de vista práctico.

En cuanto a la humedad del suelo, para obtener un buen rendimiento en la mayoría de los cultivos, se ha señalado que ésta deberá mantenerse cercana a capacidad de campo. En frijol, Siqueira y Palacios (1985) reportaron que para el desarrollo del cultivo, la humedad residual en campo debe estar entre 40 y 60%, en todas las etapas. Por otro lado, se ha reportado que el rendimiento de grano es la variable más sensible cuando ocurre un déficit de humedad en la fase reproductiva (Calvache *et al.*, 1997; Nielsen y Nelson, 1998). Dentro de las prácticas agronómicas, el empleo de una densidad de población óptima, fecha de siembra, distribución espacial de las plantas en el terreno y el manejo del cultivo, permitirán el logro de una mayor eficiencia en el uso de los recursos disponibles. La densidad óptima desde el punto de vista del rendimiento biológico será aquella que permita una mayor acumulación de materia seca; sin embargo, desde el punto de vista del rendimiento agronómico será aquella que permita obtener mayores utilidades. Para frijol, Da Costa *et al.* (1983) reportaron que existe una mayor plasticidad en variedades de crecimiento indeterminado, por ello, para el cultivar de mata se espera un mayor rendimiento por  $m^2$  hasta cierta densidad de población. Edje *et al.* (1975), en dos variedades de mata, reportaron rendimientos de 16.2 y 13.6  $g\ planta^{-1}$  cuando se cultivaron a una densidad de 111 000 plantas  $ha^{-1}$  y de 4.9 y 5.1  $g\ planta^{-1}$  a 444 000 plantas  $ha^{-1}$  con una fertilización de 800  $kg\ ha^{-1}$  de la fórmula 4-7.8-12.5. De acuerdo con Bennett *et al.* (1977), es frecuentemente observado en frijol que el número de vainas por planta es el componente del rendimiento más sensible con altas densidades. Sin embargo, hay que señalar que a nivel de área, se eleva el rendimiento agronómico hasta cierto límite, debido a un mayor número de plantas. Respecto al manejo del cultivo, en relación con la fertilización, el potencial en la producción de materia seca de los cultivos sometidos a altas densidades de población, depende del suministro de nitrógeno principalmente (Hay y Walker, 1989). En girasol, Escalante (2001) determinó que la fertilización

nitrogenada eleva la eficiencia en el uso del agua. Por otro lado y en cuanto a las propiedades del suelo, se ha indicado que lo ideal sería tener una proporción favorable de materia orgánica, en virtud de que ésta le permite una mejor relación agua-aire y una mayor capacidad amortiguadora para los iones inorgánicos (Steiner, 1969). En los cultivos hidropónicos, se tiene un control del abastecimiento de nutrimentos a la planta, ya que ésta obtiene sus nutrimentos a partir de una solución nutritiva balanceada; dicha solución, a diferencia de la del suelo, es homogénea (Schwarz, 1995). Sin embargo, a diferencia del suelo, en los cultivos hidropónicos prácticamente no existe capacidad amortiguadora; por ello, se han establecido experimentos con el propósito de encontrar un mecanismo similar al del suelo para lograr dicho amortiguamiento (Checkai y Norvell, 1992).

Respecto al rendimiento del cultivo de frijol en México, en condiciones de riego en campo para la última década (1990-1999), éste osciló entre 1.314 y 1.383  $t\ ha^{-1}$  y para temporal de 0.393 a 0.562  $t\ ha^{-1}$  (CEA, 2001). El rendimiento es bajo, debido a que la mayor parte del área sembrada es de temporal (Acosta y Kohashi, 1989). En México, los principales factores que causan reducción del rendimiento de acuerdo con Acosta *et al.* (2000) son las enfermedades, las plagas, la sequía y la siembra en suelos marginales de baja fertilidad y poco profundos.

Para la variedad de frijol Cacahuete-72, empleado en el presente estudio, el rendimiento reportado del cultivo en campo ha sido de 25.35  $g\ m^{-2}$  en temporal en Chapingo, México, con el empleo de una densidad de población de 8900 plantas  $ha^{-1}$  y una fertilización a la siembra de 40-40-10 (Díaz, 1990). Por otra parte, Escalante y Kohashi (1993a), en Chapingo, México, registraron un rendimiento de 141  $g\ m^{-2}$  en temporal con una densidad de población de 16.6 plantas  $m^{-2}$  y fertilización con 100  $kg$  de N  $ha^{-1}$ . Este rendimiento es alto para ser de temporal; sin embargo, el empleo de una densidad de población alta y una fertilización mayor de N favorecieron una mejor respuesta del cultivo. En cuanto al rendimiento de grano, obtenido con sistemas hidropónicos, no se encontraron datos sobre producción comercial; sin embargo, en algunos estudios en invernadero, con el empleo de macetas de 3 L de capacidad y agrolita como sustrato, el rendimiento máximo de grano por planta en condiciones de invernadero para el área de Chapingo, México, ha sido de 40.4  $g\ planta^{-1}$  (Ortiz *et al.*, 1994) y de 36.9  $g\ planta^{-1}$  (Bayuelo *et al.*, 1994).

En el presente estudio, no se buscó hacer un análisis económico del empleo de uno u otro método de cultivo. El objetivo fue determinar el rendimiento de grano, sus componentes, la biomasa y su asignación en frijol cultivado en un sistema hidropónico con subirrigación y agrolita como sustrato y el frijol cultivado en un suelo bien preparado. La hipótesis fue que el método de cultivo utilizado para su desarrollo no afecta el rendimiento del frijol.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en Chapingo, estado de México (19° 30' N; 98° 51' O; altitud 2240 m), en condiciones de invernadero. La temperatura promedio máxima fue de 33 °C y la mínima de 15 °C durante el ciclo del cultivo. La siembra se efectuó el 29 de julio de 1993 y la cosecha el 19 de octubre del mismo año (82 días después). Se utilizó frijol de mata var. Cacahuete-72, Tipo I según la clasificación del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, 1982). El manejo del cultivo previo al trasplante que corresponde al inicio de los tratamientos fue el mismo; para ello, la siembra se realizó depositando una semilla por vaso de poliestireno de 300 mL de capacidad que contenía agrolita como sustrato. Desde la siembra hasta 12 días, los vasos se regaron de manera individual a las 8:00 h y a las 13:00 h y se aplicaron 50 mL en cada ocasión de la Solución nutritiva 1, la cual se detalla en el Cuadro 1. Durante los primeros cuatro días, dicha solución se aplicó a 1/3 de su concentración normal; de los cinco a los ocho días, el riego se efectuó con la misma solución a 1/2 de su concentración y de los nueve a los 12 días, se aplicó a 2/3 de su concentración normal. La

emergencia ocurrió a seis días después de la siembra y, a 12 días, las plántulas tenían sus hojas simples totalmente expuestas y en pleno crecimiento; en esta fecha, se procedió al trasplante para dar inicio a los tratamientos que se describen en los siguientes párrafos.

## Tratamientos

Se evaluaron dos tratamientos, el cultivo en un sistema hidropónico y el cultivo en suelo, en condiciones de invernadero. En ambos casos, se emplearon recipientes de plástico de las siguientes dimensiones: 56 cm de diámetro en la parte superior, 43 cm en la base, una profundidad de 25 cm, área de 2463 cm<sup>2</sup> y una capacidad de 50 L, colocados sobre mesas de madera a una altura de 50 cm del nivel del piso. En el fondo de cada recipiente, se colocó una capa de 3 cm de espesor de tezontle rojo con una granulometría de 5 a 10 mm, con el propósito de facilitar el drenaje de la solución nutritiva en el cultivo hidropónico y del agua en el caso del cultivo en suelo. Sobre el estrato de tezontle se colocó una cubierta de polietileno negro con perforaciones de 1.5 mm de diámetro para que permitiera el paso de la solución nutritiva o del agua. Para el sistema hidropónico, el resto de cada recipiente se llenó con agrolita como sustrato inerte y, para el tratamiento del cultivo en suelo, se llenó con una mezcla hecha de suelo rico en materia orgánica y arena, ambos sustratos se detallan en los párrafos relativos a la descripción de los tratamientos. Finalmente, la superficie superior de todas las macetas se tapó con otra cubierta igual de polietileno negro con cortes longitudinales por surco dentro de la maceta y perforaciones de 1.5 cm, practicadas en el sitio donde

Cuadro 1. Soluciones nutritivas empleadas en frijol var. Cacahuete-72, cultivado en hidroponía. Chapingo, México. 1993.

Solución nutritiva <sup>†</sup>	Etapas fenológicas <sup>†</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Presión osmótica
		----- meq L <sup>-1</sup> -----						MPa
1	V0 a R5 siembra hasta 36 días de edad	9.52	5.72	3.80	11.43	0.95	6.66	0.073
2	R6 a R7 37 a 60 días de edad	7.70	9.90	4.40	6.60	1.65	13.75	0.073
3	R8 a R9 61 a 82 días de edad	11.55	14.84	6.60	9.90	2.47	20.62	0.109

<sup>†</sup> Corresponde a la solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1984) modificada (G. Baca, C. 1992, Comunicación personal). <sup>†</sup> Clasificación de acuerdo con Escalante y Kohashi (1993b). V0 = germinación; R5 = prefloración; R6 = floración; R7 = formación de vainas; R8 = llenado de vainas; R9 = madurez fisiológica.

se ubicaron las plantas; esta cubierta de polietileno negro se colocó con el propósito de evitar la proliferación de algas, debido a la humedad y a la radiación solar. El trasplante de las plántulas de los vasos a los recipientes de plástico se llevó a cabo, en ambos tratamientos con un arreglo triangular, colocando una planta por punto a cada 16.7 cm dentro de las hileras en la maceta separadas entre sí cada 10 cm. Cada maceta contenía 18 plantas y de acuerdo con su distribución correspondían a una densidad de población de 60 plantas  $m^{-2}$ . Posterior al trasplante, se realizó el tutorado en ambos tratamientos, colocando al contorno de la maceta una estructura hecha de tiras delgadas de madera (en forma de un cubo sujeto a la mesa). A dicha estructura se sujetaron seis hilos de rafia en su marco superior, los cuales sirvieron de soporte a la hilaza que sujetó a cada planta dentro de la maceta. Enseguida, se detallan cada uno de los tratamientos.

**Cultivo en hidroponía.** Se utilizó el sistema de subirrigación donde en cada riego la solución nutritiva moja al sustrato desde el fondo de la maceta hacia la parte superior; la solución nutritiva es reciclada. Como sustrato se utilizó agrolita con una granulometría de 1 a 3 mm, previamente lavada, desinfectada y secada al sol. El lavado de la agrolita fue con el propósito de eliminar impurezas y partículas finas que limiten el paso de la solución nutritiva al dar el riego; la desinfección se hizo con hipoclorito para eliminar microorganismos que podrían presentarse debido al reciclaje de la agrolita, la cual se había utilizado anteriormente. A cada recipiente (maceta), se le practicó una perforación lateral en la base para instalar una manguera cuya función fue la de drenar la solución nutritiva y conducirla a un recipiente receptor de 20 L de capacidad (Figura 1A). Para la aplicación del riego por subirrigación, se colocaron los botes que contenían la solución nutritiva sobre bancos de madera de 70 cm de altura para que por gravedad saturara al sustrato, después del riego, la solución nutritiva se recuperaba también por gravedad al colocar los recipientes en el piso.

La solución nutritiva empleada fue la de Steiner (Steiner, 1984), modificada de acuerdo con la fase vegetativa y reproductiva del cultivo (Cuadro 1). Las modificaciones de la solución nutritiva se basaron en cambios en la presión osmótica y en la cantidad de aniones y cationes de acuerdo con la fase del cultivo, bajo el supuesto de que hay demandas diferentes de

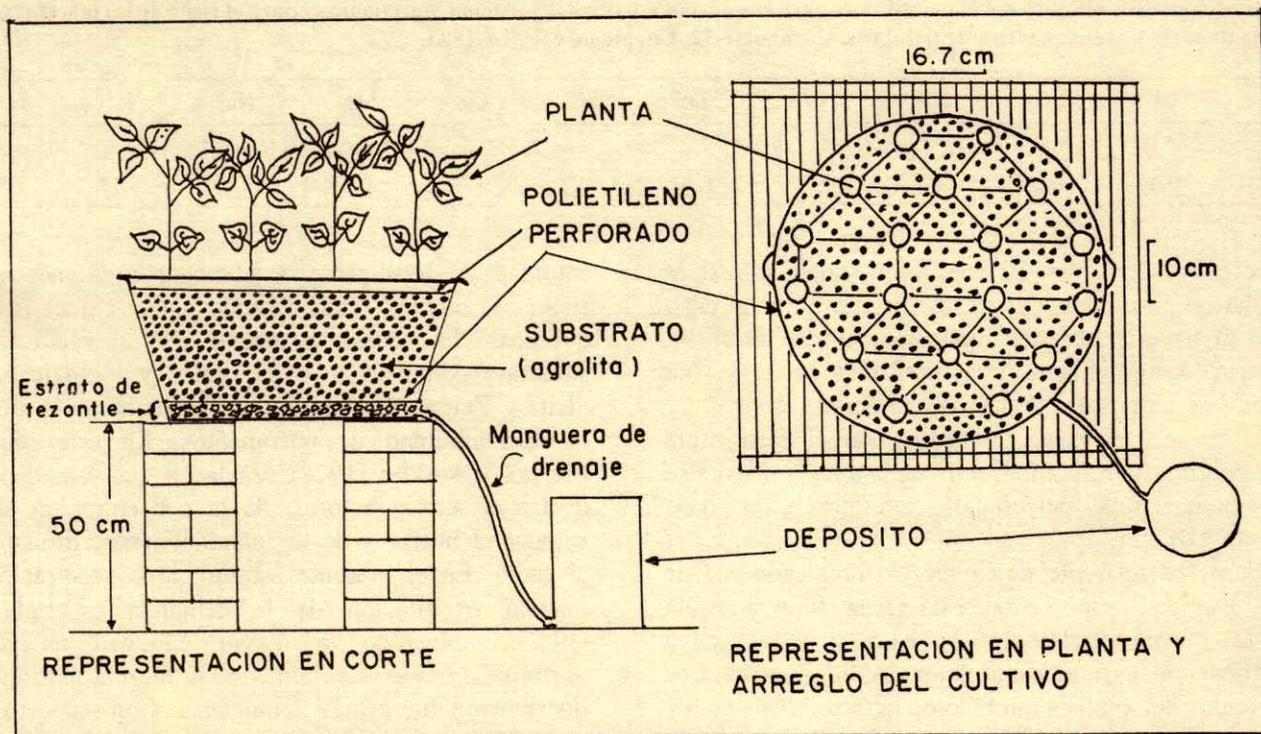
nutrimentos de acuerdo con la etapa fenológica de la planta.

Para preparar la solución nutritiva, se utilizó agua de la llave; el análisis químico del agua empleada se presenta en el Cuadro 2. Se tomaron en cuenta los nutrimentos contenidos en dicha agua, para no alterar la composición de la solución nutritiva propuesta. La solución se preparó con sales de grado reactivo [ $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ;  $KNO_3$ ;  $K_2SO_4$ ;  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ;  $MgSO_4$ ;  $KH_2PO_4$ ] y se adicionaron al agua previamente acidulada (pH 5.5) con ácido sulfúrico comercial, en el siguiente orden: nitratos, sulfatos, micronutrimentos y la solución de Fe; finalmente, se ajustó nuevamente el pH a 5.5 y se agregó el fosfato. La composición de los micronutrimentos, en  $mg L^{-1}$ , fue: B, 0.875; Zn, 0.023; Cu, 0.011; y Mn, 1.6. El Fe se proporcionó en forma de EDTA-Fe a una concentración de  $8.4 mg L^{-1}$ .

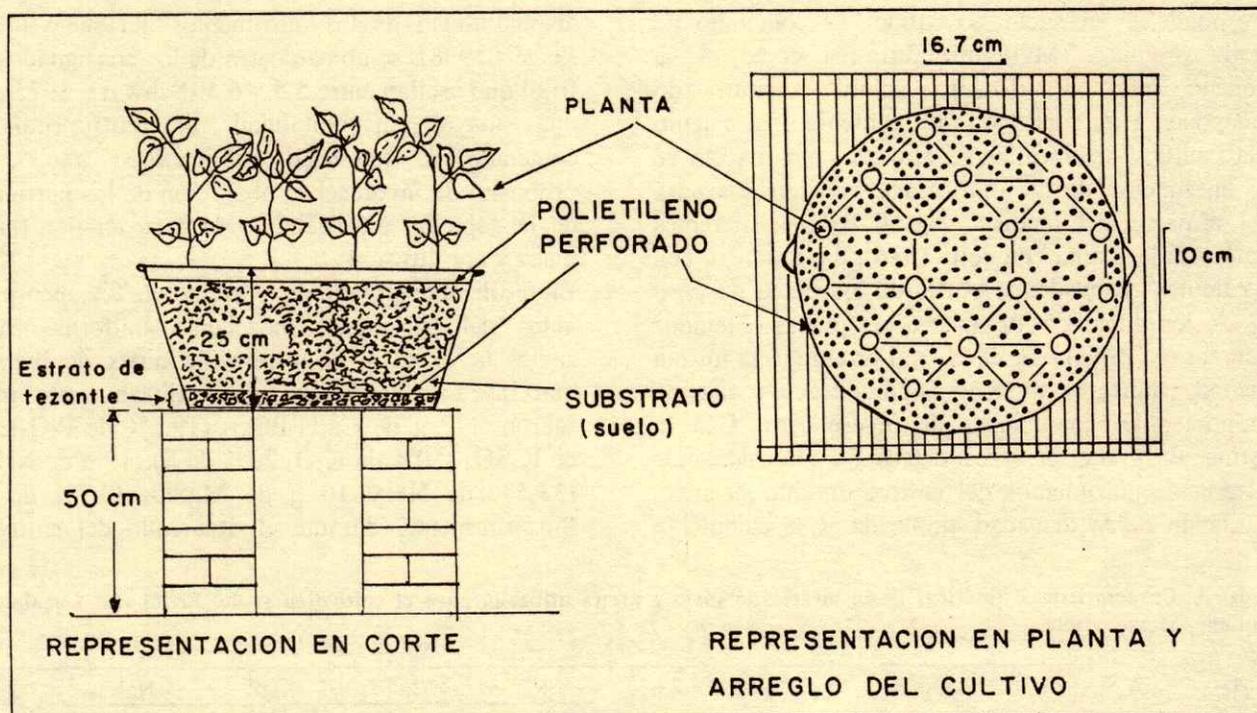
Las tres soluciones nutritivas propuestas se aplicaron en función de las etapas fenológicas del cultivo. Las etapas se consideraron según Escalante y Kohashi (1993b). La composición de las soluciones nutritivas, las etapas en las cuales se aplicaron y la edad de las plantas en la cual se aplicaron, se detallan en el Cuadro 1. Durante los dos días posteriores al trasplante, las plantas se regaron a diario a las 8:00 h y a las 13:00 h, con la solución nutritiva 1 a  $\frac{3}{4}$  de su concentración normal, aplicando directamente a cada planta en su base, 50 mL en cada ocasión a las 8:00 h y a las 13:00 h. A partir del tercer día y hasta la madurez fisiológica, el riego se efectuó por el método de subirrigación a las mismas horas y con la solución nutritiva correspondiente según la etapa de desarrollo a 100% de su concentración.

En el recipiente receptor, la solución nutritiva se aforó a diario a 15 L con agua acidulada. El pH se mantuvo entre 5.5 y 6.5 mediante la adición de ácido sulfúrico comercial. Los cambios de la solución nutritiva se efectuaron cada 11 días después del trasplante (ddt) hasta el final de la etapa de prefloración (R5, 24 ddt), y cada ocho días durante las etapas correspondientes a floración (R6, 48 ddt) hasta la madurez fisiológica (R9, 70 ddt). Se tomó en cuenta el inicio de las etapas fenológicas respectivas para hacer el cambio en el tipo de solución empleada.

**Cultivo en suelo.** Se empleó una mezcla ( $45 dm^3$  por maceta) compuesta por un suelo de bosque (tomado del estrato superficial, de 0 a 10 cm), rico en materia orgánica (15%), producto de la descomposición de hojas principalmente y arena fina de río en una



A) HIDROPONIA



B) SUELO

Figura 1. Dispositivo para el cultivo de frijol var. Cacahuete-72 en un sistema hidropónico (A) y suelo (B).

**Cuadro 2. Análisis químico del agua utilizada para la solución nutritiva del sistema hidropónico y para el riego de las macetas con la mezcla de suelo y arena. Cultivo de frijol var. Cacahuate-72. Chapingo, México. 1993.**

pH	CE <sup>†</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Σ(-)	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ(+)
	dS m <sup>-1</sup>	----- meq L <sup>-1</sup> -----					----- meq L <sup>-1</sup> -----				
7.4	0.44	0.00	4.10	0.52	1.40	6.02	1.71	2.31	1.20	0.13	5.35

<sup>†</sup>CE = conductividad eléctrica.

proporción 2:1. Ambos se cribaron, al suelo sólo se le eliminaron partículas mayores que 5 mm y, en el caso de la arena, se cribó con malla mosquitera. Sobre la cubierta de polietileno con perforaciones que fue común en ambos tratamientos, se depositaron 30 kg de la mezcla de suelo y arena con el fertilizante incorporado. Para facilitar el drenaje, a cada maceta se le practicó una perforación lateral en la base (Figura 1B).

La densidad aparente de la mezcla empleada fue de 1.01 g cm<sup>-3</sup>. Los porcentajes de arena, limo y arcilla de la misma fueron: 55.1, 21.5 y 23.4, cuya clasificación textural es migajón-arcillo-arenosa. Los resultados del análisis químico de la mezcla de suelo y arena se presentan en el Cuadro 3. El pH corresponde a un suelo moderadamente ácido y, de acuerdo con los valores consignados para frijol, está dentro del intervalo adecuado. La conductividad eléctrica (CE) corresponde a un suelo no salino. El contenido de materia orgánica (MO) fue alto, así como el de nitrógeno total. El fósforo soluble cuantificado corresponde a un suelo con alto contenido. El cálculo de la cantidad de fertilizante aplicado por maceta se hizo en función de los porcentajes consignados para frijol a partir del análisis vegetal de los diferentes órganos de la planta (Piggott, 1986), así también, con los cálculos realizados a partir de los datos de peso seco de los diferentes órganos de la planta obtenidos en un ensayo preliminar en el cual se cultivó la misma variedad empleada en este estudio con un sistema hidropónico en condiciones de invernadero. Con la información anterior, se determinó la demanda esperada de nutrimentos del cultivo durante su ciclo, en función de la densidad empleada y se calculó la

cantidad de fertilizante a adicionar a la mezcla de suelo y arena, considerando sus características químicas. Es necesario señalar que el suelo es un substrato complejo física, química y biológicamente (Taiz y Zeiger, 1998) y que diversos factores afectan la disponibilidad de nutrimentos. En este sentido, Mengel y Kirkby (1978) señalaron que ésta depende dentro de otros factores, de la concentración, de la capacidad buffer y de las condiciones de difusión en el suelo. En el presente estudio, la concentración se manejó en función de la demanda esperada del cultivo, aplicando la mayor cantidad en forma uniforme en todo el volumen de la mezcla para que su distribución fuera más homogénea. Con respecto a la capacidad amortiguadora, el alto contenido de MO permite una mejor capacidad amortiguadora y de intercambio catiónico (Mengel y Kirkby, 1978). El valor del pH, debido a su gran influencia sobre la disponibilidad de los nutrimentos del suelo (Taiz y Zeiger, 1998), se ubica dentro de los consignados para frijol que oscilan entre 5.5 y 6.5 (Schwarz, 1975), para una mayor disponibilidad de nutrimentos. El contenido de humedad se mantuvo alto con el propósito de favorecer la absorción de los nutrimentos de la solución del suelo, lo cual se da por flujo en masa y por difusión.

El fertilizante granulado y en polvo fue incorporado antes del trasplante, mezclando uniformemente el suelo, la arena y el fertilizante antes de llenar las macetas. Las cantidades de fertilizante por maceta fueron: 117 g de Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (19.5% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); 22 g de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (50% de K<sub>2</sub>O, 20% de S); 19 g de NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (33.5% de N) y 10 g de MgSO<sub>4</sub> (9.7% de Mg). Posteriormente, durante el desarrollo del cultivo, se

**Cuadro 3. Características químicas de la mezcla de suelo y arena utilizada para el cultivo en suelo. Frijol var. Cacahuate-72. Chapingo, México. 1993.**

pH (1:2)	CE <sup>†</sup> (1:5)	MO <sup>‡</sup>	N total	P	Intercambiable				SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
					K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	
	dS m <sup>-1</sup>	----- % -----		mg kg <sup>-1</sup>	----- meq/100g -----				mg kg <sup>-1</sup>
5.9	0.59	15.13	0.76	60	1.15	23.73	5.48	0.53	178

<sup>†</sup>CE = conductividad eléctrica. <sup>‡</sup>MO = materia orgánica.

aplicaron, además, en total 57 g de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (33.5% de N), dicha cantidad se distribuyó en tres partes, aplicadas de la forma siguiente: 28.5 g a 15 ddt, 19.0 g a 30 ddt y 9.5 g a 50 ddt; en cada caso, el fertilizante se aplicó superficialmente y se incorporó removiendo ligeramente el suelo en la parte superior de la maceta. La humedad del suelo se mantuvo a capacidad de campo a través del método gravimétrico; previamente, se determinó el peso promedio de tres macetas a capacidad de campo. Para ello, se agregaron 30 kg de la mezcla de suelo y arena, y se saturaron con un riego pesado hasta que se drenó el excedente de agua durante 48 h; posterior a este lapso, se pesaron y se tomó dicho peso como referencia para capacidad de campo. Para recuperar el agua consumida por el cultivo y llevar las macetas a capacidad de campo, se pesaron a diario tres macetas a las 8:00 h. Con dicho dato promedio, el de referencia de capacidad de campo, y considerando el ajuste por peso seco de las plantas, se determinó el consumo promedio de agua por maceta y se adicionó dicha cantidad a todas las macetas del tratamiento de suelo. Las características químicas del agua empleada son las mismas indicadas para la que se empleó en la preparación de la solución nutritiva del cultivo en hidroponía (Cuadro 3).

#### Producción de Biomasa y Rendimiento de Grano

La distribución de los tratamientos se hizo con un diseño completamente al azar con cinco repeticiones. La unidad experimental consistió de 18 plantas en cada maceta, de las cuales se tomaron las seis plantas centrales con competencia completa para el registro de datos. Se realizó un análisis de varianza a los datos, mediante el paquete SAS, Versión 6.03 (SAS Institute, 1988) y también la prueba de comparación de medias de Tukey.

A la cosecha, se separaron cada uno de los órganos de la planta (tallo, ramas, hojas, raíz, vainas normales y vainas vanas). Para la extracción del sistema radical, se aplicó agua a cierta presión con una manguera para la separación de la agrolita o de la mezcla de suelo y arena mediante el lavado. Posteriormente, todos los órganos, excepto las semillas, se secaron a 80 °C en una estufa de circulación forzada de aire durante 72 h, hasta alcanzar un peso constante, y se determinó su peso. Para la determinación de la biomasa total producida, se sumó el peso seco de todos los órganos del vástago y del sistema radical y se incluyó, además, el peso seco de los órganos caídos durante el ciclo del cultivo.

Para evaluar el rendimiento de grano, así como sus componentes principales, se registraron los datos de rendimiento de grano por planta, el número de granos normales, tamaño del grano (determinado por el peso promedio del grano, al dividir el peso total de granos normales por planta entre el número de granos normales por planta) y número de vainas con granos normales.

El índice de cosecha (expresado en %) se determinó según el criterio propuesto por Kohashi *et al.* (1980), el cual en el peso seco total incluye los órganos caídos durante el ciclo (Icm). En el presente trabajo se contempla, además, en el peso seco total al peso del sistema radical.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Rendimiento de Grano y sus Componentes

Se observó diferencia estadística significativa entre tratamientos. El rendimiento de grano fue de 605 g m<sup>-2</sup> para las plantas desarrolladas en suelo y de 692 g m<sup>-2</sup> para las cultivadas en hidroponía, siendo inferior en 13% el cultivo en suelo con relación a hidroponía. El rendimiento de grano es considerado como la resultante de una secuencia de otros componentes morfológicos (Kohashi, 1990) y de numerosos eventos fisiológicos (Gardner *et al.*, 1985); por otro lado, Geiger *et al.* (1989) señalaron que altas producciones en los cultivos son el resultado de una producción mayor de materia seca en las hojas, así como un incremento en la acumulación de carbono en los órganos de interés. Una estimación del rendimiento de grano por metro cuadrado, basado en el rendimiento promedio por planta reportado por Bayuelo *et al.* (1994), en la var. Cacahuete-72 en hidroponía con agrolita como substrato, fue de 667 g con 20 plantas m<sup>-2</sup>, considerando esta densidad en función de la sombra proyectada por planta al mediodía. En plantas cultivadas en suelo en condiciones de campo, Siqueira y Palacios (1985) consignaron un rendimiento promedio de 445 g m<sup>-2</sup> en la variedad Canario 101 de mata y en un suelo de textura migajón-arcillo-arenosa (igual clasificación textural al suelo empleado en el presente estudio).

Dentro de los componentes del rendimiento, el número de vainas normales por metro cuadrado mostró una diferencia significativa entre tratamientos, siendo mayor en hidroponía que en suelo. Esta diferencia condujo a que las plantas en hidroponía produjeran un mayor número de semillas por metro

cuadrado. Lo anterior estuvo asociado estrechamente a una producción mayor de biomasa total acumulada en las plantas en hidroponía, lo que conduce a señalar que los efectos de una mayor infraestructura vegetativa y del sistema radical en hidroponía, reflejaron un mayor rendimiento de grano y de algunos de sus componentes, con respecto al cultivo en suelo (Cuadro 4). Se considera que el empleo de la solución modificada en hidroponía, según las etapas del cultivo, tuvo un efecto favorable en cuanto a su respuesta, ya que las necesidades de las plantas en diversas etapas de su crecimiento son diferentes (Resh, 1987). Por otra parte, en el caso del cultivo en suelo, posiblemente hubo una restricción para la exploración del sistema radical, pues no existe una disponibilidad inmediata de los nutrimentos como en el sistema hidropónico, así como la humedad y aireación también pudieron ser factores limitativos disminuyendo el rendimiento del grano. En el caso de la humedad, ocurrió en la etapa de mayor competencia al inicio del llenado del grano.

Considerando lo anterior, la diferencia principal en el rendimiento de grano estuvo dada por una mayor producción de vainas normales  $m^{-2}$  en las plantas en hidroponía; esta mayor producción estuvo ligada también a un mayor peso seco de la raíz, tallo, ramas y lámina foliar.

#### Biomasa Total y su Asignación

La biomasa total, incluyendo los órganos caídos, mostró diferencias significativas entre tratamientos. Los valores promedio reflejaron una diferencia de 16% menor en el cultivo en suelo con respecto a hidroponía (Cuadros 4 y 5). Esta diferencia se debió principalmente a una mayor acumulación de peso seco en raíz, tallo principal, ramas, lámina foliar y a una mayor producción de grano. El peso seco de la raíz exhibió diferencias altamente significativas entre tratamientos, siendo los valores de  $46.7 g m^{-2}$  en hidroponía y de  $34.9 g m^{-2}$  en suelo. El tallo principal

no mostró diferencias significativas; sus valores de peso seco fueron de  $102.6 g m^{-2}$  en hidroponía y de  $95.4 g m^{-2}$  en suelo. En cambio, el peso seco de las ramas sí manifestó diferencias significativas entre tratamientos a 1%, con valores de  $68.4 g m^{-2}$  en hidroponía y de  $48.6 g m^{-2}$  en suelo. El peso seco de la lámina foliar a la cosecha, incluyendo la de las hojas caídas durante el ciclo, mostró diferencias significativas a 5%, siendo el peso seco en hidroponía de  $274.9 g m^{-2}$  y de  $239.4 g m^{-2}$  en suelo. La respuesta del cultivo en suelo, asociada con una menor producción de biomasa que en hidroponía, podría relacionarse con una limitación en la humedad del suelo. Dicha limitación, acentuada en horas del día de máxima demanda de agua por el cultivo y debido a que la retención de la humedad por las partículas del suelo es mayor que en hidroponía, las plantas están sujetas a un mayor déficit de agua. En cuanto al abastecimiento de nutrimentos al sistema radical del cultivo en suelo, éste también es un factor que está ligado estrechamente a la absorción de agua, sin embargo, la solución del suelo es muy diluida y los nutrimentos podrían ser rápidamente agotados por las raíces si no se liberan nuevos iones de la fase sólida (Epstein, 1972; Salisbury y Ross, 1994); en este aspecto, la disponibilidad de nutrimentos en el suelo es menor comparado con el cultivo hidropónico. Por otra parte, hay otros factores que afectan la disponibilidad de nutrimentos en el suelo, como: la concentración, la capacidad amortiguadora y las condiciones de difusión (Mengel y Kirkby, 1978). En hidroponía, todos los nutrimentos se encuentran en forma iónica en la solución y su acceso es inmediato, sin embargo, para el caso del suelo, existen diversas fuerzas fisicoquímicas que limitan su disponibilidad. En el caso de hidroponía, estos factores no fueron limitativos en la misma magnitud, debido a la frecuencia del riego, lo cual favoreció también el abastecimiento de oxígeno al sistema radical; esto último tiene estrecha relación, para el caso del suelo, con la textura y la estructura, las cuales influyen sobre

Cuadro 4. Biomasa (incluyendo órganos caídos), rendimiento y sus componentes en frijol var. Cacahuete-72, cultivado en suelo e hidroponía. Chapingo, México. 1993.

Tratamiento	Biomasa $g m^{-2}$	Vainas normales ----- $m^{-2}$ -----	Granos normales	Peso de 100 granos g	Rendimiento de grano <sup>†</sup> $g m^{-2}$
Suelo	1166 a	314 a	1206 a	48.0 a	605 a
Hidroponía	1390 b	371 b	1356 a	49.2 a	692 b

<sup>†</sup> 12% de humedad. Prueba de Tukey  $P > 0.05$ . Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencia significativa entre tratamientos.

**Cuadro 5. Asignación de la biomasa total (incluyendo raíz y órganos caídos) a las partes de la planta a la madurez fisiológica. Frijol var. Cacahuete-72 cultivado en hidroponía y suelo. Chapingo, México. 1993.**

Partes de la planta	Tratamiento <sup>†</sup>	
	Hidroponía	Suelo
	- - - - % - - - -	
Grano normal	48.0	49.7
Grano abortado	0.3	0.3
Pericarpio	10.0	8.0
Vainas vanas	1.0	0.9
Lámina foliar	19.8	20.5
Peciolos + raquis	4.6	4.4
Raíz	3.4	3.0
Tallo principal	7.4	8.2
Ramas	4.9	4.2
Botones, flores y vainas caídas	0.6	0.8

<sup>†</sup> Las cifras en cada columna representan el porcentaje del peso seco de cada parte de la planta con respecto al peso seco total.

la relación agua-aire y la facilidad de penetración de la raíz (Foth, 1990). En las macetas empleadas, la estructura del suelo fue una de las características que presentó mayor modificación debido a que se empleó una mezcla de suelo y arena; en este sentido, posiblemente la aireación y la provisión adecuada de oxígeno al sistema radical fueron factores limitativos. La comparación de tratamientos tiene soporte bajo un manejo en macetas y no en campo, puesto que la estructura se modifica en cierta medida, sin embargo, se controlaron otros factores que favorecen el desarrollo y la producción del cultivo en suelo. En cuanto a la respuesta del cultivo a la acumulación de biomasa, Hay y Walker (1989) indicaron que el potencial en la producción de materia seca de los cultivos sometidos a altas densidades de población depende principalmente del suministro de nitrógeno. Al respecto, Bayuelo *et al.* (1994) reportaron para la var. Cacahuete-72, que la restricción de N en 50% en la solución nutritiva a partir de la etapa de prefloración redujo la producción de biomasa y el rendimiento. En el presente estudio, en hidroponía, la concentración de la solución nutritiva en N fue mayor para las etapas vegetativas, que en las reproductivas, esto permitió un desarrollo de las yemas vegetativas y, posteriormente, fueron fuente de fotosintatos en la etapa de floración y llenado de vainas. Geiger *et al.* (1989) determinaron que el desarrollo de yemas vegetativas y florales en frijol fue el principal factor en el establecimiento de las vías de distribución del carbono entre hojas en desarrollo y vainas. En un estudio sobre frijol, en el cual se incluyó la variedad

Cacahuete-72, Díaz (1990) determinó que ocurre un crecimiento rápido de la vaina en los primeros días y posteriormente uno más lento, y en la semilla ocurren dos fases de crecimiento activo y una tercera de crecimiento mínimo. Esto conduce a señalar que existe una translocación de fotosintatos hacia los órganos de mayor demanda en crecimiento. Lo anterior pudo observarse al no encontrar diferencias significativas en los datos del presente estudio en el índice de cosecha modificado entre tratamientos (48% en hidroponía y 49% en suelo, incluyendo el sistema radical), lo que explica una respuesta similar en la proporción asignada de materia seca a cada órgano. En el cultivo hidropónico, se observó que las plantas aún mantenían abundante área foliar verde y la coloración del sistema radical era café claro, de mayor consistencia y la pérdida por lavado fue menor con respecto al del cultivo en suelo. Esto conduce a señalar que la var. Cacahuete-72 responde de forma diferencial a los tratamientos.

## CONCLUSIONES

- El rendimiento de grano de frijol cultivado en el sistema hidropónico fue significativamente mayor (13%) con respecto al obtenido en el cultivo en suelo.
- El mayor rendimiento de grano en el sistema hidropónico estuvo relacionado con una mayor producción de vainas normales (371 vainas m<sup>-2</sup>), comparado con el cultivo en suelo (314 vainas m<sup>-2</sup>).
- Comparado con el sistema hidropónico (1390 g m<sup>-2</sup>), la biomasa total acumulada fue significativamente menor en el cultivo en suelo (1116 g m<sup>-2</sup>), debido a una menor acumulación de materia seca de raíz, tallo, ramas, así como de las hojas.

## LITERATURA CITADA

- Acosta G., J.A. y J. Kohashi S. 1989. Efecto de la sequía en tres etapas de desarrollo sobre el rendimiento y sus componentes de dos variedades de frijol, *Phaseolus vulgaris* L. Agric. Téc. Méx. 15: 51-66.
- Acosta G., J.A., R. Rosales S., R. Navarrete M. y E. López S. 2000. Desarrollo de variedades mejoradas de frijol para condiciones de riego y temporal en México. Agric. Téc. Méx. 26: 79-98.
- Bayuelo J., J.S., J.A.S. Escalante E., J. Kohashi S. y G. Baca C. 1994. Efecto de la restricción de nitrógeno sobre la biomasa, rendimiento y sus componentes de *Phaseolus vulgaris* L. Agrociencia, serie Fitociencia 5: 25-33.

- Bennett, J.P., M.W. Adams y C. Burga. 1977. Pod yield component variation and intercorrelation in *Phaseolus vulgaris* L. as affected by planting density. *Crop Sci.* 17: 73-75.
- Benoit, F. y N. Ceustermans. 1987. Some qualitative aspects of tomatoes grown on NFT. *Soilless Culture* 3(2): 3-7.
- Calvache, M., K. Reichardt, O.O.S. Bacchi y D. Dourado-Neto. 1997. Deficit irrigation at different growth stages of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L., cv. Imbabello). *Sci. Agric. Piracicaba* 54 (Número Especial): 1-16.
- CEA. Centro de Estadística Agropecuaria. 2001. Situación actual y perspectiva de la producción de frijol en México 1990-2000. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F.
- CIAT. Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1982. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común. Guía de estudio para ser usada como complemento de la Unidad Audiotutorial sobre el mismo tema. (Serie 04SB-09.03). Cali, Colombia.
- Checkai, R.T. y W.A. Norvell. 1992. A recirculating resin-buffered hydroponic system for controlling nutrient ion activities. *J. Plant Nutr.* 15: 871-892.
- Da Costa, J.G.C., J. Kohashi S. y S. Miranda C. 1983. Plasticidade no feijoeiro comum. *Pesq. Agropec. Bras. Brasília* 18 (2): 159-167.
- Díaz M., F. 1990. Crecimiento de la vaina y semillas del frijol. *Turrialba* 40: 553-561.
- Edje, O.T., L.K. Mughogho y U.W.V. Ayonoadu. 1975. Response of dry beans to varying nitrogen levels. *Agron. J.* 67: 251-255.
- Epstein, E. 1972. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. John Wiley. New York.
- Escalante E., J.A. 2001. Biomasa, rendimiento, eficiencia en el uso del agua y nitrógeno en girasol de humedad residual. *Terra* 19: 19-27.
- Escalante E., J.A. y J. Kohashi S. 1993a. Biomass and seed yield of *Phaseolus vulgaris* L. and their response to nitrogen and population density. *Ann. Rep. Bean Improv. Coop.* 36: 103-104.
- Escalante E., J.A. y J. Kohashi S. 1993b. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para toma de datos. Centro de Botánica-Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Foth, H.D. 1990. Fundamentals of soil science. John Wiley. New York.
- Gardner, F.P., R.B. Pearce y R.L. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. Iowa State University Press. Ames, IA.
- Geiger, D.R., S. Wen-Jang y R.M. Saluke. 1989. Carbon partitioning among leaves, fruits, and seeds during development of *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Physiol.* 91: 291-297.
- Hay, R.K.M. y A.J. Walker. 1989. An introduction to the physiology of crop yield. Longman Scientific & Technical. New York.
- Kohashi S., J. 1990. Aspectos de la morfología y fisiología del frijol *Phaseolus vulgaris* L. y su relación con el rendimiento. Centro de Botánica-Colegio de Postgraduados. Chapingo-Montecillo. México.
- Kohashi S., J., J.C. Da Costa y S. Miranda C. 1980. Harvest index in *Phaseolus vulgaris* L. *Ann. Rep. Bean Improv. Coop.* 23: 87-89.
- Mengel, K. y E.A. Kirkby. 1978. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Berne, Switzerland.
- Nielsen, D.C. y N.O. Nelson. 1998. Black bean sensitivity to water stress at various growth stages. *Crop Sci.* 38: 422-427.
- Ortiz J., R. de J., J. Kohashi S., J.A.S. Escalante E. y G. Baca C. 1994. Effect of nitrogen deprivation upon the yield and its components in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Ann. Rep. Bean Improv. Coop.* 37: 171-172.
- Penningsfeld, F. y P. Kurzmann. 1975. Cultivos hidropónicos y en turba. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Piggott, T.J. 1986. Vegetable crops. (Bean, *Phaseolus vulgaris* L.). pp. 151-154. In: Reuter, D.J. y J.B. Robinson (eds.). Plant analysis. An Interpretation Manual. Inkata Press. Melbourne, Sidney.
- Resh, H.M. 1987. Cultivos hidropónicos. Trad. al español por J. Santos Caffarena. 2a ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 1994. Fisiología vegetal. Trad. al español por V. González Velásquez. 4a ed. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F.
- SAS Institute. 1988. SAS/STAT user's guide. Release 6.03. Cary, NC.
- Schwarz, M. 1975. Guide to commercial hydroponics. Israel Universities Press. Jerusalem, Israel.
- Schwarz, M. 1995. Soilless culture management. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg, Germany.
- Siqueira, P.R. y E. Palacios V. 1985. Función de respuesta del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) a variaciones de humedad del suelo en tres etapas fenológicas y aspectos fisiológicos. *Agrociencia* 59: 39-54.
- Steiner, A.A. 1969. The principal differences between culture with and without soil. Proceeding of the Congress the Palmas. IWOSC. p. 81-85.
- Steiner, A.A. 1984. The Universal Nutrient Solution. Proceedings of the 6<sup>th</sup> Internat. Congress on Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands. ISOSC. p. 633-649.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 1998. Plant physiology. 2nd ed. Sinauer Associates, Publishers. Sunderland, MA.
- Yoshida, S. 1972. Physiological aspects of grain yield. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 23: 437-464.

# TOLERANCIA DE TUBÉRCULOS DE PAPA cv. Alpha EN ETAPA DE BROTACIÓN A CONDICIONES DE SALINIDAD

## Tolerance of Potato Tubers cv. Alpha in Sprouting Stage to Salinity Stress

E. Sánchez-Bernal<sup>1†</sup>, M. Ortega-Escobar<sup>1§</sup>, V. González-Hernández<sup>1</sup>, G. Ruelas-Angeles<sup>1</sup>, J. Kohashi-Shibata<sup>1</sup> y N. García-Calderón<sup>2</sup>

### RESUMEN

En macetas experimentales, se estudió la tolerancia en fase de brotación de tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, al estrés inducido por soluciones de sales puras NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O y MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O a concentraciones de 0.00, 1.13, 2.48, 3.84, 5.19, 6.40 y 9.60 g L<sup>-1</sup>. Los resultados indican una respuesta diferencial de la brotación y del desarrollo de brotes de tubérculos de acuerdo con el tipo de sal y con la concentración. El porcentaje de brotes emergidos aumentó con el tiempo en todos los casos y el promedio de peso seco de raíz y parte aérea de los brotes formados disminuyó al aumentar la concentración salina. Las sales experimentadas disminuyeron el promedio porcentual total de brotes emergidos como sigue: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> < MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O < MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O < NaHCO<sub>3</sub> < NaCl < CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, y el promedio de peso seco total de brotes en el siguiente orden: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> < CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O < NaCl < MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O < MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O < NaHCO<sub>3</sub>. El mayor porcentaje de brotes emergidos lo registró el tratamiento de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con 89.55% y el menor porcentaje el tratamiento de CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O con 74.36%. Los datos también revelan que, en todos los casos, los brotes acumularon más biomasa en la raíz que en la parte aérea y que los brotes de tubérculos en la fase de acumulación de biomasa de raíz y parte aérea pueden considerarse como sensibles a las sales NaHCO<sub>3</sub> y MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, ya que presentaron su máxima acumulación de biomasa a una concentración de 1.13 g L<sup>-1</sup>, moderadamente sensibles a NaCl y MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, ya que la máxima acumulación de biomasa se registró a

2.48 g L<sup>-1</sup>, moderadamente tolerantes a Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ya que su máxima acumulación de biomasa se presentó a 3.84 g L<sup>-1</sup> y tolerantes a CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, debido a que la máxima acumulación de biomasa se presentó a 6.40 g L<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** *Solanum tuberosum* L., soluciones salinas, estrés salino, conductividad eléctrica, potencial osmótico, biomasa.

### SUMMARY

In experimental plots, the tolerance of sprouting potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha to stress induced by salt solutions of NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, and MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, at different concentrations (0.00, 1.13, 2.48, 3.84, 5.19, 6.40, and 9.60 g L<sup>-1</sup>) was studied. Results showed a differential response in sprout emergence and seedling growth in accordance with salt treatment and concentration. In all cases, the emergence rate of sprouts increased with time and the average dry weight of roots and shoot decreased as salinity increased; salt treatments decreased the total sprouting rate in the following order: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> < MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O < MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O < NaHCO<sub>3</sub> < NaCl < CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, and the total average dry weight of sprouts in this order: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> < CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O < NaCl < MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O < MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O < NaHCO<sub>3</sub>. The highest rate of sprouting was found in the Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> treatment with 89.55% and the lowest rate in the CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O treatment with 74.36%. The data also show that in all cases the sprouts accumulated more biomass in root than in shoot and that the sprouts of potato tubers in this stage can be considered sensitive to NaHCO<sub>3</sub> and MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O since at a concentration of 1.13 g L<sup>-1</sup> the highest accumulation of biomass was registered; they were moderately sensitive to NaCl and MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O since the maximum accumulation of biomass was registered at 2.48 g L<sup>-1</sup>, moderately tolerant to Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> because the highest accumulation of biomass occurred with 3.84 g L<sup>-1</sup>, and tolerant to CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O since the

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Km 36.5 carretera México-Texcoco, 56230 Montecillo, estado de México. <sup>†</sup> Autor responsable. <sup>§</sup> (manueloe@colpos.colpos.mx)  
<sup>2</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510 México, D.F. (negc@hp.fciencias.unam.mx)

maximum accumulation of biomass was registered at  $6.40 \text{ g L}^{-1}$ .

**Index words:** *Solanum tuberosum L.*, salt solutions, stress, electric conductivity, osmotic potential, biomass.

## INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum L.*) es el cuarto cultivo más importante en el orbe. Su capacidad de distribución espacial desde el nivel del mar hasta alturas superiores a 3500 m, su adaptación a diferentes climas y suelos, la riqueza nutrimental del tubérculo (gran contenido proteico, vitaminas, minerales y elementos traza), su alto rendimiento y valor económico por unidad de superficie cultivada, son características que sustentan su producción en 130 países. En este contexto, México es un país productor de papa, destinando 72 000 ha para su cultivo, con una producción media anual de 1 213 000 Mg, con un rendimiento promedio de  $14 \text{ Mg ha}^{-1}$  se logran en condiciones de temporal y de  $30 \text{ Mg ha}^{-1}$  en condiciones de riego (FAO, 1990).

El cultivo de papa se ha convertido en el principal cultivo hortícola de invierno en muchas zonas áridas y semiáridas con irrigación de México. En dichas áreas, 60% de los suelos presentan problemas de salinidad y las aguas utilizadas en la agricultura incrementan cada vez más su concentración salina, con el riesgo de que la papa disminuya su frontera de cultivo y potencial productivo, debido al aumento de la concentración de sales en el espesor de suelo donde se desarrollan los tubérculos y las raíces de la planta. Por ello, es de gran interés investigar el comportamiento del cultivo cuando se somete a condiciones de estrés salino, sus niveles de tolerancia a sales en cada etapa de crecimiento y su rendimiento.

Las observaciones de Bernstein (1964) indican que esta hortaliza es moderadamente sensible a salinidad, pues a conductividades de 3 a  $6 \text{ dS m}^{-1}$  de soluciones de cloruro de sodio reduce drásticamente su rendimiento; no obstante, la tolerancia depende de la variedad. Levy (1992) examinó la tolerancia a sales de 14 cultivares de papa sometidas a soluciones salinas de cloruro de sodio y cloruro de calcio con conductividad eléctrica de 6.1 a  $6.9 \text{ dS m}^{-1}$  y reportó que la salinidad retardó la emergencia de plántulas, redujo el crecimiento de tallos y tubérculos y retardó la maduración. En este caso, las variedades tempranas fueron más tolerantes a la salinidad. Martínez *et al.*

(1996) señalaron que cv. Alpha es sensible a la salinidad, sin embargo, se desconoce su respuesta a distintos tipos de sales en crecimiento y desarrollo.

El presente trabajo pretende analizar la emergencia y acumulación de biomasa de brotes de tubérculos cv. Alpha en diversas condiciones de salinidad cualitativa y cuantitativa, utilizando seis sales puras: NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O y MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, y siete concentraciones 0.00, 1.13, 2.48, 3.84, 5.19, 6.40 y  $9.60 \text{ g L}^{-1}$  y, en consecuencia, obtener un mejor conocimiento de la tolerancia de los brotes de tubérculos en estas condiciones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En invernadero, los tubérculos de papa (*Solanum tuberosum L.*) cv. Alpha se plantaron en macetas experimentales de plástico, conteniendo 10 kg de agrolita uniformemente distribuida, y cubiertas con una capa de 2 cm de espesor de tezontle. La densidad de plantación fue de tres tubérculos por maceta. A cada maceta se aplicó un volumen de 2 L de solución salina conforme los tratamientos establecidos, diseñados como experimentos independientes; se utilizaron seis sales puras (una por tratamiento): NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O y MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O. Se estableció un testigo o control (C<sub>0</sub>) con agua destilada y seis niveles de salinidad con concentraciones de 1.13, 2.48, 3.84, 5.19, 6.40 y  $9.60 \text{ g L}^{-1}$ , que teóricamente corresponden a conductividades eléctricas teóricas en la solución de 1.77, 3.88, 6.00, 8.11, 10.00 y  $15.00 \text{ dS m}^{-1}$ , respectivamente, y que, de acuerdo con lo señalado por Maas y Hoffman (1977), tienden a disminuir la brotación en el orden de 0% (C<sub>1</sub>), 25% (C<sub>2</sub>), 50% (C<sub>3</sub>), 75% (C<sub>4</sub>), 100% (C<sub>5</sub>) y 150% (C<sub>6</sub>).

Las soluciones se prepararon en laboratorio, se determinó su pH con un potenciómetro Beckman, la conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) con un conductímetro o puente de Wheatstone y el potencial osmótico  $\Psi\pi$  (MPa) con un osmómetro Vapro Wescor 5520. El riego consistió en la reposición de agua consumida por evapotranspiración cada tercer día, a fin de mantener las unidades experimentales a peso constante; la temperatura del invernadero osciló entre 13 y 25 °C. El experimento tuvo una duración de dos meses (del 30 de mayo al 30 de julio de 2000), período en el cual la fisiología de la planta de papa inicia la etapa de tuberización (Rousselle y Robert, 1996). Durante este lapso se hicieron observaciones

del número de días a la emergencia de brotes, del número de brotes formados, de la altura de plantas y del número de hojas por plántula. Finalmente, los brotes y las plántulas se cosecharon, separando la raíz y la parte aérea de los tubérculos, y se realizaron determinaciones de peso fresco y peso seco. El porcentaje de brotación se obtuvo considerando un total de tres brotes por tubérculo, es decir, nueve brotes por maceta, y se establecieron tres réplicas por cada tratamiento. Los datos colectados se agruparon en fechas de brotación a 30, 40, 50 y 60 días, así la brotación total se registró de manera acumulada, en forma similar al método empleado por Ayers y Hayward en 1948. Un brote de papa emergido se definió como aquel tallo visible inmediatamente arriba del substrato (Moorby y Milthorpe, 1983). Se calibró un modelo lineal de predicción del peso seco total de brotes (PST) en función de la conductividad eléctrica de las soluciones, mediante la ecuación:

$$y = A + Bx$$

Donde:  $y$  = peso seco total de brotes (g),  $A$  = ordenada al origen,  $B$  = pendiente de la recta o número de unidades (g) que disminuye el PST por unidad de incremento de la CE en la solución,  $x$  = CE de la solución ( $\text{dS m}^{-1}$ ).

Los análisis de regresión lineal y de varianza para determinar diferencias significativas con  $P < 0.05$ , se efectuaron mediante el sistema de análisis estadístico SAS (SAS Institute, 1996).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efecto de la Salinidad en la Conductividad Eléctrica y en el Potencial Osmótico de las Soluciones

Los datos del Cuadro 1 indican que la conductividad eléctrica (CE) de las soluciones de acuerdo con el tipo de sal presentó el siguiente orden:  $\text{NaCl} > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{NaHCO}_3 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . La sal  $\text{NaCl}$  registró los valores más altos de CE y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  los más bajos, de manera que el comportamiento de los valores de CE está en relación directa con la concentración de sales; al aumentar la concentración, se incrementa la CE en una magnitud que depende del tipo de sal de acuerdo con el orden indicado. Por ejemplo, la sal  $\text{NaCl}$  se constituye por iones monovalentes de alto radio de hidratación y bajo

coeficiente energético iónico por lo cual son muy móviles, generando mayor conductancia. No sucede lo mismo con la sal  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  cuyos iones divalentes son menos móviles y, por lo tanto, disminuye su capacidad de conductancia eléctrica. Las diferencias de CE producidas por el tipo de sal y concentración guardan estrecha relación con el comportamiento del potencial osmótico producido por cada sal.

Los datos del Cuadro 1 también revelan que cada sal generó, en la solución, un potencial osmótico distinto que disminuyó conforme se incrementó la concentración salina en el orden siguiente:  $\text{NaCl} > \text{NaHCO}_3 > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . La diferencia del potencial osmótico producido por las sales a una misma concentración obedece al peso molecular, grado de ionización y coeficiente osmótico de cada soluto (Keenan *et al.*, 1990) y reviste gran importancia en la especificación de sales que tienen un mayor efecto osmótico o un mayor efecto tóxico, lo cual incidió en la brotación y en el crecimiento de plántulas de papa.

### Efecto del Tipo de Sal y su Concentración en la Emergencia de Brotes del Tubérculo

En el Cuadro 1, se observa que la emergencia de brotes de tubérculos de papa aumentó con el tiempo en todos los casos. Según Levy (1992), este retraso en la emergencia se debe al estrés osmótico y tóxico a que se sometieron los tubérculos por la solución salina, ya que, al inicio se presenta un desbalance hídrico al interior del órgano vegetal y una excesiva absorción de iones tóxicos que inhiben procesos enzimáticos importantes, como la síntesis de nitrato reductasa y de poliaminas, esenciales para que el tejido seminal promueva la germinación o brotación. Esto coincide con lo señalado por Moorby y Milthorpe (1983), quienes indicaron que tubérculos de papa sometidos a estrés hídrico incrementan la tasa de descomposición de proteínas, lo que restringe el crecimiento y la emergencia de brotes; es decir, el sistema se ve retardado directa o indirectamente a causa del déficit de agua. Una vez que los tubérculos son capaces de adecuarse a este cambio osmótico mediante la regulación de su régimen hídrico y el aprovechamiento al máximo de sus sustancias de reserva, mecanismos considerados como de tolerancia al estrés, entonces incentivan su brotación para continuar su ciclo de vida; esta adaptación al estrés salino requiere tiempo.

**Cuadro 1. Efecto de seis sales puras (NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O y MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O), en la conductividad eléctrica (CE), pH y potencial osmótico de la solución de macetas experimentales y en el porcentaje de brotes emergidos de tubérculos de papa.**

Sal	Concentración solución	CE solución	pH solución	Potencial osmótico solución ( $\Psi\pi$ )	Porcentaje de brotes emergidos			
					30 días	40 días	50 días	60 días
	g L <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>		MPa				
NaCl	0.00 <sup>†</sup>	0.00	7.20	0.00	29.33	58.66	80.66	87.99 a
	1.13	2.20	6.04	-0.15	11.00	44.00	58.66	69.66 a
	2.48	4.20	5.94	-0.22	11.00	11.00	58.00	72.66 a
	3.84	6.40	5.92	-0.28	3.66	40.32	73.32	91.65 a
	5.19	8.60	5.88	-0.34	0.00	7.30	54.96	76.96 a
	6.40	10.50	5.84	-0.48	0.00	7.33	51.30	69.63 a
	9.60	15.40	5.82	-0.68	22.00	25.66	36.66	76.99 a
NaHCO <sub>3</sub>	0.00	0.00	7.20	0.00	14.66	43.99	73.32	76.98 a
	1.13	1.30	8.91	-0.15	11.00	33.00	58.66	69.66 a
	2.48	2.50	8.96	-0.19	3.66	14.66	36.66	62.32 a
	3.84	3.60	8.95	-0.21	3.66	43.99	80.65	95.31 a
	5.19	4.80	8.93	-0.25	11.00	11.00	44.00	69.66 a
	6.40	5.50	8.91	-0.29	0.00	11.00	55.00	77.00 a
	9.60	8.80	8.90	-0.43	0.00	14.66	32.99	95.32 a
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.00	0.00	7.20	0.00	22.00	58.66	62.32	76.98 a
	1.13	1.90	6.10	-0.12	14.66	40.32	54.98	76.98 a
	2.48	3.40	6.07	-0.14	11.00	25.66	65.99	76.99 a
	3.84	4.90	6.12	-0.17	22.00	36.66	91.66	98.99 a
	5.19	6.40	6.05	-0.22	11.00	73.33	91.66	98.99 a
	6.40	7.50	6.06	-0.24	0.00	47.66	87.99	98.99 a
	9.60	10.90	6.08	-0.36	11.00	58.66	95.32	98.98 a
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.00	0.00	7.20	0.00	3.66	29.32	65.98	87.98 a
	1.13	1.80	5.58	-0.12	22.00	36.66	54.99	58.65 a
	2.48	3.50	5.56	-0.16	14.66	65.99	76.99	80.65 a
	3.84	5.10	5.60	-0.20	3.66	47.66	62.32	62.32 a
	5.19	6.90	5.52	-0.22	3.66	36.66	47.66	62.32 a
	6.40	8.20	5.56	-0.27	14.66	47.66	54.99	87.99 a
	9.60	12.20	5.43	-0.37	0.00	44.00	66.00	80.66 a
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.00	0.00	7.20	0.00	11.00	51.33	62.33	84.33 a
	1.13	1.30	5.98	-0.12	0.00	47.66	51.32	76.98 a
	2.48	2.30	5.78	-0.14	25.66	73.32	73.32	98.98 a
	3.84	3.70	5.76	-0.17	0.00	44.00	51.33	58.66 a
	5.19	4.70	5.60	-0.19	25.66	69.66	91.66	98.99 a
	6.40	5.90	5.59	-0.21	3.66	32.99	87.99	98.99 a
	9.60	8.30	5.47	-0.28	14.66	76.99	91.65	91.65 a
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.00	0.00	7.20	0.00	7.33	73.33	87.99	98.99 a
	1.13	0.90	6.01	-0.13	11.00	22.00	44.00	62.33 a
	2.48	1.60	6.00	-0.14	18.33	51.66	69.99	77.32 a
	3.84	2.20	5.93	-0.14	22.00	25.66	73.32	98.98 a
	5.19	2.80	5.91	-0.14	0.00	22.00	55.00	66.00 a
	6.40	3.30	5.92	-0.16	14.66	43.99	58.65	80.65 a
	9.60	4.50	5.95	-0.19	3.66	3.66	47.66	84.32 a

<sup>†</sup> 0.00 g L<sup>-1</sup> = testigo o control con agua destilada. Nota: medias con la misma letra no son significativamente diferentes ( $\alpha = 0.05$ ; Pr > F = 0.1777 entre tratamientos y Pr > F = 0.1385 entre concentraciones).

La inferencia estadística indica que la emergencia de brotes no presentó diferencia significativa entre tratamientos y concentraciones, lo que obedece a la alteración fisiológica de los tubérculos semilla como consecuencia del efecto osmótico y tóxico de las sales, alteración íntimamente ligada con la madurez fisiológica de la semilla. Los tubérculos con menos dormancia produjeron mayores porcentajes de emergencia de brotes debido al efecto nutritivo inicial de las soluciones salinas, mientras que los tubérculos con más madurez fisiológica aumentaron su período de latencia, debido a la alteración de procesos bioquímicos y niveles hormonales por la salinidad (Strogonov, 1964; Moorby y Milthorpe, 1983). Esto explica los altibajos en dicho porcentaje entre tratamientos y concentraciones de 30 a 50 días después de la siembra (dds). En el periodo de 50 a 60 dds, se presentó el fenómeno de pérdida de dominancia apical de la yema terminal del tubérculo que consiste en que el brote apical inhibe su crecimiento por efectos de estrés hídrico y se estimula el crecimiento de las yemas subsiguientes, generando una brotación múltiple con brotes raquíuticos. Este efecto fue más intenso en las sales de gran solubilidad y toxicidad a altas concentraciones; en consecuencia, los porcentajes de emergencia fueron próximos entre tratamientos y grado de salinidad, razón por la cual el análisis estadístico no reporta diferencias significativas.

Independientemente del análisis estadístico, se empleó el análisis porcentual como medida aritmética de comparación de datos (Ayers y Hayward, 1948), lo que permitió determinar una respuesta diferencial entre tipos de sal y concentraciones. El mayor porcentaje en promedio de emergencia de brotes lo registró el tratamiento de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (89.55%) y el menor porcentaje el tratamiento de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (74.36%); sin embargo, este último presentó los brotes más vigorosos. Entre concentraciones tal diferencia de brotación se manifestó de acuerdo con el grado de salinidad y con el tipo de sal, así en los tratamientos  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , se observan incrementos en el porcentaje de brotación total de 3.84 a 9.60  $\text{g L}^{-1}$ , en tanto que la brotación en el tratamiento con la sal  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , manifestó un comportamiento más consistente de 2.48 a 9.60  $\text{g L}^{-1}$ .

Con relación al porcentaje total de emergencia de brotes (60 dds), las sales que disminuyeron dicho porcentaje con respecto al testigo fueron  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  con 14.67%,  $\text{NaCl}$  con 11% y

$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  con 7.32%; por el contrario, las sales que incrementaron el porcentaje de emergencia de brotes con respecto al testigo aun a concentraciones de 6.40 y 9.60  $\text{g L}^{-1}$  fueron las de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  con 22%, de  $\text{NaHCO}_3$  con 18.34% y de  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  con 7.32%. El tratamiento más homogéneo fue el de soluciones de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  que, junto con el de  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , mostró más consistencia que el resto al promover una emergencia de brotes cercana a 90% entre 30 y 60 dds. La concentración que más favoreció el porcentaje de brotación total fue la de 3.84  $\text{g L}^{-1}$  para las sales  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , mientras que el mejor porcentaje de emergencia de brotes para las sales  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se registró entre 3.84 y 6.40  $\text{g L}^{-1}$ .

Los tratamientos  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , sales de gran solubilidad y toxicidad en las plantas, favorecieron porcentajes de brotación mayores que los generados por las sales  $\text{NaCl}$  y  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  de efecto puramente osmótico; sin embargo, el hecho de que las tres primeras sales hayan producido mayores porcentajes de brotación, no implica que se formaran brotes normales. Por el contrario, a concentraciones de 5.19, 6.40 y 9.60  $\text{g L}^{-1}$  estas sales provocaron en los tubérculos una brotación copiosa, pero con brotes raquíuticos, cloróticos y con marcada inhibición en su crecimiento y desarrollo. Moorby y Milthorpe (1983) señalaron que un efecto del estrés térmico e hídrico en los tubérculos de papa es la pérdida de dominancia apical de la yema terminal, ya que inhibe su crecimiento, provocando que el resto de las yemas subsiguientes en estado latente reasuman su crecimiento sin que se restablezca dicha dominancia, lo que produce una competencia intensa de efectos negativos. Esto evidencia el comportamiento de la tasa de brotación de tubérculos sometidos a dichas sales. Aunado a lo anterior, en algunos casos, como en el tratamiento  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  a una concentración de 9.60  $\text{g L}^{-1}$ , se desarrollaron plantas enanas con hojas micrófilas, lo que puede considerarse como una tendencia al haloxerismo en respuesta de los brotes al estrés salino. Para Poljakoff y Lerner (1994), éste es un mecanismo de las plantas no halófitas para tolerar la salinidad, de hecho, como lo señaló Jacoby (1994), una gran absorción iónica puede provocar que el organismo vegetal o el órgano incentive sus procesos metabólicos y enzimáticos a fin de promover un rápido crecimiento poco sostenido para evadir la salinidad.

Con relación a la tolerancia a la salinidad, entendida por Shannon y Griene (1999) como la

capacidad de un genotipo vegetal para crecer y desarrollarse aun en condiciones de estrés salino, sin una severa disminución de su tasa de crecimiento, se infiere que en cuanto a la emergencia de brotes normales que dieron origen a plántulas estructuralmente bien definidas, los tubérculos deben ser considerados de moderadamente sensibles (para  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), a moderadamente tolerantes (para  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), pues produjeron brotes normales con concentraciones de 1.13 a 3.84  $\text{g L}^{-1}$ , mientras que para  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  los tubérculos deben considerarse como tolerantes, ya que produjeron brotes normales con una concentración de 6.40  $\text{g L}^{-1}$ ; después de tales concentraciones, los brotes emergidos en los tratamientos mencionados en primer término fueron múltiples, raquíuticos y con quemaduras en el ápice, algunos de los cuales dieron origen a plantas enanas con hojas micrófilas.

#### Efectos de la Concentración Salina en el Peso Seco de Raíz y Parte Aérea

Los datos del Cuadro 2 presentan una tendencia general de las sales a disminuir el peso seco de raíz y de parte aérea de los brotes conforme aumenta la concentración, efecto que difiere de acuerdo con la naturaleza de la sal y grado de salinidad. El análisis de varianza indica que entre tratamientos,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  fue el más sobresaliente, pues produjo la menor reducción del promedio de peso seco de ambas secciones del brote. En contraste,  $\text{NaHCO}_3$  registró la mayor reducción, existiendo diferencia significativa entre ellos; el resto de los tratamientos son estadísticamente iguales. El orden de reducción del promedio de peso seco de raíz es el siguiente:  $\text{NaHCO}_3 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} > \text{NaCl} > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4$  y el del promedio de peso seco de la parte aérea presenta la secuencia:  $\text{NaHCO}_3 > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} > \text{NaCl} > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4$ . Entre concentraciones, las que menos redujeron el promedio de peso seco, tanto de raíz, como de parte aérea oscilan en el intervalo de 0 a 2.48  $\text{g L}^{-1}$ , mientras que las de 3.84 a 9.60  $\text{g L}^{-1}$  produjeron la mayor reducción; es decir, la diferencia significativa para el promedio de peso seco de raíz se establece a partir de 3.84  $\text{g L}^{-1}$  y el de la parte aérea se registra desde 6.40  $\text{g L}^{-1}$ . Las sales  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , son las que más disminuyeron el peso seco de raíz y parte aérea.

La tendencia de los órganos vegetales a disminuir su acumulación de biomasa conforme aumenta la

concentración salina obedece al efecto osmótico y tóxico de las sales que deshidrata el protoplasma celular, inhibe la síntesis de proteínas y enzimas promotoras del crecimiento y disminuye el flujo de sustancias nitrogenadas y de carbohidratos hacia las zonas meristemáticas, limitando su crecimiento (Strogonov, 1964). La disminución del crecimiento depende de la concentración, así como del tiempo de exposición al estrés y es más intensa en sales de gran efecto osmótico, como  $\text{NaCl}$ , y en sales sumamente tóxicas, como  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; en el caso de la sal bicarbonatada, el efecto obedece a procesos de hidrólisis alcalina que destruyen tejidos de crecimiento, mientras que en  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  la disminución del crecimiento se debe a la toxicidad de iones específicos (Ortega, 1993).

En cuanto a la proporción de biomasa acumulada en raíz y parte aérea, se observa que, en los seis tratamientos, la mayor parte de la biomasa (aproximadamente 60 a 80%) se encuentra en la raíz, dependiendo del tipo de sal; así, en  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , este órgano aumentó su proporción de biomasa acumulada de 67.41 a 75.58%, 81.92 y 90.16%, respectivamente, al pasar de 0 a 9.60  $\text{g L}^{-1}$ , estas tres sales de gran solubilidad promovieron una mayor proporción de biomasa en la raíz a altas concentraciones (3.84 a 9.60  $\text{g L}^{-1}$ ). Por su parte, los tratamientos de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  también incrementaron la proporción de biomasa en la raíz en el intervalo de concentración citado, de 67.41 a 79.45% y 71.52%, respectivamente; su máxima proporción de acumulación la registraron a 9.60  $\text{g L}^{-1}$ . El tratamiento de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  registró la menor proporción de biomasa en la raíz, pues su porcentaje máximo fue de 72.61 a una concentración de 2.48  $\text{g L}^{-1}$ , este porcentaje disminuyó a 62.63 en la concentración de 9.60  $\text{g L}^{-1}$ .

La tendencia de la raíz a acumular más biomasa que la parte aérea en condiciones de estrés salino, ha sido reportada por Poljakoff y Lerner (1994), quienes indicaron que la salinidad induce inhibición del crecimiento y, en muchos casos, el tallo es más afectado que la raíz, incluso en muchas de las plantas estudiadas *glycophytas* y *halophytas*, el efecto de la salinidad sobre el crecimiento de la raíz es una función de la concentración salina. Algunas concentraciones pueden estimular el crecimiento de dicho órgano, mientras que inhiben el crecimiento del tallo; este fue el caso de plantas de chícharo las cuales, después de someterse cinco días a una solución de 120 mM de  $\text{NaCl}$ , incrementaron su

Cuadro 2. Efecto de la concentración de seis sales puras sobre el peso seco de raíz y parte aérea de brotes de tubérculos de papa.

Sal	Concentración solución	Promedio peso seco raíz	Parámetros estadísticos	Promedio peso seco parte aérea	Parámetros estadísticos	Peso seco total	Parámetros estadísticos
	g L <sup>-1</sup>	g		g		g	
Testigo (A <sup>1,2,3</sup> )	0.00	1.21 a <sup>4</sup>		0.58 a <sup>5</sup>		1.80 a <sup>6</sup>	
NaCl (BA <sup>1,2</sup> , BAC <sup>3</sup> )	1.13	1.11 ba	$\sigma = 0.06$	0.60 ba	$\sigma = 0.19$	1.72 ba	$\sigma = 0.38$
	2.48	1.23 ba	Error = 0.10	0.47 ba	Error = 0.12	1.70 bac	Error = 0.17
	3.84	1.04 bc*	M = 0.99	0.20 ba	M = 0.34	1.24 bdc*	M = 1.34
	5.19	0.97 bc*	CV = 6.46%	0.18 ba	CV = 57.52%	1.15 bdc*	CV = 28.97%
	6.40	0.71 c*		0.15 b*		0.87 dc*	
NaHCO <sub>3</sub> (B <sup>1,2</sup> , C <sup>3</sup> )*	9.60	0.72 c*		0.23 b*		0.95 d*	
	1.13	1.07 ba	$\sigma = 0.22$	0.33 ba	$\sigma = 0.18$	1.40 ba	$\sigma = 0.39$
	2.48	0.97 ba	Error = 0.10	0.12 ba	Error = 0.15	1.09 bac	Error = 0.22
	3.84	0.91 bc*	M = 0.88	0.43 ba	M = 0.26	1.34 bdc*	M = 1.51
	5.19	0.78 bc*	CV = 25.50%	0.18 ba	CV = 70.19%	0.95 bdc*	CV = 25.90%
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (A <sup>1,2,3</sup> )	6.40	0.57 c*		0.08 b*		0.65 dc*	
	9.60	0.67 c*		0.14 b*		0.82 d*	
	1.13	1.38 ba	$\sigma = 0.19$	0.61 ba	$\sigma = 0.09$	2.00 ba	$\sigma = 0.27$
	2.48	1.10 ba	Error = 0.12	0.41 ba	Error = 0.10	1.51 bac	Error = 0.21
	3.84	1.28 bc*	M = 1.12	0.69 ba	M = 0.53	1.98 bdc*	M = 1.66
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O (BA <sup>1,3</sup> , A <sup>2</sup> )	5.19	1.18 bc*	CV = 17.62%	0.49 ba	CV = 18.39%	1.68 bdc*	CV = 16.65%
	6.40	0.89 c*		0.45 b*		1.35 dc*	
	9.60	0.84 c*		0.50 b*		1.34 d*	
	1.13	1.10 ba	$\sigma = 0.17$	0.40 ba	$\sigma = 0.14$	1.50 ba	$\sigma = 0.21$
	2.48	1.16 ba	Error = 0.19	0.45 ba	Error = 0.15	1.62 bac	Error = 0.22
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (BA <sup>1,2</sup> , BAC <sup>3</sup> )	3.84	0.92 bc*	M = 1.04	0.51 ba	M = 0.50	1.44 bdc*	M = 1.55
	5.19	0.70 bc*	CV = 16.98%	0.55 ba	CV = 28.48%	1.25 bdc*	CV = 13.54%
	6.40	1.09 c*		0.74 b*		1.84 dc*	
	9.60	1.14 c*		0.29 b*		1.44 d*	
	1.13	0.90 ba	$\sigma = 0.21$	0.48 ba	$\sigma = 0.13$	1.39 ba	$\sigma = 0.30$
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (BA <sup>1</sup> , B <sup>2*</sup> , BC <sup>3*</sup> )	2.48	1.13 ba	Error = 0.18	0.37 ba	Error = 0.12	1.51 bac	Error = 0.24
	3.84	0.62 bc*	M = 0.90	0.40 ba	M = 0.43	1.02 bdc*	M = 1.34
	5.19	0.94 bc*	CV = 23.37%	0.63 ba	CV = 30.45%	1.57 bdc*	CV = 22.38%
	6.40	0.76 c*		0.29 b*		1.06 dc*	
	9.60	0.76 c*		0.30 b*		1.06 d*	
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (BA <sup>1</sup> , B <sup>2*</sup> , BC <sup>3*</sup> )	1.13	1.00 ba	$\sigma = 0.19$	0.54 ba	$\sigma = 0.20$	1.54 ba	$\sigma = 0.37$
	2.48	1.07 ba	Error = 0.11	0.32 ba	Error = 0.08	1.39 bac	Error = 0.15
	3.84	0.79 bc*	M = 0.92	0.20 ba	M = 0.28	1.00 bdc*	M = 1.21
	5.19	0.78 bc*	CV = 20.64%	0.15 ba	CV = 72.45%	0.94 bdc*	CV = 31.22%
	6.40	0.95 c*		0.12 b*		1.07 dc*	
9.60	0.66 c*		0.07 b*		0.73 d*		

<sup>1</sup> Prueba de medias entre tratamientos para la variable peso seco de raíz ( $Pr > F = 0.0211$ ). <sup>2</sup> Prueba de medias entre tratamientos para la variable peso seco de tallo ( $Pr > F = 0.0019$ ). <sup>3</sup> Prueba de medias entre tratamientos para la variable peso seco total ( $Pr > F = 0.0011$ ). <sup>4</sup> Prueba de medias entre concentraciones para la variable peso seco de raíz ( $Pr > F = 0.0001$ ); <sup>5</sup> Prueba de medias entre concentraciones para la variable peso seco del tallo ( $Pr > F = 0.0038$ ); <sup>6</sup> Prueba de medias entre concentraciones para la variable peso seco total ( $Pr > F = 0.0001$ ). Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey  $\alpha = 0.05$ ). (\*) Diferencia significativa.

longitud de raíz con respecto a las plantas control, pero tal tendencia disminuyó en el siguiente período. La elevada concentración de NaCl inhibió el crecimiento de la raíz, mientras que en tallo no se observó estímulo de crecimiento por la salinidad. Al respecto, Kafkafi y Bernstein (1996) señalaron evidencias de que a cierta salinidad se inhibe el crecimiento del tallo, el crecimiento de la raíz es

menos afectado, de manera que consideraron a la raíz más tolerante al estrés osmótico que al tallo. Por su parte, Levy (1992) indicó que algunas especies vegetales sometidas a estrés salino acumulan más biomasa en la raíz que en el tallo, como una forma de inducir a ésta para que localice espacios de menor concentración salina y, de esta manera, evadir el estrés; en todo caso, el objetivo es lograr la

supervivencia. El desbalance hormonal causado por la salinidad es también responsable de la distribución de biomasa en el vegetal.

En cuanto a la reducción de proporción de materia seca en la parte aérea, el tratamiento de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  la incrementó de 32.58 a 37.36% para la concentración de 0 a  $9.60 \text{ g L}^{-1}$ . En cambio, el resto de las sales sí provocaron una reducción en dicha proporción en el siguiente orden:  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  de 32.58 a 28.47%,  $\text{NaCl}$  de 32.58 a 24.42%,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  de 32.58 a 20.54%,  $\text{NaHCO}_3$  de 32.58 a 18.07% y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  de 32.58 a 9.83%, para la concentración señalada. Esto confirma que las sales  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  inhibieron en forma drástica la acumulación de materia seca en la parte aérea, así se considera que los brotes de tubérculos de papa son poco tolerantes a estas sales, las que, por su alta solubilidad, son excesivamente tóxicas y dañinas para las plantas (Ortega, 1993).

Con relación a la disminución del promedio de peso seco total de brotes, el análisis estadístico revela que los tratamientos sobresalientes (con menos reducción en dicho promedio conforme aumentó la concentración salina) fueron  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , siguiendo en ese orden  $\text{NaCl}$  y  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , los que estadísticamente son iguales; la diferencia mínima significativa se registró para  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NaHCO}_3$  que disminuyeron acentuadamente el peso seco total. Las concentraciones con menor disminución de peso seco total oscilan de 0 a  $2.48 \text{ g L}^{-1}$ , a medida que aumentó el grado de salinidad de  $3.84$  a  $9.60 \text{ g L}^{-1}$  (intervalo significativamente diferente), la disminución fue más pronunciada. Estos datos indican que la etapa de crecimiento de brotes de tubérculos es más afectada por las sales  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NaHCO}_3$  señaladas por su toxicidad, quedando en un lugar intermedio el efecto provocado por las sales  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , caracterizadas por su efecto osmótico. Se debe precisar que el hecho de que  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  haya producido un mayor incremento de la biomasa acumulada en raíz, obedece a que el calcio es un ion deficiente en los tubérculos de papa y, por ende, altamente requerido por éstos para aumentar su tasa de crecimiento (Davies y Millard, 1985). Finalmente, el tratamiento  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  fue el que mostró una mejor proporción de reducción de crecimiento entre raíz y parte aérea, de manera que los tubérculos sufrieron más estrés por el efecto tóxico que por el efecto osmótico de las sales.

El análisis estadístico de los datos del Cuadro 3 permitió determinar que los tratamientos con mayor

altura de plántulas y número de hojas por plántula fueron  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  que a concentraciones de  $1.13$  a  $3.84 \text{ g L}^{-1}$  permitieron la formación de plántulas de porte medio con buena arquitectura vegetal,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (plantas con 18 a 20 cm de altura y cuatro a seis hojas formadas),  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NaCl}$  (plantas de 18 a 25 cm de altura y ocho hojas formadas). Este intervalo de tolerancia fue más amplio en los brotes sometidos con  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , pues de  $5.19$  a  $9.60 \text{ g L}^{-1}$ , los brotes formaron plantas cuyo crecimiento y desarrollo alcanzaron la etapa de tuberización (ocho hojas fotosintéticamente activas). De esto se infiere que los tubérculos para estas sales y concentraciones tuvieron una buena capacidad de regulación osmótica. Delauney y Verma (1993) y Heuer y Nadler (1998) reportaron esta capacidad de los tubérculos y de las plantas de papa de proveerse de agua en condiciones salinas. En el caso de las plantas desarrolladas en el tratamiento  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , se considera que fue el suministro de calcio que favoreció el crecimiento, como lo indicaron Davies y Millard (1985).

La diferencia significativa con respecto a  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se presentó en  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NaHCO}_3$ , cuyos tubérculos brotaron formando plántulas de escasa altura (11 a 13 cm), raquílicas y cloróticas hasta una concentración de  $3.84 \text{ g L}^{-1}$ . Con concentraciones mayores, la inhibición del crecimiento y desarrollo de los brotes fue acentuada, producto de la toxicidad de dichas sales. Strogonov (1964) observó este efecto salino en el crecimiento en plantas de cebada, tomate y algodón; asimismo, Levy (1992) reportó la inhibición del crecimiento de brotes en condiciones salinas.

De acuerdo con lo señalado, se observa que, en cuanto al efecto producido por las sales  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , los brotes de tubérculos de papa en la fase de acumulación de biomasa de raíces y parte aérea pueden considerarse como sensibles a la salinidad, pues a una concentración de  $1.13 \text{ g L}^{-1}$  presentaron su máxima acumulación de biomasa. En cuanto al efecto producido por las sales  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NaCl}$ , los brotes deben considerarse como moderadamente sensibles, pues la máxima acumulación de biomasa se registró a  $2.48 \text{ g L}^{-1}$ . Por lo que se refiere a la sal  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , los brotes se consideran moderadamente tolerantes, ya que su máxima acumulación de biomasa se presentó a  $3.84 \text{ g L}^{-1}$  y por lo que respecta a la sal  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , los brotes se consideran tolerantes, ya que la máxima acumulación de biomasa se presentó a  $6.40 \text{ g L}^{-1}$ .

**Cuadro 3. Efecto de la concentración de seis sales puras en la altura de plántulas y número de hojas por plántula, provenientes de brotes de tubérculos de papa.**

Sal	Concentración solución	Promedio altura de plántulas	Parámetros estadísticos	Número de hojas	Parámetros estadísticos
	g L <sup>-1</sup>	cm			
Testigo	0.00	13.00		6	
NaCl (BA <sup>1,2</sup> )	1.13	18.00		8	$\sigma = 1$
	2.48	14.00	$\sigma = 4.99$	6	Error = 1.09
	3.84	25.00	Error = 5.45	8	M = 7
	5.19	20.00	M = 16.42	8	CV = 14.28%
	6.40	10.00	CV = 30.38%	6	
	9.60	15.00		7	
NaHCO <sub>3</sub> (C <sup>1,2</sup> )*	1.13	13.00	$\sigma = 6.60$	6	$\sigma = 2.88$
	2.48	13.50	Error = 3.37	5	Error = 1.37
	3.84	8.00	M = 6.78	4	M = 3
	5.19	0.00	CV = 97.34%	0	CV = 96%
	6.40	0.00		0	
	9.60	0.00		0	
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (BA <sup>1</sup> , A <sup>2</sup> )	1.13	13.00	$\sigma = 3.13$	8	$\sigma = 0.97$
	2.48	18.00	Error = 3.40	8	Error = 1.06
	3.84	20.00	M = 16.14	9	M = 7.57
	5.19	20.00	CV = 19.39%	8	CV = 12.81%
	6.40	15.00		7	
	9.60	14.00		7	
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O (A <sup>1,2</sup> )	1.13	14.00	$\sigma = 4.84$	5	$\sigma = 1.60$
	2.48	16.50	Error = 1.12	6	Error = 0.81
	3.84	19.00	M = 19.07	8	M = 7.28
	5.19	21.50	CV = 25.38%	8	CV = 21.97%
	6.40	24.00		9	
	9.60	25.50		9	
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (BAC <sup>1,2</sup> )	1.13	10.00	$\sigma = 4.18$	5	$\sigma = 1.46$
	2.48	15.00	Error = 4.38	6	Error = 0.93
	3.84	15.00	M = 12.92	5	M = 4.85
	5.19	20.00	CV = 32.35%	6	CV = 30.10%
	6.40	10.00		4	
	9.60	7.50		2	
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (BC <sup>1,2</sup> )*	1.13	12.00	$\sigma = 2.31$	6	$\sigma = 1.38$
	2.48	11.50	Error = 0.70	5	Error = 0.64
	3.84	10.00	M = 9.92	4	M = 4.28
	5.19	8.00	CV = 23.28%	3	CV = 32.24%
	6.40	8.00		3	
	9.60	7.00		3	

<sup>1</sup> Prueba de medias entre tratamientos para la variable altura de plantas ( $Pr > F = 0.002$ ); <sup>2</sup> Prueba de medias entre tratamientos para la variable número de hojas ( $Pr > F = 0.0001$ ).

Nota: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes. (Tukey  $\alpha = 0.05$ ).

(\*) Significancia estadística.

### Modelos de Predicción del Peso Seco Total de Brotes

Los modelos de calibración del peso seco total de brotes en función de la conductividad eléctrica de cada solución salina plasmados en el Cuadro 4, predicen que al aumentar la CE resultará una disminución del peso seco total de brotes, en el orden:

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> < CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O < NaCl < MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O < MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O < NaHCO<sub>3</sub>.

### Efecto del Potencial Osmótico de las Soluciones Salinas en el Peso Seco Total del Brote

En la Figura 1, se presenta el comportamiento del peso seco total de brotes en relación con el potencial

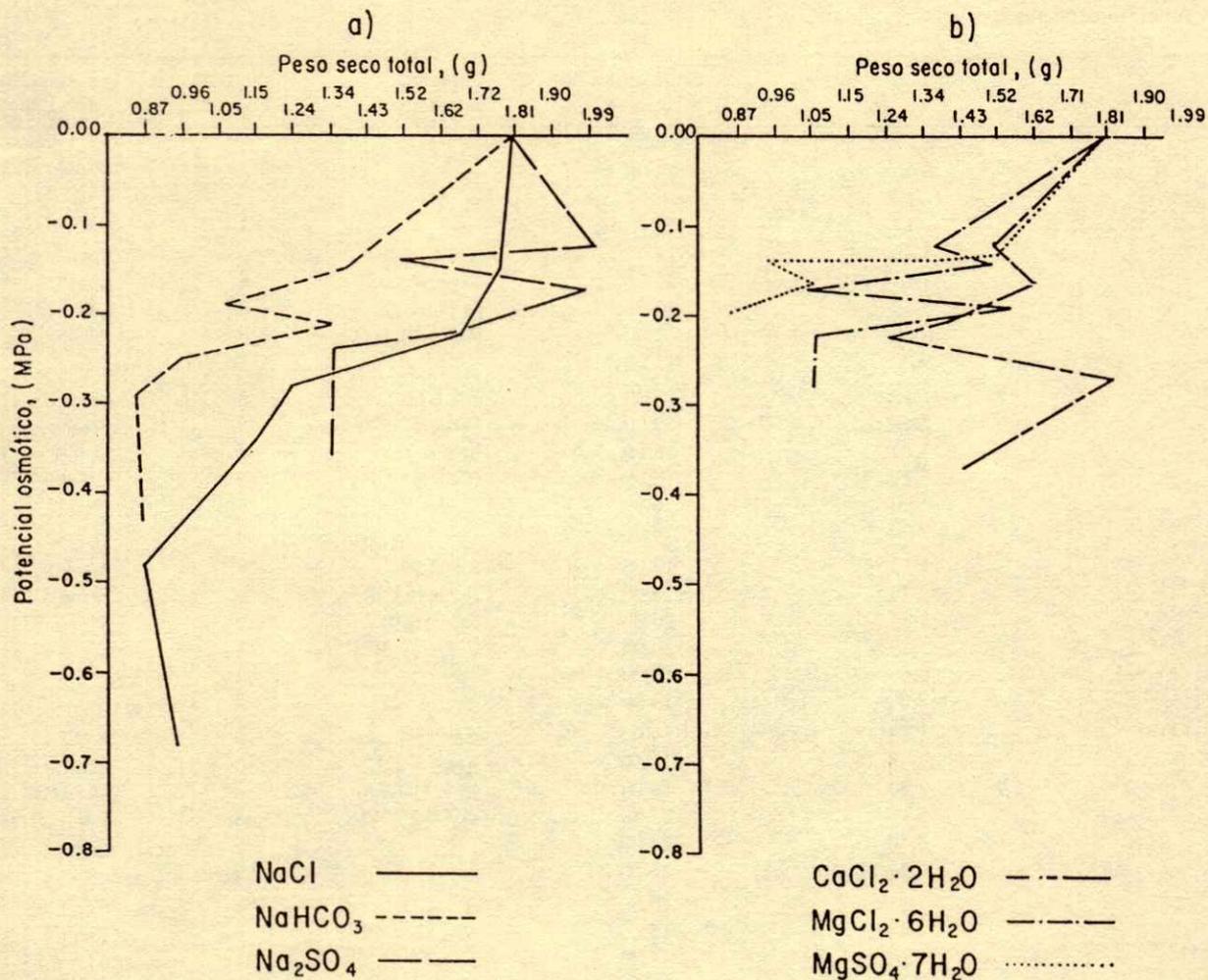


Figura 1. Efecto del potencial osmótico de soluciones salinas de: a) NaCl, NaHCO<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y b) CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O y MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, en el peso seco total de brotes de tubérculos de papa.

osmótico producido por cada sal y grado de salinidad, cuyo análisis indica que las sales que más disminuyeron el potencial osmótico y que produjeron una mayor reducción en dicho peso seco total a una concentración de 9.6 g L<sup>-1</sup>, respecto del testigo, fueron NaCl con 46.96% a un potencial osmótico de -0.68 MPa y NaHCO<sub>3</sub> con 54.22% a un potencial osmótico de -0.43 MPa, en tanto que las sales que disminuyeron de manera intermedia el potencial osmótico de la solución y que menos redujeron el porcentaje de peso seco total promedio de brotes a la concentración citada respecto del testigo, fueron Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con 25.51% a un potencial osmótico de -0.36 MPa y CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O con 19.95% a un potencial osmótico de -0.37 MPa. Las sales que menos redujeron el potencial osmótico, pero que produjeron una reducción drástica del porcentaje de peso seco

total, fueron MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O con 40.84% a un potencial osmótico de -0.28 MPa y MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O con 59.09% a un potencial osmótico de -0.19 MPa, es decir, el peso seco total de brotes fue más afectado por sales de efecto tóxico, que por sales de efecto osmótico.

Cuadro 4. Modelos para la determinación del peso seco total de brotes en función de la conductividad eléctrica de las diferentes soluciones salinas.

Sales	Ecuación	R	R <sup>2</sup>	CV
%				
NaCl	PST (g) = 1.78+(-0.10)CE	-0.91	0.83	28.97
NaHCO <sub>3</sub>	PST(g) = 1.56+(-0.10)CE	-0.84	0.71	25.90
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	PST (g) = 1.90+(-0.05)CE	-0.70	0.50	16.65
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	PST (g) = 1.63+(-0.01)CE	-0.29	0.08	13.54
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	PST (g) = 1.60+(-0.06)CE	-0.69	0.47	22.38
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	PST (g) = 1.64+(-0.10)CE	-0.92	0.85	31.22

## CONCLUSIONES

- Existe diferencia entre los valores de conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) para concentraciones equivalentes de las sales utilizadas de acuerdo con el siguiente orden:  $\text{NaCl} > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{NaHCO}_3 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . En todos los casos, se presenta una tendencia a incrementar los valores de conductividad eléctrica conforme aumenta la concentración salina.

- El potencial osmótico de las soluciones disminuyó conforme se incrementó la concentración salina, presentando el siguiente orden:  $\text{NaCl} > \text{NaHCO}_3 > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

- Los brotes manifestaron diferencias de tolerancia a sales en sus órganos; en todos los casos la raíz acumuló más biomasa que la parte aérea. Las sales  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NaCl}$  favorecieron una mayor acumulación de biomasa en raíz y parte aérea, en tanto que  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  fueron las que más inhibieron la acumulación de biomasa en ambas secciones, lo que indica que los brotes son más afectados por sales de efecto tóxico que por sales de efecto osmótico.

- En cuanto a la acumulación de biomasa de raíces y parte aérea, los brotes se consideran sensibles a las sales  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , ya que su máxima acumulación se dio a una concentración de  $1.13 \text{ g L}^{-1}$ , moderadamente sensibles a  $\text{NaCl}$  y  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , debido a que la máxima acumulación de biomasa se registró a  $2.48 \text{ g L}^{-1}$ , moderadamente tolerantes a  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ya que su máxima acumulación de biomasa se presentó a  $3.84 \text{ g L}^{-1}$  y tolerantes a  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en virtud de que la máxima acumulación de biomasa se generó a  $6.40 \text{ g L}^{-1}$ .

## LITERATURA CITADA

- Ayers, A.D. y H.E. Hayward. 1948. A method for measuring the effects of soil salinity on seed germination with observations on several crop plants. *Proc. Soil. Sci. Soc. Am.* 13: 224-226.
- Bernstein, L. 1964. Salt tolerance of plants. *Information Bull.* 283. US Department of Agriculture. Washington, DC
- Davies, H.V. y P. Millard. 1985. Fractionation and distribution of calcium in sprouting and non sprouting potato tubers. *Ann. Bot.* 56: 745-754.
- Delauney, J.A. y D.P. Verma. 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Journal Plant* 4: 215-223.
- FAO. Food and Agriculture Organization. 1990. Anuario FAO de la Producción. Rome, Italy.
- Heuer, B. y A. Nadler. 1998. Physiological response of potato plants to soil salinity and water deficit. *Plant Sci.* 137: 43-51.
- Jacoby, B. 1994. Mechanisms involved in salt tolerance by plants. pp. 97-123. *In: Pessaraki, M. (ed). Handbook of plant and crop stress.* University of Arizona. Tucson, AZ.
- Kafkafi, U. y N. Bernstein. 1996. Root growth under salinity stress. pp. 435-451. *In: Waisel, Y., A. Eshel y U. Kafkafi. Plant roots: The hidden half.* Marcel Dekker. New York.
- Keenan, W.Ch., D.C. Kleinfelter y J.H. Wood. 1990. Química general universitaria. Trad. al español por Antonio Eroles Gómez. Editorial CECSA. México.
- Levy, D. 1992. The response of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) to salinity: Plant growth and tuber yields in the arid deserts of Israel. *Ann. App. Biol.* 120: 547-555.
- Maas, E.V. y G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrigation Drainage Division* 103(IR2): 115-134.
- Martínez, C.A., M. Maestri y E.R. Lani. 1996. *In vitro* salt tolerance and proline accumulation in Andean potato (*Solanum* spp.) differing in frost resistance. *Plant Sci.* 116: 177-184.
- Moorby, J. y F.J. Milthorpe. 1983. Papa. pp. 245-280. *In: Evans, L.T. (ed.). Fisiología de los cultivos.* Trad. al español por H. González Idiarte. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Ortega E., M. 1993. Causas de la salinidad y efectos en los suelos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Poljakoff, M.A. y H.R. Lerner. 1994. Plants in saline environments. pp. 65-96. *In: Pessaraki, M. (ed.). Handbook of plant and crop stress.* University of Arizona. Tucson, AZ.
- Rousselle, P. y J.C. Robert. 1996. La pomme de terre. Institut National de la Recherche Agronomique. Paris, France.
- Shannon, M.C. y C.M. Griene. 1999. Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae* 78: 5-32.
- Strogonov, B.P. 1964. Physiological basis of salt tolerance of plants (as affected by various types of salinity). Translated from Russian. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, Israel.

# BACTERIAS Y HONGOS HIDROCARBONOCLASTAS DE RIZÓSFERA FRIJOL Y MAÍZ, EN UN SUELO CONTAMINADO CON PETRÓLEO

## Hydrocarbonoclastic Bacteria and Fungi of the Rhizosphere of Bean and Corn, in a Soil with Petroleum Pollution

Elizabeth Hernández-Acosta<sup>1</sup>, Ronald Ferrera-Cerrato<sup>2</sup>, María del Carmen Gutiérrez-Castorena<sup>2</sup>, Refugio Rodríguez-Vázquez<sup>3</sup>, Juan Enrique Rubiños-Panta<sup>2</sup> y Luis Fernández-Linares<sup>4</sup>

### RESUMEN

Cuando la planta se encuentra presente en suelos contaminados con petróleo, se crea un hábitat ideal para los microorganismos que utilizan al compuesto como fuente de carbono, necesario para sus funciones metabólicas. Las poblaciones microbianas se multiplican rápidamente en la zona rizosférica, aumentando las posibilidades de remoción del contaminante. Con la finalidad de abundar más en este tema, el presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la relación de bacterias hidrocarbonoclastas (HCT's) y hongos (HCT's) aisladas de rizósferas de plantas que crecen en suelos de Minatitlán, Veracruz (*Chamaecrista nictitans* y *Panicum* sp.) después de ser incorporadas en un suelo contaminado con 25 000 mg kg<sup>-1</sup> de petróleo crudo donde, posteriormente, se crecieron plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y maíz (*Zea mays* L.). También se estudió la remoción del contaminante por efecto de la interacción frijol-maíz-bacteria y hongo hidrocarbonoclastas. En invernadero, se establecieron tres experimentos (frijol (F), maíz (M) y frijol-maíz (FM) asociados) distribuidos en un diseño experimental completamente al azar; cada experimento tuvo seis tratamientos: a) bacteria + planta, b) bacteria + hongo + planta, c) sin microorganismos + planta, d) bacteria sin planta, e) bacteria + hongo sin planta y f) sin microorganismos, sin planta, con seis repeticiones. Se evaluaron poblaciones microbianas y las tasas de remoción de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) a 28 y 48 días después de la siembra (dds). Los

resultados mostraron mayores poblaciones de bacterias HCT's (6.03 x 10<sup>8</sup>) y hongos HCT's (2.75 x 10<sup>5</sup>) en la rizósfera frijol-maíz + bacteria + hongo a 48 dds. La rizósfera de maíz inoculada con bacterias (HCT's) permitió la mayor tasa de remoción HTP en la misma fecha. Se mostró la importancia que tienen los microorganismos hidrocarbonoclastas rizosféricos en la remoción de petróleo.

**Palabras clave:** Suelos contaminados, *Chamaecrista nictitans*, *Panicum* sp., *Phaseolus vulgaris* L., *Zea mays* L.

### SUMMARY

When plants grow in soils contaminated with petroleum, an ideal habitat is created for the development of microorganisms that are able to use petroleum as a source of carbon. Microorganism reproduction increases in the rhizosphere, augmenting the possibilities of removing the pollutant. The objective of the present work was to study the relationship of hydrocarbonoclastic bacteria and fungi isolated from the rhizosphere of plants (*Chamaecrista nictitans* and *Panicum* sp.) growing in a polluted soil in Minatitlan, Veracruz. The hydrocarbonoclastic (HCT) bacteria and fungi were incorporated into a soil polluted with 25 000 mg kg<sup>-1</sup> of crude petroleum in which bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.) were sown. The removal of the pollutant as a result of the interaction among bean, corn, HCT bacteria and fungi was studied. Three greenhouse experiments were set up with bean, corn and bean-corn association, arranged in a completely randomized experimental design. Each experiment had six treatments: a) bacteria + plant, b) bacteria + fungi + plant, c) no microorganisms + plant, d) bacteria without plant, e) bacteria + fungi without plant, and f) no microorganisms, without plant. Each treatment had six replicates. Microbial populations and the removal of petroleum were evaluated 28 and 48 days after sowing. The results showed the highest populations of

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo. (elizahac@yahoo.com.mx)

<sup>2</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México

<sup>3</sup> Centro de Investigación de Estudios Avanzados-Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.

<sup>4</sup> Instituto Mexicano del Petróleo, Departamento de Biotecnología. México, D.F.

hydrocarbonoclastic bacteria ( $6.03 \times 10^8$ ) and fungi ( $2.75 \times 10^5$ ) in the rhizosphere of bean-corn + bacteria + fungi 48 days after sowing. The rhizosphere of corn inoculated with hydrocarbonoclastic bacteria showed the highest removal rate of total petroleum hydrocarbons 48 days after sowing. The importance of hydrocarbonoclastic microorganisms in the rhizosphere for removal of petroleum in contaminated soils was demonstrated in the present study.

**Index words:** Soil pollution, *Chamaecrista nictitans*, *Panicum sp.*, *Phaseolus vulgaris L.*, *Zea mays L.*

## INTRODUCCIÓN

En suelos contaminados con hidrocarburos, la biorremediación puede llevarse a cabo con los microorganismos que habitan el suelo, en la rizósfera de plantas ahí establecidas, esto último es mejor conocido como fitorremediación. Durante la práctica de la fitorremediación se utilizan plantas para recuperar suelos contaminados por compuestos orgánicos como el petróleo, porque éstas remueven y destruyen a los contaminantes (Anderson *et al.*, 1995). Lo anterior sucede debido a que en las raíces de las plantas (zona rizosférica) existe una proliferación de microorganismos del suelo para llevar a cabo la degradación de compuestos orgánicos. Así, se ha demostrado la capacidad que tienen las plantas y su rizósfera en la remoción de contaminantes como los insecticidas y herbicidas presentes en el suelo (Walton y Anderson, 1990)

La fitorremediación es aplicada en países desarrollados como Estados Unidos y Canadá, y los resultados muestran la capacidad de la planta, en asociación con la microflora del suelo, para eliminar la contaminación principalmente de compuestos orgánicos (Cunningham *et al.*, 1996; Siciliano y Germida, 1998). Se han desarrollado experimentos en laboratorio (Boyajian y Carreira, 1997), en semillero e invernadero (Radwan *et al.*, 1995; Wiltse *et al.*, 1998) con plantas de importancia agrícola como el maíz (Amadi *et al.*, 1993; Hernández, 2002) y frijol (Hernández *et al.*, 2003) para mostrar cómo remedian suelos contaminados con petróleo y sus derivados, los resultados muestran la existencia de microorganismos rizosféricos altamente biodegradadores.

En México, esta línea de investigación se inició recientemente y no es común encontrar artículos formales donde la comunidad científica dé a conocer qué es lo que se ha estudiado y cuáles son los

objetivos alcanzados. Por esta razón, este trabajo tuvo como objetivo estudiar la interacción de bacterias y hongos hidrocarbonoclastas (HCT's) en las rizósferas frijol y maíz, en la remoción de petróleo crudo en un suelo, para proponer una tecnología de limpieza que pueda aplicarse en las zonas petroleras de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Aislamiento y Purificación de Bacterias y Hongos Hidrocarbonoclastas

Se colectaron muestras de suelos rizosféricos de la leguminosa *Chamaecrista nictitans* y del pasto *Panicum sp.*, las cuales crecen en presencia de petróleo crudo en suelos de Minatitlán, Veracruz. A partir de suelos rizosféricos de las plantas mencionadas, se prepararon diluciones y se realizaron siembras en cajas de Petri, siguiendo las metodologías tradicionales propuestas por Clark (1965a,b) y Parkinson (1982) en medios de cultivo minerales sólidos para el crecimiento de bacterias HCT's y hongos HCT's, con la finalidad de obtener colonias separadas.

Los medios de cultivos utilizados fueron: 1) para el crecimiento de bacterias HCT's, el medio de cultivo Rennie (1981) modificado y 2) para el crecimiento de hongos HCT's, el medio de cultivo Eggins y Pugh (Leander y Curl, 1972); mismos que se describen en el Cuadro 1. En ambos medios de cultivos se excluyó la fuente de carbono. Como fuente de carbono en los medios de cultivo se agregó 2 mL de petróleo crudo por caja de Petri que se sembró con los microorganismos mencionados impregnando papel filtro. La manera en la cual se incorporó el petróleo se ilustra en la Figura 1.

El aislamiento y purificación consistió en realizar siembras continuas de colonias separadas hasta obtener, en cajas de Petri, la presencia de una sola colonia multiplicada; es decir, un solo tipo de microorganismo (Granados y Villaverde, 1998; Velázquez, 1998).

### Pruebas de Inducción a una Mayor Degradación

La prueba consistió en lo siguiente: se introdujo una carga de bacterias u hongos, según el caso, a frascos de vidrio que contenían 50 mL de medio de cultivo minerales (en forma líquida) para el crecimiento de bacterias HCT's y hongos HCT's y se agregaron 2 mL de petróleo crudo maya. El frasco se

**Cuadro 1. Medios de cultivo utilizados para el crecimiento de los microorganismos hidrocarbonoclastas.**

Medio de cultivo carbón combinado (Rennie, 1981).	
Solución A	g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.8
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.2
NaCl <sub>2</sub>	0.1
NaFeEDTA	0.028
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.025
Extracto de levadura	0.025
Manitol	5.0
Sacarosa	5.0
Lactato de sodio (60 v/v)	0.5 mL
Agua destilada	900 mL
Solución B	
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.2
CaCl <sub>2</sub>	0.06
Agua destilada	100 mL
pH	7.0
Agar	15

Nota: Agregar y mL de biotina (5 mg L<sup>-1</sup>) en 1000 mL de medio de cultivo y α-p-aminobenzoico (10 mg L<sup>-1</sup>) en 1000 mL de medio de cultivo.

Medio carbón combinado modificado por Hernández et al. (2003).	
Solución A	g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.8
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.2
NaCl <sub>2</sub>	0.1
NaFeEDTA	0.028
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.025
NH <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	0.2
Agua destilada	900 mL
Solución B	(g)
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.2
CaCl <sub>2</sub>	0.06
Agua destilada	100
pH	7.0
Agar	15

Nota: Agregar y mL de biotina (5 mg L<sup>-1</sup>) en 1000 mL de medio de cultivo y α-p-aminobenzoico (10 mg L<sup>-1</sup>) en 1000 mL de medio de cultivo.

cerró con una tapa que presentó un tubo de vidrio, el cual se cubrió con tela hilaza y algodón para facilitar el paso de oxígeno al interior. El frasco se colocó en una incubadora-agitadora donde permaneció a 150 rpm (revoluciones por minuto) a una temperatura de 28 °C. Las pruebas de inducción a una mayor degradación se llevaron a cabo dos veces: en cada prueba se realizaron observaciones a 3, 9, 14, 30 y 60 días después de la inoculación. Se aplicó una escala subjetiva (la cual consistió en evaluar a 3, 9, 14 y más de 14 días después de la siembra (dds) visualmente la remoción de petróleo crudo), posteriormente, se seleccionaron los mejores aislamientos de acuerdo con el estado de degradación del petróleo la cual consideró

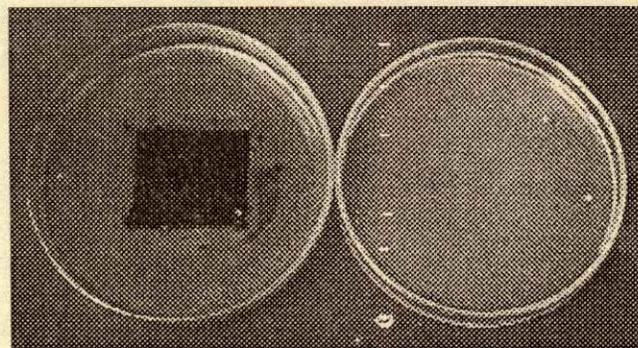


Figura 1. Ilustración de la incorporación del petróleo crudo al medio de cultivo en la caja de petri.

los parámetros: a) excelente (a tres dds), b) buena (a nueve dds), c) mediana (a 14 dds), y d) mala (más de 14 dds).

### Caracterización de los Aislamientos de Bacterias y Hongos Hidrocarbonoclastas

Al grupo de bacterias HCT's aisladas se caracterizó por la técnica de tinción de Gram (Velázquez, 1998), después se evaluaron: morfología colonial, morfología microscópica, movilidad (Millán y Ramírez, 1998) y cinética microbiana (Granados y Villaverde, 1998). Para identificar las bacterias HCT's, se utilizó el sistema estandarizado API 20 NE sistema de identificación de bacilos Gram negativos que no pertenecen a la familia de las Enterobacterias, el cual combina ocho pruebas convencionales y 12 de asimilación (API 20 EN, 2000). Se determinó la morfología colonial al grupo de hongos HCT's aislados (Chávez y Ramírez, 1998) y se caracterizaron a nivel género con la técnica de Ridell (Ridell, 1950).

### Preparación de Inóculo de Bacterias Hidrocarbonoclastas y Hongos Hidrocarbonoclastas

Se utilizó un consorcio microbiano formado por cinco bacterias hidrocarbonoclastas representadas por los géneros *Pseudomonas* sp. y *Agrobacterium radiobacter* y tres especies de hongos hidrocarbonoclastas representados por géneros *Trichoderma*, *Aspergillus* y *Mucor*. Cada aislamiento de bacterias HCT's y de hongos HCT's se sembraron en tres frascos de vidrio con capacidad de 250 mL, los cuales, además, contenían 50 mL de medio de cultivo mineral (en estado líquido) y petróleo crudo maya como fuente de carbono. En los aislamientos de

bacterias HCT's, se consideró el tiempo de generación (22 horas en promedio), para obtener al inóculo en la mayor fase de crecimiento; posteriormente, se colectó el medio de cultivo para utilizarlo en el experimento de invernadero. Los aislamientos de hongos HCT's permanecieron en incubación por ocho días, tiempo necesario para que germine un número significativamente alto de esferulas o hifas, después se colectó el medio de cultivo y, al igual que en las bacterias HCT's, se utilizó en la etapa experimental. A los dos inóculos (colectados y homogeneizados), se les realizaron diluciones y se sembraron en cajas de Petri para conocer las unidades formadoras de colonias (UFC) mL<sup>-1</sup>, de acuerdo con la técnica de dilución y conteo en placa propuesta por Clark (1965a,b) y Parkinson (1982).

### Preparación del Sustrato

Debido a la dificultad de volver a obtener muestras de suelo en Minatitlán, Veracruz, se utilizó un suelo con textura migajón arenosa, con pH 7.8, extremadamente pobre en materia orgánica (0.459%), pobre en contenido de nitrógeno (0.040%), rico en contenido de fósforo (11.04 mg kg<sup>-1</sup>), bajo contenido de potasio (0.340 meq/100 g), y con una capacidad de intercambio catiónico de 9.15 meq/100 g, propiedades que presentan los suelos contaminados de Minatitlán, Veracruz.

### Macetas, Preparación del Suelo y Llenado de las Macetas

Las macetas que se utilizaron fueron envases de cerveza de 940 mL, cortados a la altura del cuello, posteriormente se le agregaron 700 g de suelo. El petróleo crudo se mezcló con el suelo y se utilizó un recipiente de peltre y un tenedor de aluminio. Una vez obtenida la mezcla uniforme, se colocó en la maceta de vidrio. Antes de inocular y de sembrar en el suelo, éste se esterilizó.

### Siembra del Material Vegetal, Inoculación y Cuidado de las Plantas en Invernadero

Se sembraron semillas de frijol var. Negro INIFAP, las cuales fueron proporcionadas por el Campo Experimental Agrícola Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), y una colecta de maíz criollo (MV06), obtenida de plantaciones de

maíz en Minatitlán, Veracruz. Ambos materiales vegetales se seleccionaron porque crecen en los suelos mencionados. Al centro de cada maceta se sembraron las semillas, a una profundidad del doble de su tamaño. Posteriormente, se aplicaron 5 mL de inóculo de bacterias HCT's con una carga de  $5.0 \times 10^{10}$  UFC mL<sup>-1</sup> y 5 mL de inóculo de hongos HCT's con una carga de  $4.0 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup>, después el suelo se regó con agua destilada estéril. Durante el tiempo de estancia de las plantas en invernadero, éstas se regaron con agua destilada de acuerdo con el requerimiento de cada planta. A 28 y 48 dds, se realizaron muestreos de suelo y raíz para evaluar poblaciones microbianas y tasas de remoción de hidrocarburos totales del petróleo. La cosecha de experimentos se realizó a 48 dds.

### Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se estableció un diseño experimental factorial 4 x 3 completamente al azar. Los tratamientos se muestran en el Cuadro 2. Los últimos tres tratamientos fueron los testigos para los tres experimentos. Para la realización del análisis estadístico y la comparación de medias se utilizó el programa Statistical Analysis System (SAS Institute, 1989).

### Análisis Microbiológico

Se evaluaron poblaciones de bacterias y hongos HCT's a 28 y 48 dds en la rizósfera de las plantas. Se utilizaron medios de cultivos minerales para el crecimiento de ambos grupos microbianos, descritos con anterioridad en el Cuadro 1. El petróleo crudo se

**Cuadro 2. Tratamientos implementados para el experimento en invernadero.**

Tratamiento	Repeticiones
1) Frijol + Bacteria	6
2) Frijol + Bacteria + Hongo	6
3) Frijol Testigo	6
4) Maíz + Bacteria	6
5) Maíz + Bacteria + Hongo	6
6) Maíz Testigo	6
7) Frijol-maíz + Bacteria	6
8) Frijol-maíz + Bacteria + Hongo	6
9) Frijol-Maíz Testigo	6
10) Suelo sin planta + Bacteria	6
11) Suelo sin planta + Bacteria + Hongo	6
12) Suelo sin planta Testigo	6

agregó al medio de cultivo impregnando papel filtro, el cual se colocó en la tapa de la caja Petri (este procedimiento se ilustra en la Figura 1). Se hicieron diluciones decimales para la siembra en cajas de Petri. Las siembras en placa se realizaron a los 12 tratamientos y se analizaron microbiológicamente tres repeticiones. Las cajas sembradas se colocaron en bolsas de plástico para incubarlas a 28 °C por ocho días y, posteriormente, se llevó a cabo el conteo.

### Extracción y Cuantificación de Hidrocarburos Totales del Petróleo no Degradados

Se utilizó el método EPA 3540A (modificado) extracción soxhlet (EPA, 1994) para obtener los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) no degradados. Los hidrocarburos totales del petróleo se determinaron con el Método EPA 418.1 espectrofotometría en infrarrojo modificado (EPA, 1986). Las muestras se leyeron en el equipo infrarrojo Nicolet Nexus 470 FT-IR y se utilizó el programa de computo EZ OMNIC E.S.P., Versión 5.1, perteneciente al Instituto Mexicano del Petróleo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización Morfológica y Fisiológica de bacterias HCT's y hongos HCT's

Se obtuvieron 34 cepas de bacterias HCT's y 29 cepas de hongos HCT's, dando un total de 63 cepas purificadas. Éstas se sometieron a pruebas de inducción a una mayor degradación y fueron 30 cepas de bacterias HCT's y 16 de hongos HCT's. En la segunda selección, se obtuvieron cinco cepas de bacterias HCT's y cuatro de hongos HCT's. Las nueve cepas fueron las mejores degradadores de petróleo crudo. De los cinco aislamientos de bacterias, tres se clasificaron como *Pseudomonas* sp. [bacilos Gram negativo, colonias de borde redondo entero, forma circular, color crema, colonias pequeñas (0.5 mm de diámetro), alta movilidad y tiempo de generación de 22 h] y dos como *Agrobacterium* sp. [bacilos Gram negativo, colonias de borde redondo y entero, forma circular convexa, color crema, textura mucosoide (0.2 a 4 mm de diámetro), alta movilidad, con un tiempo de generación de 20 h].

Especies de *Pseudomonas* sp. son reconocidas como excelentes degradadoras de petróleo crudo, hidrocarburos aromáticos del petróleo y compuestos aromáticos halogenados (Walton *et al.*, 1994a).

Seabra (1999) mencionó que la adición de bacterias del género *Pseudomonas* degradadoras de petróleo en un suelo contaminado lleva a cabo eficientemente los procesos de biodegradación. Además, éstas son capaces de realizar conversiones cometabólicas (Cookson, 1995) en las cuales las reacciones pueden ser hidroxilaciones, oxidaciones, denitrataciones, deaminaciones e hidrólisis (Alexander, 1999). Una de las explicaciones que existe sobre las numerosas posibilidades de sobrevivencia de *Pseudomonas* en ambientes adversos se relacionan con las poblaciones abundantes de este grupo microbiano en el suelo (Walton *et al.*, 1994a).

En el caso de *Agrobacterium* sp., en condiciones aeróbicas, es capaz de degradar hidrocarburos, compuestos aromáticos halogenados e hidrocarburos aromáticos (Schneider y Billingsley, 1990; Walton *et al.*, 1994a,b). Sin embargo, su capacidad de degradación es superada por bacterias del género *Pseudomonas*.

En lo referente a los aislamientos de hongos, dos se identificaron como *Trichoderma* sp. (borde irregular, forma circular, color verde, textura dura, colonia de 2.5 a 8.5 cm de diámetro), uno como *Aspergillus* sp. (borde ondulado, forma ondulada e irregular, color amarillo en la fase inicial y café en la etapa de madurez, textura áspera, colonias hasta de 8 cm de diámetro) y el último como *Mucor* sp. (borde circular, forma redonda, color crema, textura suave, elevación acolchada, en ocho días invade la caja de Petri).

De los tres géneros identificados, *Aspergillus* sp. y *Trichoderma* sp. son más reconocidos como hongos hidrocarbonoclastas. Cookson (1995) los identificó como degradadores de contaminantes orgánicos mediante el fenómeno de cometabolismo. Además, Paul y Clark (1996) los describieron como microorganismos frecuentemente utilizados en la biorremediación de suelos. Por otra parte, se sabe que el género *Aspergillus* tiene la particularidad de crecer rápidamente en petróleo crudo y, en algunos casos, formar hifas muy densas (April *et al.*, 2000). Más aún, Oudot *et al.*, 1993 indicaron que este género es capaz de degradar de 30 a 35% de hidrocarburos saturados y aromáticos, y 13% de resinas y asfaltenos, constituyentes del petróleo crudo.

Al igual que en este estudio, Radwan *et al.* (1995) aislaron, purificaron e identificaron bacterias y hongos hidrocarbonoclastas de la rizósfera y suelo no rizosférico de maíz crecido en un suelo arenoso contaminado con petróleo. Estos investigadores

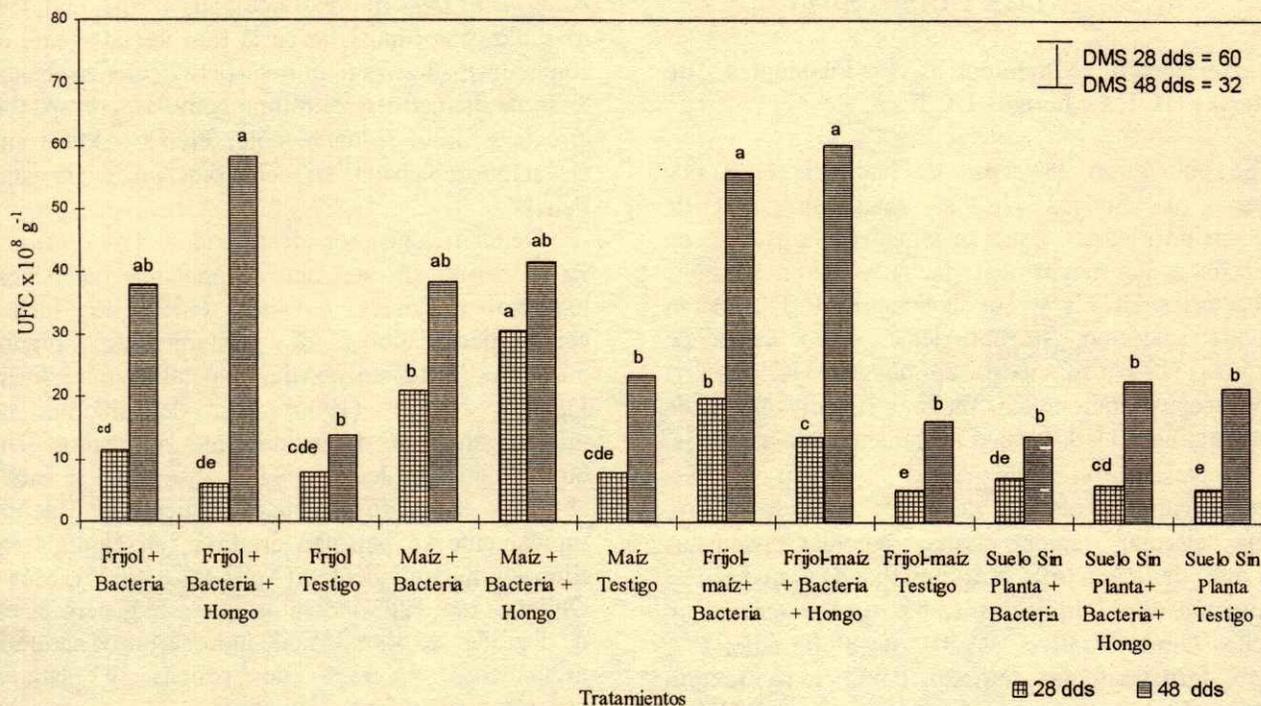
también encontraron los géneros *Pseudomonas* y *Trichoderma* como degradadores de petróleo crudo y mencionaron que éstos pueden acumular en sus lípidos (ácidos grasos) lo equivalente a una cadena larga del sustrato alcano constituyente del petróleo y que son capaces de metabolizar los constituyentes del petróleo aun después de asimilarlos.

En este estudio, se conoció que *Pseudomonas* sp., *Agrobacterium* sp., *Trichoderma* sp., *Aspergillus* sp. y *Mucor* sp. habitan los suelos de Minatitlán, Veracruz. En su mayoría, los autores citados reportaron sus investigaciones en Estados Unidos y Canadá donde las condiciones de clima son diferentes a las del sureste de México; por lo que esta investigación aporta al conocimiento que las cepas mencionadas aisladas de la rizósfera de *Chamaecrista nictitans* y *Panicum* sp. degradan petróleo crudo en suelos contaminados del trópico húmedo de México (Minatitlán, Veracruz) y en rizósferas de plantas como el maíz y frijol cuando son inoculadas en suelos contaminados con petróleo crudo.

### Poblaciones Microbianas de Bacterias y Hongos Hidrocarbonoclastas

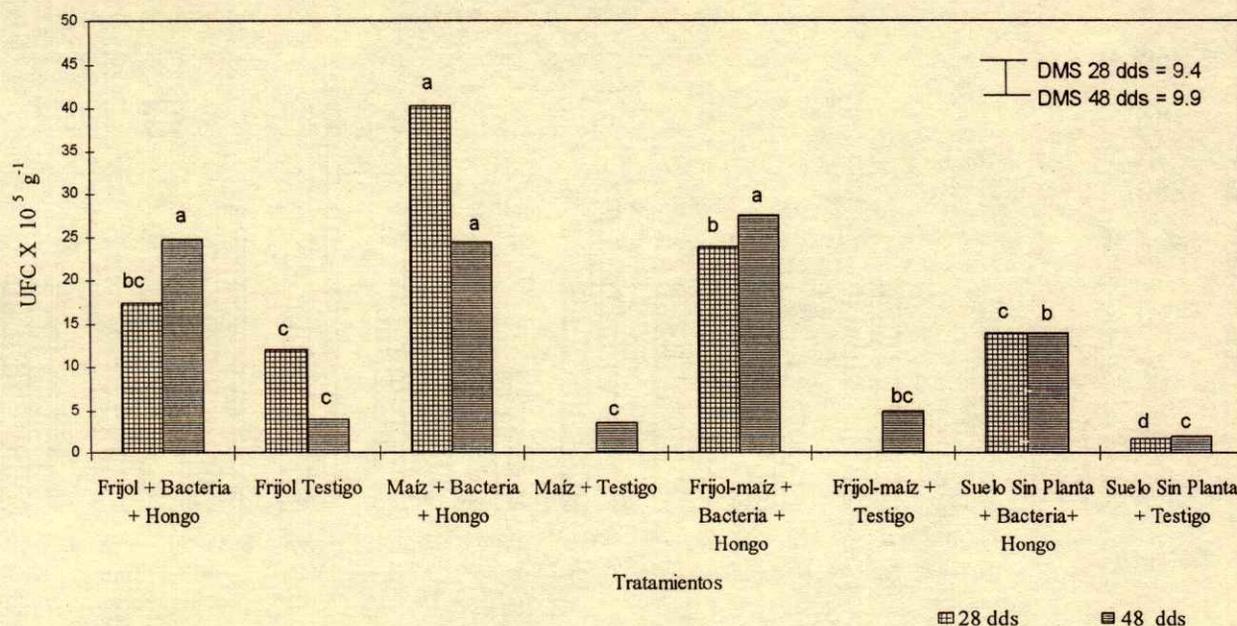
Las poblaciones resultantes de cada uno de los experimentos se analizaron estadísticamente y se encontraron diferencias altamente significativas (Tukey,  $P = 0.05$ ) para el grupo de bacterias HCT's y hongos HCT's. Las poblaciones más altas de bacterias HCT's ( $6.03 \times 10^8$  UFC  $g^{-1}$  de suelo) se encontraron a 48 dds en el tratamiento frijol-maíz + bacteria + hongo (Figura 2). A 28 dds, la población más alta ( $3.05 \times 10^8$  UFC  $g^{-1}$  de suelo) de este grupo microbiano ocurrió en el tratamiento maíz + bacteria + hongo (Figura 2). Estos resultados muestran que la presencia de la planta es fundamental en la estimulación de altas poblaciones microbianas hidrocarbonoclastas en suelos contaminados con petróleo crudo.

La población de los hongos HCT's fue mayor ( $4.03 \times 10^5$  UFC  $g^{-1}$  de suelo) a 28 dds en el tratamiento maíz + bacteria + hongo; en tanto que a



Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey  $p=0.05$ )

Figura 2. Poblaciones de bacterias hidrocarbonoclastas en la rizósfera de frijol y maíz en un suelo contaminado con petróleo crudo.



Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey  $p=0.05$ )

Figura 3. Poblaciones de hongos hidrocbonoclastas en la rizósfera de frijol y maíz en un suelo contaminado con petróleo crudo.

48 dds, la población más alta ( $2.75 \times 10^5$  UFC  $g^{-1}$ ) se encontró en el tratamiento frijol-maíz + bacteria + hongo (Figura 3). Lo anterior indica que los hongos hidrocbonoclastas fueron estimulados por la rizósfera de frijol y maíz, provocando un aumento en las poblaciones a diferencia de los tratamientos que no presentaron planta, donde la fuente de carbono proporcionada por el petróleo fue de gran importancia. Al respecto, Shann y Boyle (1994) mencionaron que en el suelo la zona rizosférica, en general, sostiene el crecimiento de microorganismos, logrando formar ecosistemas ideales para la degradación de xenobióticos orgánicos, como el petróleo.

En general, se observa, en la Figura 2 y 3, que las poblaciones de bacterias HCT's fueron superiores a las obtenidas por el grupo de hongos HCT's. Este comportamiento comúnmente se encuentra en el suelo y se debe a que las bacterias son el grupo microbiano más numeroso; además, esta particularidad les da la ventaja de tolerar a los contaminantes y, por lo tanto, de actuar como mejores degradadores de compuestos orgánicos tóxicos como el petróleo (Walton *et al.*, 1994a).

Los resultados presentados en este escrito fueron superiores a los obtenidos por Amadi *et al.* (1993), quienes estudiaron la remediación de un suelo

contaminado con 10% de petróleo crudo en presencia de maíz. Estos investigadores obtuvieron una población de bacterias HCT's de  $2.3 \times 10^4$  UFC  $g^{-1}$  suelo y de hongos HCT's de  $3.78 \times 10^3$  UFC  $g^{-1}$  de suelo. Por otro lado, Radwan *et al.* (1995) obtuvieron resultados superiores a los encontrados en este trabajo, y tuvieron poblaciones de bacterias HCT's ( $3.0 \times 10^8$  células por gramo de raíces frescas) y hongos HCT's ( $4.4 \times 10^5$  propágulos por gramo de raíces frescas) en la rizósfera de maíz de un suelo arenoso contaminado con 10% de petróleo crudo, a 28 días después de la siembra de la planta. Las diferencias en poblaciones encontradas en los trabajos anteriores se deben al tipo de planta, tipo y cantidad del contaminante, a la capacidad biodegradadora de los microorganismos presentes (Schneider y Billingsley, 1990) y a las condiciones climáticas que imperan durante la interacción mencionada (Frick *et al.*, 1999).

Las poblaciones de bacterias y hongos hidrocbonoclastas en suelos contaminados con petróleo varían de acuerdo con el tipo de planta. Las poblaciones de bacterias y hongos HCT's obtenidas en este estudio fueron altas y se consideran microorganismos valiosos, porque crecieron en un número exponencial significativamente alto, aunque el suelo en el que se desarrollaron presentó deficiencias

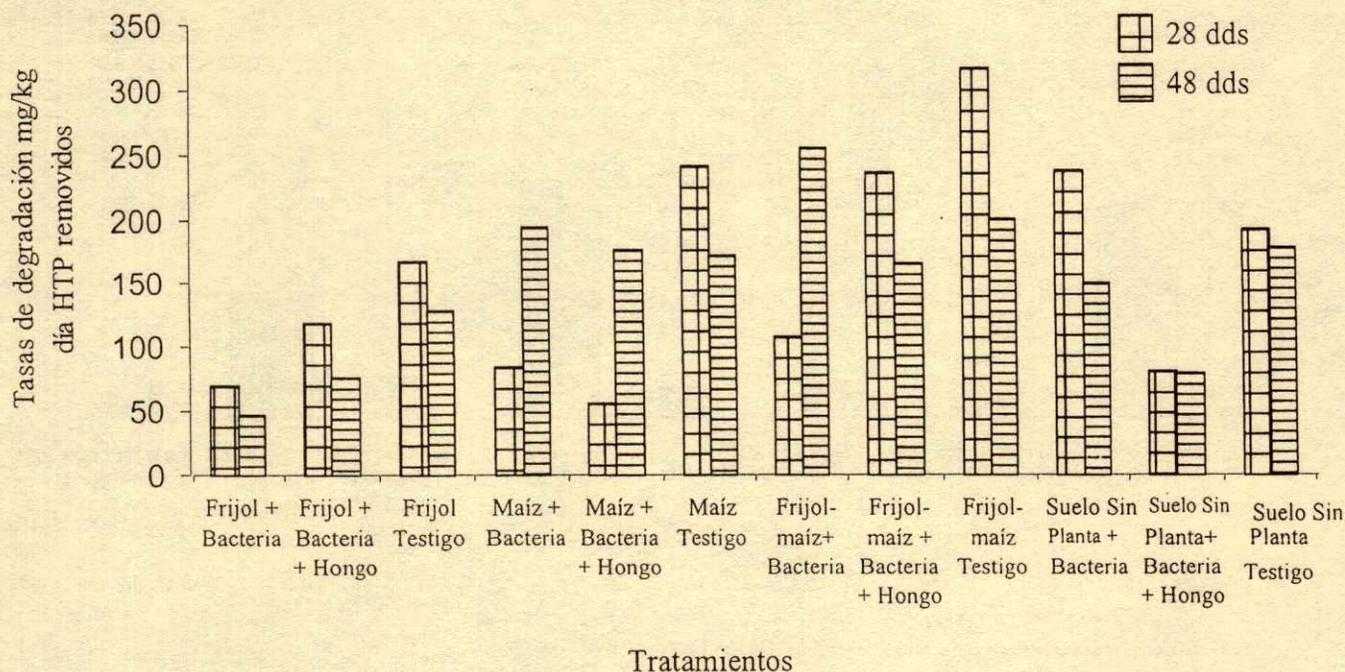


Figura 4. Hidrocarburos totales del petróleo no degradados en el suelo.

nutrimentales, principalmente de nitrógeno y fósforo, elementos indispensables para el crecimiento microbiano (Granados y Villaverde, 1998).

#### Hidrocarburos Totales del Petróleo no Degradados en el Suelo

Al determinar las tasas de degradación de HTP removidos se conoció que el tratamiento que mayor tasa de degradación presentó a 28 dds fue frijol-maíz testigo ( $317.28 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$  HTP removidos y a 48 dds el tratamiento frijol-maíz bacteria ( $256.08 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$  HTP removidos) (Figura 4). Lo anterior indicó que a 28 dds, los factores ambientales influyeron en la remoción de los hidrocarburos lineales y que, a 48 dds, las bacterias hidrocbonoclastas actuaron sobre los hidrocarburos más difíciles de degradar, considerando que existió más tiempo para que los procesos de biodegradación se pudiesen llevar a cabo. Al respecto, Schneider y Billingsley (1990) y Eweis *et al.* (1998) mencionaron que la degradación microbiana se duplica cuando factores como la temperatura y humedad del suelo son adecuadas,

sobre todo en los hidrocarburos más fácilmente degradables (ejemplo: hidrocarburos lineales).

Se observó también que, a 48 dds, los tratamientos inoculados con bacterias hidrocbonoclastas fueron los que presentaron las tasas de degradación más altas, lo cual indica que éstas tuvieron mayor participación en la remoción de los hidrocarburos del petróleo. Al respecto, Atlas y Bartha (1998) encontraron que en la degradación de petróleo crudo las bacterias hidrocbonoclastas son más eficientes en la remoción del mismo porque el hidrocarburo puede sostener números altos (poblaciones altas) de este grupo microbiano.

También se conoció que la rizósfera de maíz permitió mayores tasas de degradación en comparación con la rizósfera de frijol. En relación con este punto, Cunningham *et al.* (1996) mencionaron que las plantas y sus raíces pueden influir indirectamente en la degradación de contaminantes, alterando las condiciones físicas y químicas del suelo. Por ejemplo, al explorar la raíz mayor área en el suelo, existirá una mayor interacción entre las plantas, los microorganismos y los contaminantes. Este

fundamento fue el soporte de lo escrito por Qui *et al.* (1994) años anteriores cuando mencionaron que la preferencia de las plantas de maíz para trabajar en la fitorremediación de suelos contaminados existe porque tienen un sistema radical fibroso y extenso.

### CONCLUSIONES

- Las especies *Pseudomonas* sp., *Agrobacterium* sp., *Trichoderma* sp., *Aspergillus* sp. y *Mucor* sp. son microorganismos que se presentan en la rizósfera de *Chamaecrista nictitans* y *Panicum* sp. y son degradadoras de hidrocarburos en suelos contaminados de Minatitlán, Veracruz.
- Las rizósferas frijol, maíz y frijol-maíz inoculadas con *Pseudomonas* sp., *Agrobacterium* sp., *Trichoderma* sp., *Aspergillus* sp. y *Mucor* sp. presentaron las mayores poblaciones hidrocarbonoclastas.
- En general, las tasas de remoción de hidrocarburos totales del petróleo fueron mayores en la rizósfera maíz inoculada con bacterias hidrocarbonoclastas.
- La incorporación de plantas y microorganismos hidrocarbonoclastas a suelos contaminados con petróleo crudo hace posible la remoción de cantidades importantes del contaminante.

### LITERATURA CITADA

- Alexander, M. 1999. Biodegradation and bioremediation. Second Edition. Academic Press. San Diego, CA.
- Amadi A., A., A. Dickson y G.O. Maate. 1993. Remediation of oil polluted soils: 1. Effect of organic and inorganic nutrient supplements on the performance of maize (*Zea mays* L.). *Water Air Soil Pollut.* 66: 59-76.
- Anderson, T.A., D.C. White y B.T. Walton. 1995. Degradation of hazardous organic compounds by rhizosphere microbial communities. pp. 205-225. *In: Singh, V. (ed.). Biotransformations: Microbial degradation of health-risk compounds.* Elsevier Science. Amsterdam, The Netherlands.
- API 20 NE. 2000. Système d'identification des bacilles à Gram négatif non entérobactéries. BioMérieux sa. Paris, France.
- April T., M., J.M. Foght y S.R. Currah. 2000. Hydrocarbon-degrading filamentous fungi isolated from flare pit soils in northern and western Canada. *Can. J. Microbiol.* 46: 38-49.
- Atlas, R.M. y R. Bartha. 1998. Microbial ecology. Fundamentals and applications. Fourth Edition. Benjamin Cummings. CA.
- Boyajian, G.E. y L.H. Carreira. 1997. Phytoremediation: A clean transition from laboratory. *Nature Biotechnol.* 15: 127-128.
- Chaîneau, C.H., J.L. Morel y J. Oudot. 1997. Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. *J. Environ. Quality* 26: 1478-1483.
- Chávez M., A. y R.M. Ramírez G. 1998. Siembra y estudio de hongos. pp. 93-104. *In: Ramírez G., R.M. (ed.). Manual de prácticas de microbiología general.* Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Clark, F.E. 1965a. Agar plate method for total microbial count. pp. 1460-1466. *In: Black, C.A. (ed.). Methods of soil analysis.* Agronomy 9. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Clark, F.E. 1965b. Actinomicetes. pp. 1498-1501. *In: Black, C.A. (ed.). Methods of soil analysis.* Agronomy 9. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Cookson, J.R.J. 1995. Bioremediation engineering. Mc Graw Hill. New York.
- Cunningham, S.D., T.A. Anderson, A.P. Schwab y F. Hsu. 1996. Phytoremediation of soils contaminated with organic compounds. *Adv. Agron.* 56: 55-114.
- EPA. Environmental Protection Agency. 1986. Method 418.1 mod. Petroleum Hydrocarbons Total Recoverable Spectrophotometric Infrared. Washington, DC.
- EPA. Environmental Protection Agency. 1994. US EPA Method-3540A, Soxhlet Extraction. EP/1.17:846, final update 2-2A. Washington, DC.
- Eweis, J.B., S.J. Erges, D.P.Y. Chang y E.D. Skroeder. 1998. Bioremediation principles. Series Water Resources and Environmental Engineering. Mc Graw. Hill. New York.
- Frick, C.M., R.E. Farrell y J.J. Germida. 1999. Assessment of phytoremediation as an *In situ* technique for cleaning oil-contaminated sites. Report prepared by Petroleum Technology Alliance of Canada (PTAC). Calgary, Canada.
- Granados P., R. y M.C. Villaverde P. 1998. Microbiología. Editorial Paraninfo. Magallanes, Madrid, España.
- Hernández A., E. 2002. La rizósfera de plantas gramíneas y leguminosas en la fitorremediación de suelos contaminados por petróleo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Hernández A., E., R. Ferrera-Cerrato y R. Rodríguez V. 2003. Bacterias de vida libre fijadoras de nitrógeno atmosférico en rizósfera de frijol contaminada con queroseno. *Terra* 21: 81-89.
- Leander, F.J. y E.A. Curl. 1972. Methods for research on the ecology of soil-borne plant pathogens. Burgess Publishing. Minneapolis, MN.
- Millán L., B. y R.M. Ramírez G. 1998. Técnicas básicas para el cultivo de microorganismos. pp. 75-92. *In: Ramírez G., R.M. (ed.). Manual de prácticas de microbiología general.* Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Oudot, J., J. Dupont, S. Haloui y M.F. Roquebert. 1993. Biodegradation potential of hydrocarbon-assimilating tropical fungi. *Soil Biol. Biochem.* 25: 1167-1173.
- Parkinson, D. 1982. Filamentous fungi. pp. 949-953. *In: Page, A.L. (ed.). Methods of soil analysis.* Agronomy 9. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Paul, E.A. y F.E. Clark. 1996. Soil microbiology and biochemistry. Second Edition. Academic Press. New York.
- Qiu, X., S.I. Shah, E.W. Kendall, D.L. Sorensen, R.C. Sims y M.C. Engle. 1994. Grass-enhanced bioremediation for clay soils contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons. pp. 142-159. *In: Anderson, T.A. y J.R. Coats. (eds.). Bioremediation through rhizosphere technology.* American Chemical Society. Washington, DC.
- Radwan, S., N. Sorkhoh y Y. El-Nemr. 1995. Oil biodegradation around roots. *Nature* 376: 302.
- Reilley, K.A., M.K. Banks y A.P. Schwab. 1996. Organic chemicals in the environment. *Environ. Quality* 25: 212-219.

- Rennie, R.J. 1981. A single medium for the isolation of acetylene-reducing (dinitrogen-fixing) bacteria from soils. *Can. J. Microbiol.* 27: 8-14.
- Ridell, R.W. 1950. Permanent stained mycological preparations obtained by slide culture. *Mycologia* 42: 265-270.
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/IML Software: Usage and reference. Version 6. First Edition. Cary, NC.
- Schneider, D.R. y B. Billingsley. 1990. Bioremediation. A desk manual for the environmental professional. Cahners Publishing Company. Newton, MA.
- Seabra, P.N. 1999. Laboratory study of crude oil remediation by bioaugmentation. pp. 421-426. *In: In situ* Bioremediation of petroleum hydrocarbon and other organic compounds. Bruce, A.C. and A. Leeson (eds.). The Fifth International In situ and On-Site Bioremediation Symposium. San Diego California., USA.
- Shann, J.R. y J.J. Boyle. 1994. Influence of plant species on *in situ* rhizosphere degradation. pp. 70-81. *In: Anderson, T.A. y J.R. Coats (eds.). Bioremediation through rhizosphere technology.* American Chemical Society. Washington, DC.
- Siciliano S., D. y J.J. Germida. 1998. Mechanisms of phytoremediation: Biochemical and ecological interactions between plants and bacteria. *Environ. Rev.* 6: 65-79.
- Velázquez M., O. 1998. Aislamiento de microorganismos pp. 123-133. *In: Ramírez G., R.M. (ed.). Manual de prácticas de microbiología general.* Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Walton, B.T. y T.A. Anderson. 1990. Microbial degradation of trichloroethylene in the rhizosphere: Potential application to biological remediation of waste sites. *Appl. Environ. Microbiol.* 56: 1012-1016.
- Walton, B.T., E.A. Guthrie y A.M. Hoylman. 1994a. Toxicant degradation in the rhizosphere. pp. 11-25. *In: Anderson, T.A. y J.R. Coats (eds.). Bioremediation through rhizosphere technology.* American Chemical Society. Washington, DC.
- Walton, B.T., A.M. Hoylman, M.M. Perez, T.A. Anderson, T.R. Johnson, E.A. Guthrie y R.F. Christman. 1994b. Rhizosphere microbial communities as a plant defence against toxic substances in soils. pp. 82-92. *In: Anderson, T.A. y J.R. Coats (eds.). Bioremediation through rhizosphere technology.* American Chemical Society. Washington, DC.
- Wiltse, C.C., W.L. Rooney, Z.A. Chen, A.P. Schwab y M.K. Banks. 1998. Greenhouse evaluation of agronomic and crude oil-phytoremediation potential among alfalfa genotypes. *J. Environ. Quality* 27: 169-173.

# CRECIMIENTO Y FISIOLÓGIA DE *Citrus volkameriana* Tan & Pasq EN SIMBIOSIS CON HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES

## Growth and Physiology of *Citrus volkameriana* Tan & Pasq in Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis

Alejandro Alarcón<sup>1‡</sup>, María del Carmen González-Chávez<sup>1</sup> y Ronald Ferrera-Cerrato<sup>1</sup>

### RESUMEN

En México, en comparación con otros países, existe poca información sobre el efecto que los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) producen en la fisiología de frutales micotróficos obligados. En este contexto, plántulas de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq de 25 días de edad se inocularon con *Glomus* Zac-19 y *Glomus aggregatum* Schenck & Smith. Las plántulas se trasplantaron a un sustrato, esterilizado con presión de vapor, que consistió en la mezcla suelo forestal, suelo agrícola y arena de río, en proporción 3:1:1 v/v. El experimento se estableció con base en un diseño completamente al azar con tres tratamientos y 12 repeticiones. Se evaluó la efectividad de las cepas en el crecimiento, en la fotosíntesis, en la distribución de fósforo y en azúcares solubles en planta. A 70 días, la inoculación ocasionó cambios significativos en la fisiología de las plantas, favoreciendo la tasa fotosintética y concentración de fósforo en hojas, tallo y raíz, y modificación en la distribución de azúcares solubles totales. Sin embargo, la respuesta en la acumulación de materia seca de plantas inoculadas no presentó diferencias con respecto al testigo. A 120 días, la inoculación con HMA produjo efectos significativos en el diámetro y en la tasa de crecimiento acumulado de tallo, área foliar y materia seca total producida. La concentración de azúcares, tanto a 70 como a 120 días, fue mayor en raíces de plantas inoculadas en comparación con raíces de plantas testigo. La absorción y la translocación de fósforo hacia la planta por los hongos produjeron incrementos en la fotosíntesis, así como mayor suministro de azúcares hacia la raíz. El beneficio de los hongos

micorrízicos arbusculares representa mayor demanda de azúcares en el sistema radical.

**Palabras clave:** *Glomus* spp., cítricos, fotosíntesis, azúcares solubles, fósforo.

### SUMMARY

Mexico, in comparison with other countries, has scarce information about the effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on fruit plant physiology. In order to gain more knowledge on physiology of mycorrhizal plants, twenty-five-day-old seedlings of *Citrus volkameriana* Tan & Pasq were inoculated with *Glomus* Zac-19 and *Glomus aggregatum* Schenck & Smith, and planted in a steam-sterilized substrate. The substrate consisted of a mixture of forest and agricultural soil and river sand (3:1:1 v/v). AMF-effectiveness on plant growth, photosynthesis, phosphorus and soluble sugars were measured. Three treatments, with 12 replicates each, were considered in a randomized design. After 70 days, fungi inoculation produced significant physiological changes improving photosynthetic rate, phosphorus concentration in leaves, stems and roots, and total soluble sugar allocation. However, dry matter accumulation of inoculated plants was not significantly different. After 120 days, mycorrhizal fungi showed significant enhancement of stem diameter, relative growth rate of the stem, leaf area, and total dry matter. At 70 and 120 days, sugar concentration was higher in roots of inoculated plants than in those of control plants. AM-fungi favored phosphorus uptake in plants both in photosynthesis rate and sugar concentration in roots. Beneficial effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants require availability of more sugars in roots.

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 35.5. 56230 Montecillo, estado de México. <sup>‡</sup> Autor responsable (alexala@colpos.mx)

## INTRODUCCIÓN

La inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en plantas frutales favorece el crecimiento, la sanidad y el vigor de las plantas (Jaizme-Vega y Azcón, 1995; Lovato *et al.*, 1996). En México, pocos trabajos se han encaminado al estudio de la fisiología de plantas en simbiosis con HMA, ya que principalmente se ha tratado de validar la aplicación de estos endófitos con el fin de divulgar esta biotecnología en las diversas actividades que conforman la agricultura (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 1999). No obstante, el estudio de aspectos básicos de la simbiosis permite predecir el posible efecto de prácticas culturales en el beneficio de la simbiosis, en particular en fruticultura. La simbiosis micorrízica arbuscular representa para la planta alto costo de energía, la cual debe ser generada y distribuida no sólo para mantener activa la simbiosis (Smith y Gianinazzi-Pearson, 1988), sino también para satisfacer los requerimientos propios de la planta. La actividad de los HMA repercute de manera positiva en la fisiología de su hospedante (Aguilera-Gómez *et al.*, 1999), ya que éstos mejoran la disponibilidad y el aprovechamiento de nutrimentos (Varela y Estrada-Torres, 1999) para que el macrosimbionte pueda abastecer de fuentes carbonadas al hongo y, de este modo, se establece el mutualismo que caracteriza a la simbiosis. No obstante, la relación que se presenta en la fisiología de plantas micotróficas obligadas en simbiosis con hongos micorrízicos arbusculares se ha poco estudiado en México, en comparación con estudios hechos en el extranjero (Smith y Read, 1997).

Con base en lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de la inoculación con HMA en el crecimiento, en la tasa de fijación de CO<sub>2</sub> y en la distribución de fósforo y azúcares solubles, de plantas del portainjerto *Citrus volkameriana*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las semillas de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq (Proporcionadas por el Dr. Ángel Villegas-Monter, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados) se desinfectaron de manera superficial con hipoclorito de sodio comercial a 2.5% durante 1 min, y se sembraron en tezontle, esterilizado con presión de vapor (1.26 kg cm<sup>-2</sup>, 3 h), y se incubaron a 25 °C.

La humedad se mantuvo con riegos de agua destilada estéril aplicados cada tercer día para mantener la capacidad de campo del sustrato. Una vez formado el primer par de hojas verdaderas, las plántulas se trasladaron a bolsas de polietileno negro de 2.0 kg de capacidad, para lo cual se utilizó como sustrato la mezcla de suelo forestal, suelo agrícola (Tequexquihuac, estado de México) y arena de río, en proporción 3:1:1 v/v, esterilizada con presión de vapor. La composición química del sustrato fue: materia orgánica, 6.7 %; N-total, 3.4 µg g<sup>-1</sup> suelo; P-Olsen, 18 µg g<sup>-1</sup> suelo; conductividad eléctrica, 0.36 mmho cm<sup>-1</sup>; pH (H<sub>2</sub>O, 2:1), 7.5; y textura franco arcillo arenosa (63% de arena, 15% de limo y 22% de arcilla). En el momento del trasplante, las plántulas se inocularon, de forma individual, con 10 g de suelo-inóculo de dos cepas de HMA, *Glomus* Zac-19 y *Glomus aggregatum* (González-Chávez *et al.*, 1998; Alarcón y Ferrera-Cerrato, 1999). El uso de las dos cepas micorrízicas se basó en los antecedentes de efectividad que ambas cepas han mostrado en cítricos y otros frutales (González-Chávez *et al.*, 1998). El porcentaje de colonización de las raíces por inóculo fue de 68.8 para *Glomus* Zac-19 y 65.9 para *G. aggregatum*, con un número de esporas en 10 g de suelo-inóculo de 62 y 28, respectivamente. El experimento se estableció en el invernadero perteneciente al Área de Microbiología de Suelos (Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados).

Las variables evaluadas fueron: diámetro de la base del tallo; materia seca total; área foliar, determinado con integrador: LI-COR (modelo LI-6200); relación raíz:parte aérea, expresada en materia seca; tasa de crecimiento acumulado del tallo (3.1416\*(diámetro de tallo/2)<sup>2</sup>\*altura/edad de la planta en días) (Hurtado y Sieverding, 1986); tasa de fijación de CO<sub>2</sub>, determinada con un medidor portátil de fotosíntesis LI-COR (modelo LI-6200); concentración de P en hojas, tallo y raíz, determinada mediante digestión húmeda con HClO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub> (1:2 v/v) y medido por el método de azul de molibdeno (Etchevers *et al.*, 1978); concentración de azúcares solubles en hojas, tallo y raíz, determinada con el método de antrona (Southgate, 1976); colonización por HMA en raíz, determinada mediante clareo y tinción de raíces (Phillips y Hayman, 1970); porcentaje de colonización micorrízica (total, arbusculos y vesículas), estimado con base en el conteo de segmentos radicales

colonizados por las estructuras fúngicas divididos entre el total de segmentos observados (Biermann y Linderman, 1981).

Los tratamientos considerados fueron: 1) testigo, 2) *Glomus Zac-19* y 3) *Glomus aggregatum*, distribuidos en un diseño experimental completamente al azar y 12 repeticiones. Se realizaron muestreos destructivos a 70 y 120 días después del trasplante, tomando seis plantas por tratamiento, para su evaluación. Los datos se analizaron con el procedimiento de análisis de varianza, prueba de comparación de medias (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ) y análisis de regresión lineal (SAS Institute, 1995).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Respuesta en Crecimiento de la Planta

A 70 días, la inoculación con HMA sólo produjo efectos significativos en el diámetro de la base del tallo y en la tasa de crecimiento acumulado del tallo (Cuadro 1). Sin embargo, las plantas inoculadas acumularon mayor materia seca (parte aérea, raíz y total) y área foliar y presentaron menor relación raíz:parte aérea (Cuadro 1). A pesar de que, a 70 días, se observaron estructuras fúngicas en las células corticales de las raíces inoculadas, el efecto benéfico significativo de los hongos no se apreció a esta edad. Este efecto puede atribuirse a que hasta esta fecha la simbiosis con los hongos no fue efectiva en el crecimiento en altura ni en materia seca de las plantas. Graham (1986) y Chang y Chien (1989) han mencionado que el efecto significativo de HMA en cítricos y frutales de consistencia leñosa se refleja entre 90 y 120 días después de la inoculación. Por otra parte, el vigor y hábito de crecimiento de los

portainjertos de cítricos también puede ser un factor determinante en el tiempo de respuesta a la inoculación. En este caso, *C. volkameriana* se ha catalogado como un portainjerto de mayor vigor y crecimiento vegetativo comparado con otros portainjertos (Georgiou, 1993).

A 120 días, se observaron respuestas significativas en las variables área foliar, materia seca de la parte aérea, raíz y total, diámetro de la base del tallo y tasa de crecimiento acumulado del tallo por efecto de los HMA, sin observarse diferencias entre los dos endófitos probados (Cuadro 2). Por su parte, la relación raíz:parte aérea no fue modificada por la inoculación con HMA, observándose valores similares a los de plantas testigo. González-Chávez y Ferrera-Cerrato (1994, 1996) obtuvieron respuestas significativas en altura, diámetro de tallo y materia seca, por efecto de la inoculación con HMA en *C. aurantium* y *C. volkameriana*. Estos resultados destacan la dependencia de este frutal a los endófitos micorrízicos. Davies *et al.* (2000) mencionaron que los HMA pueden reducir el crecimiento de la raíz, favoreciendo con ello el crecimiento de la parte aérea en mayor proporción. Sin embargo, en *C. volkameriana*, el crecimiento de la parte aérea en plantas inoculadas tuvo similar proporción con el crecimiento del sistema radical, por lo que el efecto no fue significativo con plantas testigo (Cuadro 2).

### Efecto en la Tasa de Fijación de CO<sub>2</sub>, Distribución de P y Azúcares Solubles

La estimulación de la tasa de crecimiento acumulado del tallo y materia seca por los HMA estuvo directamente relacionada con la tasa de fijación de CO<sub>2</sub>, la cual fue significativamente mayor en

Cuadro 1. Efecto de la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares en variables de crecimiento de *Citrus volkameriana*, 70 días después del trasplante.

Tratamiento	Área foliar cm <sup>2</sup>	Diámetro de la base del tallos cm	Tasa de crecimiento acumulado del tallos cm <sup>3</sup> día <sup>-1</sup>	Materia seca		Relación raíz:parte aérea g g <sup>-1</sup>	Materia seca total g
				Parte aérea	Raíz		
Testigo	23.3 a	0.04 b	0.0002 b	0.17 a	0.06 a	0.35 a	0.23 a
<i>Glomus Zac-19</i>	47.3 a	0.07 a	0.0008 a	0.33 a	0.09 a	0.27 a	0.42 a
<i>Glomus aggregatum</i>	55.4 a	0.07 a	0.0008 a	0.42 a	0.11 a	0.26 a	0.53 a
DMS	45.4	0.02	0.005	0.45	0.08	0.16	0.44

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ). DMS = diferencia mínima significativa. n = 6.

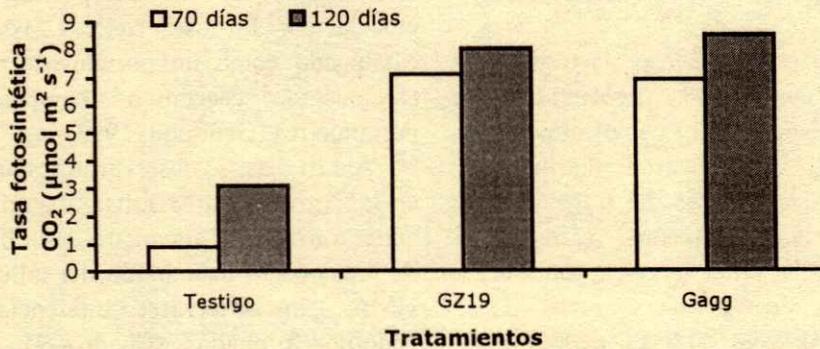


Figura 1. Efecto de la inoculación con HMA sobre la tasa de fijación de CO<sub>2</sub> de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq, a 70 y 120 días del trasplante. GZ19 = *Glomus Zac-19*, Gagg = *Glomus aggregatum*. Letras idénticas sobre las barras, en su respectiva fecha, son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha = 0.05$ ). DMS = diferencia mínima significativa. n = 6.

Cuadro 2. Efecto de la inoculación con hongos micorrizcos arbusculares en variables de crecimiento de *Citrus volkameriana*, 120 días después del trasplante.

Tratamiento	Área foliar cm <sup>2</sup>	Diámetro de la base del tallo cm	Tasa de crecimiento acumulado del tallo cm <sup>3</sup> día <sup>-1</sup>	Materia seca		Relación raíz:parte aérea g g <sup>-1</sup>	Materia seca total g
				Parte aérea g	Raíz g		
Testigo	22.1 b	0.14 b	0.001 b	0.29 b	0.15 b	0.52 a	0.44 b
<i>Glomus Zac-19</i>	223.4 a	0.29 a	0.021 a	2.51 a	1.22 a	0.49 a	3.74 a
<i>Glomus aggregatum</i>	227.9 a	0.32 a	0.026 a	2.78 a	1.42 a	0.51 a	4.20 a
DMS	53.8	0.06	0.01	0.82	0.53	0.09	1.47

Medias con la misma letra en cada columna, son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha = 0.05$ ). DMS = diferencia mínima significativa. n=6.

plantas micorrizadas (Figura 1). La inoculación con HMA propició un incremento de 677 y 164% en la fijación de CO<sub>2</sub>, con respecto al testigo, a 70 y 120 días, respectivamente. Reyes-Santamaría *et al.* (2000) reportaron que la fotosíntesis induce aumentos en la acumulación de materia seca, así como incrementos en el peso específico de hojas de cítricos.

Alarcón *et al.* (1998), Aguilera-Gómez *et al.* (1999), Manjarrez *et al.* (1999) y Davies *et al.* (2000) mencionaron que los HMA son capaces de modificar el intercambio gaseoso e inducir mayor tasa fotosintética en sus hospedantes, haciendo más eficiente el uso de agua y la actividad de la enzima rubisco para captar CO<sub>2</sub>. Este efecto permite a la planta sintetizar compuestos de carbono altamente energéticos que influyen no sólo en el crecimiento de las plantas, sino también en satisfacer los requerimientos de los hongos.

En gran parte, el beneficio de los HMA en la fotosíntesis se relaciona con el aumento del contenido de clorofila en hojas (Davies *et al.*, 2000), mismo que es mayor en plantas de cítricos en plena época de crecimiento, ya que en esta etapa se presenta mayor demanda de fotoasimilados (Reyes-Santamaría *et al.*, 2000).

Aun cuando el efecto de los HMA en algunas variables de crecimiento no fue significativo a 70 días, la presencia de las estructuras de HMA en raíces favoreció la estimulación de la tasa de fijación de CO<sub>2</sub>, por la posible mayor captación de P propiciada por los hongos (Smith *et al.*, 1998), tanto en hojas y tallos, como en raíces, desde 70 hasta 120 días (Figura 2).

La concentración de azúcares solubles, a 70 días, fue menor en hojas y tallos de plantas inoculadas (Figura 3), mientras que, en raíz, la concentración fue

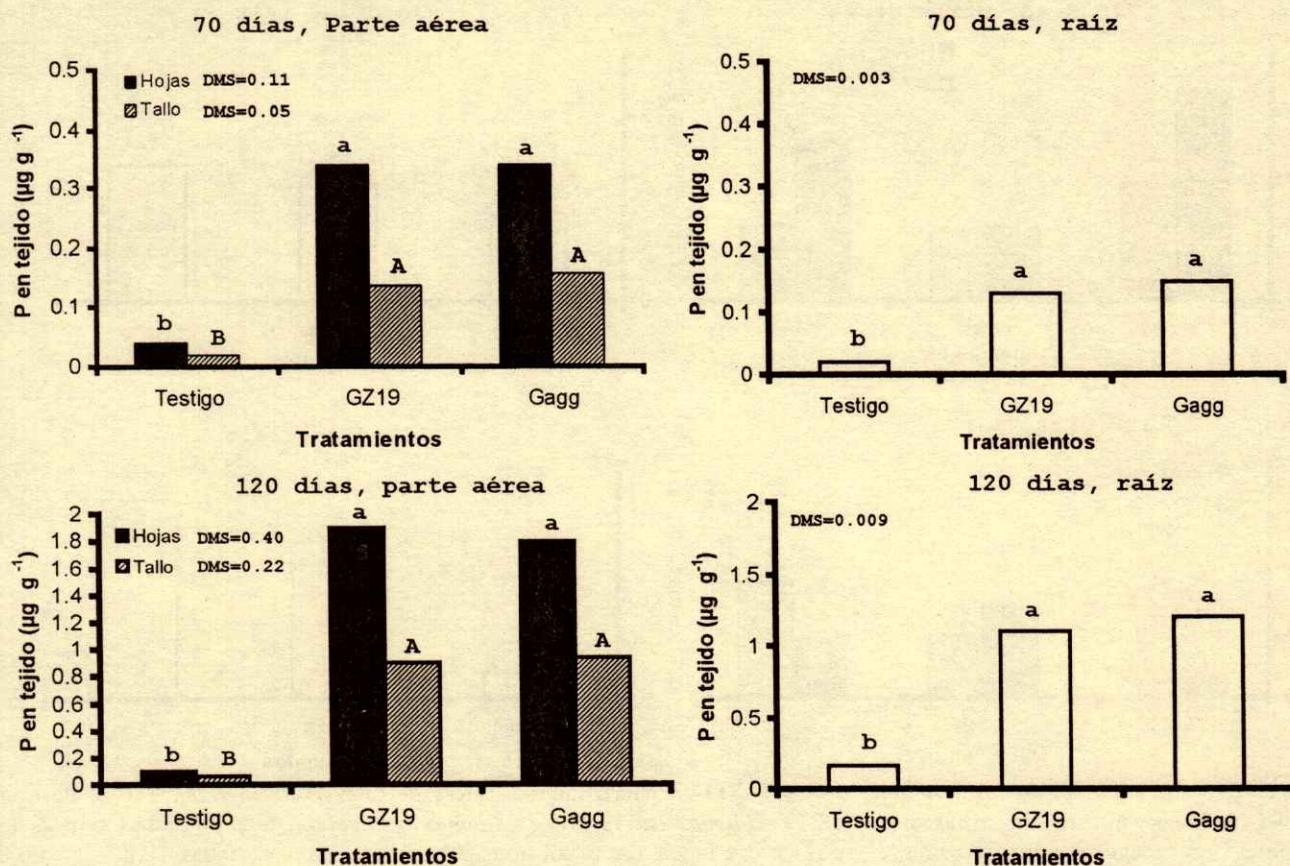


Figura 2. Concentración de fósforo en hojas, tallo y raíces de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq en simbiosis con hongos micorrízicos arbusculares (GZ19 = *Glomus Zac-19*, Gagg = *G. aggregatum*), a 70 y 120 días del trasplante. Letras idénticas sobre las barras, en su respectiva figura, son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha = 0.05$ ). DMS = diferencia mínima significativa.  $n = 6$ .

ligeramente mayor (no significativo) en comparación con el testigo (Figura 3). Los HMA modificaron significativamente este comportamiento a 120 días. En este caso, las mayores concentraciones de azúcares se observaron en hojas y tallos así como en raíces de plantas inoculadas, lo que denota la demanda de estas fuentes carbonadas por los hongos (Figura 3). A 120 días, *G. aggregatum* presentó mayor demanda de estos azúcares en comparación con *Glomus Zac-19* (Figura 3).

De acuerdo con la Figura 2, los HMA produjeron incrementos superiores a 1500, 950 y 700% en la concentración de P en hojas, tallos y raíces, respectivamente, en comparación con el testigo. Con base en el análisis de regresión lineal, los HMA no sólo incrementaron significativamente la absorción de P por

las plantas ( $R^2 = 0.68$ ; Figura 4e), sino que también favorecieron el aprovechamiento de este elemento, lo cual se reflejó en el incremento de la fotosíntesis ( $R^2 = 0.44$ ; Figura 4d), la cual presentó relación significativa con la colonización micorrízica ( $R^2 = 0.66$ ; Figura 4c). Con base en la literatura, se cumple el efecto del fósforo en el incremento de la actividad fotosintética de las plantas (Natr, 1992), así como la contribución de los HMA en la absorción y translocación de P hacia las plantas (Sylvia, 1999).

A pesar de que el sustrato de crecimiento para las plantas presentó concentración media de P ( $18 \mu\text{g g}^{-1}$ ), la limitada expresión del crecimiento de plantas testigo se atribuyó a la falta de capacidad de su sistema radical para captarlo eficientemente, aun cuando éste se encuentre disponible. En contraste, la red de hifas

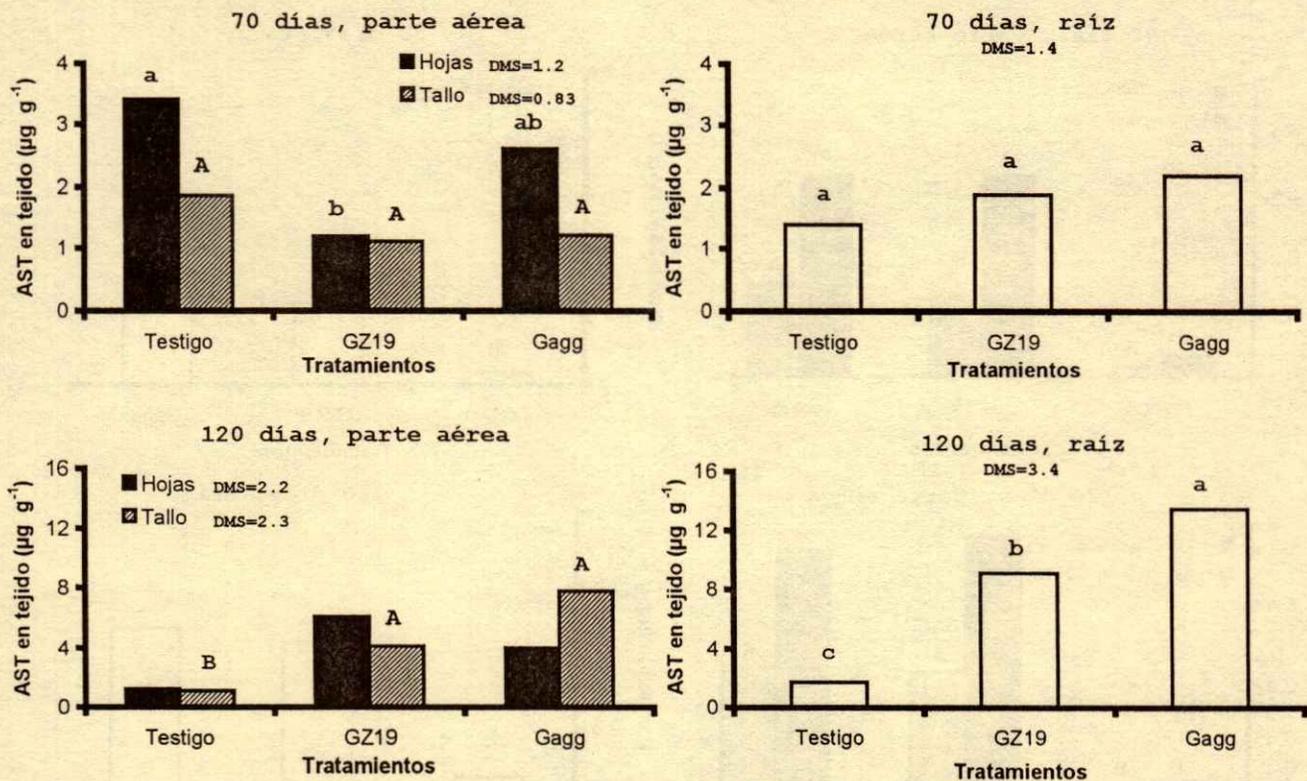


Figura 3. Concentración de azúcares solubles totales (AST) en hojas, tallos y raíces de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq en simbiosis con hongos micorrizicos arbusculares (GZ19 = *Glomus Zac-19*, Gagg = *Glomus aggregatum*), a 70 y 120 días después del trasplante. Letras idénticas sobre las barras, en su respectiva figura, son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha = 0.05$ ). DMS = diferencia mínima significativa.  $n = 6$ .

que se establece interna y externamente de la raíz en plantas inoculadas, permitió mayor capacidad de absorción y aprovechamiento de este nutrimento ( $R^2 = 0.68$ ; Figura 4e). La tasa de crecimiento de una planta y el aumento de su materia seca están determinados por la acumulación de P en el tejido vegetal, además del efecto que la simbiosis micorrizica tiene sobre el estado nutricional y sobre la fisiología de la planta (Smith y Gianinazzi-Pearson, 1988; Smith *et al.*, 1994, 1998). La respuesta del crecimiento en materia seca producida presentó correlación significativa ( $R^2 = 0.69$ ; Figura 4a), tanto por el establecimiento de la simbiosis micorrizica, como por el efecto de la fotosíntesis ( $R^2 = 0.44$ ; Figura 4b).

La colonización de HMA influye en el estado nutricional de las plantas y en la fotosíntesis, además, es posible que influya en las relaciones fitohormonales de sus hospedantes, como lo indican Varela y Estrada-Torres (1999). Lo anterior puede relacionarse con la promoción del crecimiento de *C. volkameriana* por efecto de los HMA, a 120 días.

Los HMA a 70 días presentaron mayor demanda de azúcares solubles totales (Figura 3), ya que, de acuerdo con el análisis de regresión lineal, para esta fecha (datos no presentados) la colonización micorrizica tuvo mayor demanda de azúcares en el sistema radical de las plantas. Este efecto representó una relación negativa ( $y = 0.0809 - 0.001x$ ;  $R^2 = 0.34$ , Pr. F = 0.01), al comparar este comportamiento con lo observado en plantas testigo (Figura 3). Este efecto se corrobora con el alto contenido de azúcares cuantificados para plantas testigo, tanto en hojas, como en tallo, en comparación con plantas inoculadas (Figura 3). No obstante, la demanda de carbono por los HMA no produjo reducciones de materia seca acumulada en las plantas inoculadas (Cuadro 1), por el contrario, en apariencia, el vigor de estas plantas fue mayor que el de plantas testigo. Esto permite establecer que la síntesis de azúcares solubles totales es favorecida por el flujo de P hacia la parte aérea de la planta (Figura 5), mediante el beneficio del micelio de los HMA en la captación de P, a partir del sustrato.

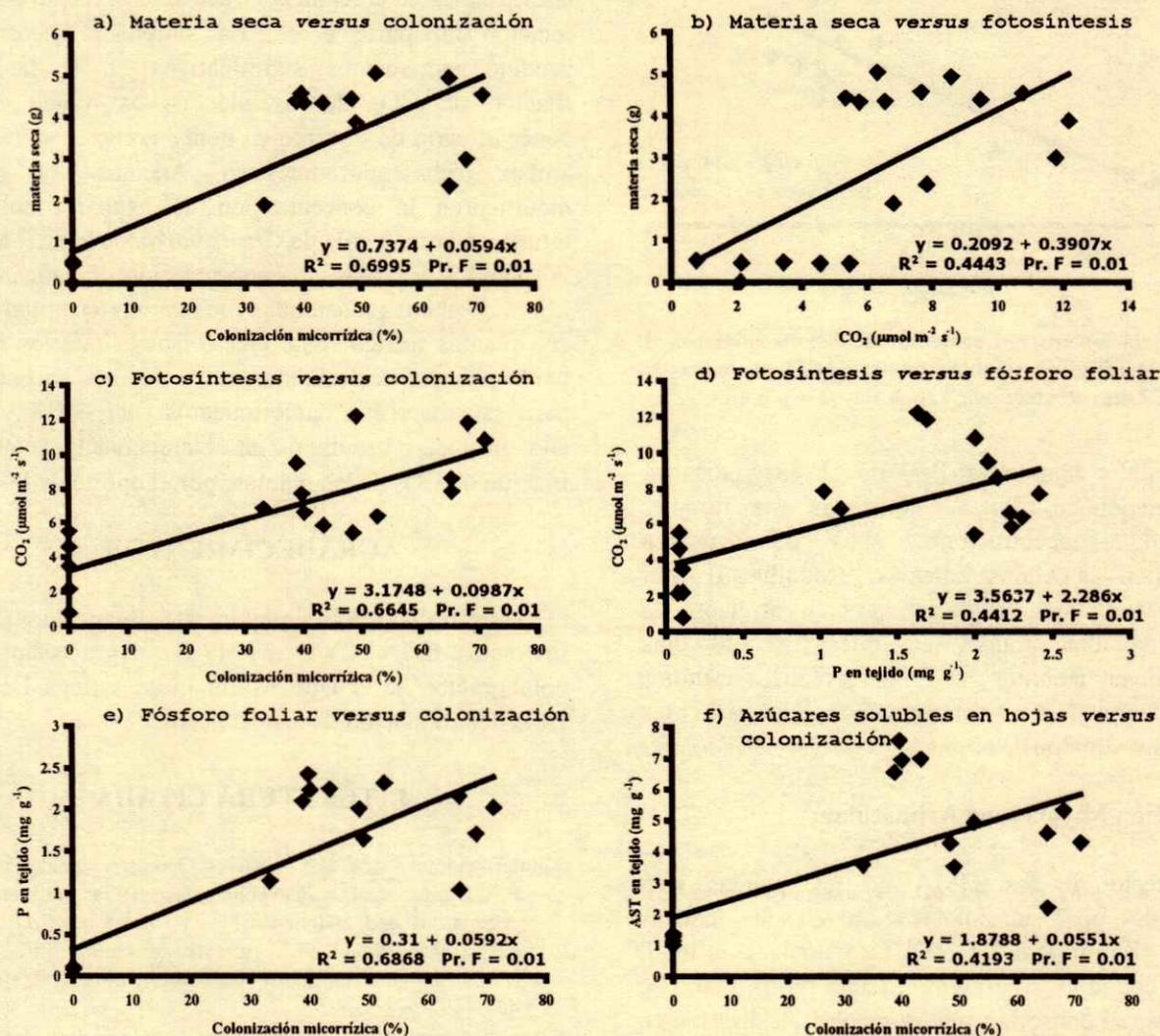


Figura 4. Relaciones entre variables de crecimiento y fisiológicas de plantas de *Citrus volkameriana* en simbiosis con HMA, a 120 días: (a) materia seca versus colonización micorrízica, (b) materia seca versus fotosíntesis, (c) fotosíntesis versus colonización micorrízica, (d) fotosíntesis versus fósforo foliar, (e) fósforo foliar versus colonización micorrízica, (f) azúcares solubles totales (AST) en hojas versus colonización micorrízica.

De manera general, puede establecerse que, conforme se establece la simbiosis micorrízica, la planta tiende a sintetizar mayor concentración de azúcares solubles totales en las hojas (Figura 4f). Lo anterior, con la finalidad de satisfacer no sólo la demanda de la planta por sí misma, sino que, también, el carbono requerido por los HMA establecidos en la raíz. Jones *et al.* (1998) mencionaron que el incremento del flujo de P en plantas en simbiosis con HMA, es el factor determinante que propicia el

aumento del crecimiento de las plantas, lo que se constata con la correlación observada entre colonización micorrízica y concentración de P en hojas ( $R^2 = 0.68$ ; Figura 4e).

Existen diferencias entre HMA para aprovechar sacarosa, glucosa y fructosa. Al parecer, los hongos utilizan preferentemente glucosa; sin embargo, la fructosa puede estar disponible en mayor proporción, ya que las plantas utilizan a la glucosa para su actividad fisiológica (Bago *et al.*, 2000). Por otra

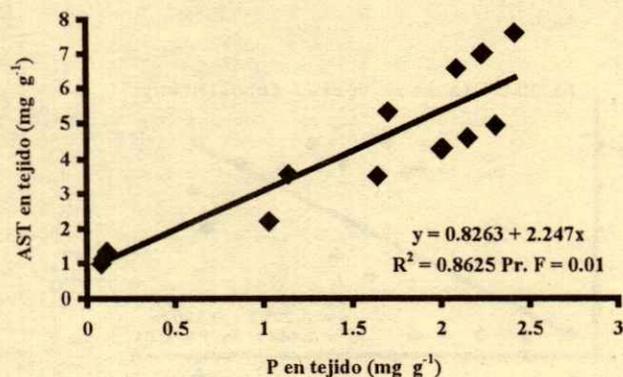


Figura 5. Relación entre el contenido de fósforo foliar con el contenido de azúcares solubles totales (AST) en hojas de plantas de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq., a 120 días.

parte, Smith y Gianinazzi-Pearson (1988) indicaron que el almidón en células colonizadas está ausente, manteniendo concentraciones altas de azúcares reductores en las células radicales, disponibles para la planta. Esto puede explicar la concentración de azúcares solubles totales en raíces a 120 días (Figura 3); sin embargo, se sugiere realizar estudios que contemplen la determinación de azúcares reductores y almidón.

#### Colonización Micorrízica Arbuscular

El efecto de los HMA en las plantas está influenciado por su colonización en las células corticales (Smith *et al.*, 1998). La colonización total, tanto del hongo *G. aggregatum* (cepa pura), como de los hongos del consorcio micorrízico, a 70 días fue en promedio 38%, por arbuscúlos 20% y en el caso de vesículas fue menor que 6%. Sin embargo, no se observaron diferencias estadísticas significativas entre la colonización por la cepa pura y el consorcio micorrízico. A 120 días, *G. aggregatum* presentó mayor colonización total (58%) mientras que en *Glomus* Zac-19 fue de 43%, cuya diferencia no fue significativa; mientras que el porcentaje de arbuscúlos y vesículas en ambos hongos fue en promedio de 30 y 4%, respectivamente. No se observó colonización por HMA en plantas testigo en los dos muestreos.

#### CONCLUSIONES

- La inoculación con HMA no produjo incrementos significativos en la altura, materia seca y relación

raíz:parte aérea de las plantas a 70 días, mientras que a 120 días, el beneficio de los HMA se apreció en todas las variables de crecimiento evaluadas, excepto para la relación raíz:parte aérea. La simbiosis micorrízica produjo incrementos significativos en la tasa de fijación de CO<sub>2</sub> de las plantas, así como en la concentración de P, tanto en hojas, como en raíces, en ambas fechas de muestreo. Además, los HMA modificaron la concentración de azúcares solubles totales en hojas y raíz de *Citrus volkameriana*. Tanto a 70 como a 120 días, la concentración de azúcares en raíces de plantas inoculadas fue mayor en comparación con plantas testigo. Este efecto denota que los HMA participan como demandantes de fuentes carbonadas para satisfacer sus requerimientos energéticos y, con ello, propiciar beneficios en el crecimiento y tasa de fijación de CO<sub>2</sub> de las plantas, por el aporte de P.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto CONACYT 31947-B. Agradecemos la colaboración de la Dra. María Luisa Ortega Delgado en la determinación de azúcares solubles.

#### LITERATURA CITADA

- Aguilera-Gómez, L., F.T. Davies Jr., V. Olalde-Portugal, S.A. Duray y L. Phavaphutanon. 1999. Influence of phosphorus and endomycorrhiza (*Glomus intraradices*) on gas exchange and plant growth of chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis). *Photosynthetica* 36: 441-449.
- Alarcón, A. y R. Ferrera-Cerrato. 1999. Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra* 17: 171-191.
- Alarcón, A., R. Ferrera-Cerrato, A. Villegas-Monter y J.J. Almaraz. 1998. Efecto de la simbiosis micorrízica en la fotosíntesis de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq. pp. 119-125. In: Zulueta, R.R., M.A. Escalona A. y D. Trejo A. (eds.). *Avances de la investigación micorrízica en México*. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México.
- Bago, B., C. Azcón-Aguilar, Y. Shachar-Hill y P.E. Pfeffer. 2000. El micelio externo de las micorrizas arbusculares como puente simbiótico entre la raíz y su entorno. pp. 71-86. In: Alarcón, A. y R. Ferrera-Cerrato (eds.). *Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular*. Mundi Prens. México.
- Biermann, B. y R.G. Linderman. 1981. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae. A proposed method towards standardization. *New Phytol.* 87: 423-432.

- Chang, B.K. y K.S. Chien. 1989. VA mycorrhizae of citrus seedlings inoculated with *Glomus epigaeum* and its growth effects. *Agric. Ecosystems Environ.* 29: 35-38.
- Davies, F.T. Jr., A.A. Estrada-Luna, T.L. Finnerty, J.N. Egilla y V. Olalde-Portugal. 2000. Applications of mycorrhizal fungi in plant propagation systems. pp. 120-138. *In: Alarcón, A. y R. Ferrera-Cerrato (eds.). Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular.* Mundi Prens. México.
- Etchevers B., J.D., J.T. Moraghan e I.R. Chowdhury. 1978. Analysis of sugarbeet petioles for phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 9: 905-914.
- Georgiou, A. 2002. Evaluation of rootstocks for 'Clementine' mandarin in Cyprus. *Scientia Horticulturae* 93: 29-38.
- González-Chávez, M.C. y R. Ferrera-Cerrato. 1994. Interacción de la micorriza V-A y la fertilización fosfatada en diferentes portainjertos de cítricos. *Terra* 12: 338-344.
- González-Chávez, M.C. y R. Ferrera-Cerrato. 1996. Efecto de diferentes dosis de inóculo endomicorrizico en la dinámica de crecimiento de *Citrus volkameriana*. pp. 374-376. *In: Pérez-Moreno, J. y R. Ferrera-Cerrato (eds.). Nuevos horizontes en agricultura.* Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Montecillo, Estado de México, México.
- González-Chávez, M.C., R. Ferrera-Cerrato y J. Pérez-Moreno. 1998. Biotecnología de la micorriza arbuscular en frutales. Universidad Autónoma de Tlaxcala y Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Graham, J.H. 1986. Citrus mycorrhizae: Potential benefits and interactions with pathogens. *HortScience* 21: 1302-1305.
- Hurtado, T. y E. Sieverding. 1986. Estudio del efecto de hongos formadores de micorriza vesículo-arbuscular (MVA) en cinco especies latifoliadas regionales en la zona geográfica del Valle de Cauca, Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 16: 109-115.
- Jaizme-Vega, M.C. y R. Azcón. 1995. Responses of some tropical and subtropical cultures to endomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* 5: 213-217.
- Jones, M.D., D.M. Durall y P.B. Tinker. 1998. A comparison of arbuscular and ectomycorrhizal *Eucalyptus coccifera*: Growth response, phosphorus uptake efficiency and external hyphal production. *New Phytol.* 140: 125-134.
- Lovato, P.E., V. Gianinazzi-Pearson, A. Trouvelot y S. Gianinazzi. 1996. The state of art of mycorrhizas and micropropagation. *Adv. Hort. Sci.* 10: 46-52.
- Manjarrez, M.M.J., R. Ferrera-Cerrato y M.C. González-Chávez. 1999. Efecto de la vermicomposta y la micorriza arbuscular en el desarrollo y tasa fotosintética de chile serrano. *Terra* 17: 9-15.
- Natr, L. 1992. Mineral nutrients: A ubiquitous stress factor for photosynthesis. *Photosynthetica* 27: 271-294.
- Phillips, J.M. y D.S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment to infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
- Reyes-Santamaría, M.I., A. Villegas-Monter, M.T. Colinas-León, y G. Calderón-Zavala. 2000. Peso específico, contenido de proteína y de clorofila, en hojas de naranjo y tangerino. *Agrociencia* 34: 49-55.
- SAS Institute, Inc. 1995. SAS/STAT User's guide, version 6.03. Cary, NC.
- Smith, S.E. y V. Gianinazzi-Pearson. 1988. Physiological interactions between symbionts in vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 39: 221-244.
- Smith, S.E. y D.J. Read. 1997. *Mycorrhizal symbiosis.* Second Edition. Academic Press, Hortcourt Brace & Co. Publishers. London, UK.
- Smith, S.E., S. Dickson, C. Morris y F.A. Smith. 1994. Transfer of phosphate from fungus to plant in VA mycorrhizas: Calculation of the area of symbiotic interface and fluxes of P from two different fungi to *Allium porrum* L. *New Phytol.* 127: 93-99.
- Smith, S.E., G.M. Rosewarne, S.M. Ayling, S. Dickson, D.P. Schachtman, S.J. Barker, D.J. Reid y F.A. Smith. 1998. Phosphate transfer between vesicular-arbuscular, mycorrhizal symbionts: Insights from confocal microscopy, microphysiology, and molecular studies. pp. 111-123. *In: Lynch, J.P. y J. Dieckman (c.l.s.). Phosphorus in plant biology: Regulatory roles in molecular, cellular, organismic, and ecosystem processes.* American Society of Plant Physiologists. Rockville, MD.
- Southgate, D.A.T. 1976. Determination of food carbohydrates. App. Sci. Publishers. London, UK.
- Sylvia, D.M. 1999. Mycorrhizal symbioses. pp. 408-426. *In: Sylvia, D.M., J.J. Fuhrmann, P.G. Hartel y D.A. Zuberer (eds.). Principles and applications of soil microbiology.* Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Varela, L. y A. Estrada-Torres. 1999. El papel de los microorganismos de la rizosfera y de la micorriza en la absorción de nutrimentos minerales y agua. pp. 137-150. *In: Orellana, R., J.A. Escamilla y A. Larqué S. (eds.). Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos.* Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

# MEJORAMIENTO DEL MANEJO DE DISTRITOS Y MÓDULOS DE RIEGO UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

## Improvement of Management of Irrigation Modules and Districts Using Geographic Information Systems

Enrique Mejía-Saenz<sup>1†</sup>, Adolfo Exebio-García<sup>1</sup>, Enrique Palacios-Vélez<sup>1</sup>,  
Ana Laura Santos-Hernández<sup>1</sup> y Ma. Eugenia Delgadillo-Piñón<sup>1</sup>

### RESUMEN

La toma de decisiones sobre la planeación de las actividades de un Distrito de Riego y sus Módulos debe apoyarse en el conocimiento y análisis de la información que se genera en éstos, con la finalidad de aprovechar al máximo los recursos disponibles. Las actividades que se realizan en las diversas áreas técnicas de los distritos y módulos de riego, se programan y ejecutan de acuerdo con dos tipos de información: estadística (estadísticas agrícolas, hidrometría, plan de riegos) y planos temáticos. En el manejo del distrito de riego como un sistema de producción, es necesario considerar tres horizontes de tiempo: 1) Desarrollo histórico (evaluación), 2) Manejo en tiempo real (operación) y 3) Proyección de posibles cursos de acción (planeación). Una de las tecnologías para el manejo de la información es el empleo de los Sistemas de Información Geográfica, que permiten trabajar en forma integrada y organizada los datos geográficos (planos) y numéricos (estadísticas agrícolas, estudios diversos y caracterización genérica) con la finalidad de facilitar su almacenamiento, actualización, manipulación, análisis y su presentación en forma gráfica. De tal forma que en la oportunidad requerida, técnicos y usuarios de los distritos y módulos de riego puedan disponer de información adecuada y suficiente para evaluar el desarrollo de sus actividades, así como para planear el mejor uso de los recursos a corto y mediano plazo. En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de un SIG a fin de generar un modelo de operación para el Distrito de Riego 085 La Begoña, Guanajuato, México.

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, estado de México. Tel. (595) 9520200, ext. 1154.

<sup>†</sup> Autor responsable (mejiasae@colpos.colpos.mx)

*Palabras clave:* Padrón de usuarios, operación, conservación, administración, catastro.

### SUMMARY

The making decisions on planning of activities in an irrigation district and its modules must be reinforced by the knowledge and analysis of the information generated by them, all of this with the objective of maximizing the use of the available resources. The activities carried out in the different technical areas of the irrigation districts and modules are programmed and executed basically according to two types of information: numerical-statistical (agricultural statistics, hydrometric, irrigation plan) and thematic charts. In the handling of the irrigation district as a production system, it is necessary to consider three time horizons: 1) historic development (evaluation), 2) Handling in real time (operation) and 3) projection of possible actions (planning). One of the technologies to handle the information is the use of Geographical Information Systems, that permits working in an integrated and organized way with the geographical charts and numerical data (agricultural statistics, diverse studies and genetic characterization) with the objective of making their storage, actualization, manipulation, analysis and graphic presentation easier. So that in the required time, module and district managers and users may have the adequate and sufficient information available to evaluate the achievement of their activities; furthermore, to plan the best use of the resources within a short and medium term. In this work, the results obtained through the development of a GIS model for the Irrigation District 085 La Begoña, Guanajuato, Mexico, are presented.

*Index words: Register of users, operation, conservation, administration, cadastre.*

## INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son utilizados para manejar y analizar una amplia gama de información de diferentes tipos de las ciencias naturales, sociales y de administración pública, para el manejo del medio ambiente y el desarrollo humano.

Los SIG pueden integrar de manera eficiente información proveniente de diferentes fuentes, capturada en diferentes tiempos en un solo sistema para su análisis (Soria *et al.*, 1998). Chuvieco (1990), mencionó que los SIG pueden definirse como bases informatizadas de datos con algún tipo de componente espacial. Esto significa que la información que almacena está referenciada geográficamente, ya sea que trate de mapas, estadísticas o datos climáticos sobre un territorio concreto; estas variables pueden relacionarse mutuamente en formas muy diversas, dado que la información que contienen se almacena en formato digital. Los SIG aprovechan las posibilidades analíticas de las computadoras, facilitando múltiples operaciones que resultan difícilmente accesibles por medios convencionales: generalización cartográfica, integración de variables espaciales, análisis de vecindad, y otros.

Los SIG permiten que el análisis espacial sea más comprensivo al integrar datos relevantes del medio, a diferentes escalas a fin de que estos datos se puedan organizar y ser manejados por los usuarios (Sakthivadil *et al.*, 1999). Es decir, los SIG permiten almacenar la información espacial de forma eficiente, facilitando su actualización y acceso directo para el usuario. En definitiva, amplían las posibilidades de análisis que brindan los mapas convencionales, además de facilitar su almacenamiento y visualización.

En el manejo de información mediante los SIG, es necesario puntualizar que pueden desarrollarse dos tipos de enfoque de análisis: el primero, consiste en analizar zonas individuales que pueden ser descritas a partir de una base de datos previamente capturada; el segundo, se refiere a caracterizar una gran superficie a partir de modelar una malla que permite identificar zonas con características similares dentro de una variabilidad espacial.

A través de la implementación de los SIG, la toma de decisiones sobre la planeación de las actividades de

un Distrito de Riego (DR) y sus Módulos, apoyada en el conocimiento y análisis de la información que en éstos se generan, puede aprovechar al máximo los recursos disponibles.

Las actividades que se realizan en las diversas áreas técnicas del DR, se programan y ejecutan principalmente de acuerdo con dos tipos de información: numérico-estadístico (Estadísticas Agrícolas, Hidrometría, Plan de Riegos) y planos temáticos

En el manejo del DR como un sistema de producción, es necesario considerar tres horizontes de tiempo: desarrollo histórico (evaluación); manejo en tiempo real (operación); y, proyección de posibles cursos de acción (planeación).

El desarrollo de un SIG para un DR y los módulos que lo integran puede permitir, de una manera rápida y confiable: a) disponer, procesar y analizar la información geográfico-estadística generada durante el desarrollo de las actividades que hacen posible el funcionamiento del distrito de riego; b) actualizar el padrón de usuarios; c) actualizar el inventario de infraestructura hidroagrícola; d) integrar el SIG generado, con el sistema de recaudación del DR; y, e) integrar el SIG con la información climática y de operación para la toma de decisiones en tiempo real.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del Área de Estudio

El DR 085 La Begoña se localiza en la parte centro-este del estado de Guanajuato, comprende los municipios de Celaya y Comonfort. Geográficamente está situado entre los paralelos 20° 38' y 21° 07' N y los meridianos 100° 45' y 100° 53' O del meridiano de Greenwich (CNA, 1992).

El DR 085 La Begoña abarca una extensión de 12 389.5 ha y da servicio a 3284 usuarios. La fuente principal del agua para riego proviene del río Laja y su afluente el arroyo Neutla; cuenta con dos presas de almacenamiento: Ignacio Allende e Isidro Orozco Portugal. La red principal de conducción y distribución está compuesta de 35 km de cauce natural del río Laja, entre la presa Ignacio Allende y la derivadora Soria, y por los canales principales de las márgenes derecha e izquierda. El Distrito de Riego también cuenta con 202.72 km de canales, 192.03 km de drenes, 259.16 km de caminos y 147 pozos profundos, de los cuales 21 son oficiales (operados directamente por la Jefatura del Distrito de Riego) y

los demás son de uso particular (operados por los mismos usuarios) (IMTA, 1994). En 1993, se transfirió a los usuarios y se organizó en cuatro módulos de riego: Neutla, Comonfort, Margen Izquierda (M.I.) y Margen Derecha (M.D.)

Cada módulo se divide en secciones y su operación interna se realiza de manera independiente. El módulo Neutla constituye un sistema hidráulico independiente, ya que se deriva por la Presa Isidro Orozco Portugal. Por su parte, los módulos Comonfort, M.I. y M.D se abastecen de la Presa Ignacio Allende. El módulo Comonfort bombea directamente del río Laja; el módulo M.D. inicia en la derivadora Soria y se alimenta con el canal Principal de la Margen Derecha; el módulo M.I. nace en la derivadora Guadalupe, 2 km abajo de la derivadora Soria y se alimenta con el canal principal de la Margen Izquierda.

### Materiales

La información requerida para aplicar un SIG y generar un modelo de operación en el DR 085 corresponde a la topografía a partir de cartas topográficas en escala 1:50 000, ortofotografías del área de estudio en escala 1:20 000 y cartas vectorizadas de vías de comunicación, obtenidas del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) en formato digital. Además, información como: la base de datos de padrón de usuarios generados por el Sistema de Padrón de Usuarios (SIPAD) de la Comisión Nacional del Agua (CNA), planos catastrales del distrito, inventario y planos de infraestructura hidroagrícola, que posee la jefatura del distrito de riego 085 La Begoña, en la Gerencia Estatal de la CNA del estado de Guanajuato. A modo de complemento del SIG, se utilizan imágenes de satélite, previamente procesadas con técnicas de percepción remota, como herramientas de auxilio en la operación de los distritos de riego.

Entre la información digital que se incorpora dentro del SIG, se encuentra el modelo altimétrico que se genera a partir de la base de datos de INEGI en escala 1:50 000, de los Geomodelos de Altimetría del Territorio Nacional (GEMA). Las curvas a nivel generadas para su uso en el SIG se encuentran cada 2 m de altitud.

El software aplicado para el modelo de SIG fue ARCVIEW 3.0 de ESRI Corp.

### Metodología

Una de las tecnologías para el manejo de la información es el empleo de los SIG, que permiten trabajar en forma integrada y organizada los datos geográficos (planos) y numéricos (estadísticas agrícolas, estudios diversos y caracterización genérica) con la finalidad de facilitar su almacenamiento, actualización, manipulación, análisis y su presentación en forma gráfica. De tal forma que, con la oportunidad requerida, técnicos y usuarios de los DR podrán disponer de información adecuada y suficiente para evaluar el logro de sus actividades, así como para planear el mejor uso de los recursos a corto y mediano plazo.

El desarrollo de un modelo de SIG para un distrito de riego, de acuerdo con la experiencia en su implementación en el DR 085 en las pruebas de manejo, permite de una manera rápida y confiable:

- Disponer, procesar y analizar la información geográfico-estadística generada durante el desarrollo de las actividades que hacen posible el funcionamiento del distrito de riego
- Actualizar el padrón de usuarios
- Actualizar el inventario de infraestructura hidroagrícola
- Integrar el SIG generado, con el sistema de recaudación del distrito de riego
- Integrar el SIG con la información climática y de operación para la toma de decisiones en tiempo real

Las capas de información que se digitalizaron corresponden a hidrografía, red de distribución, red de drenaje, catastro, vías de comunicación, estructuras hidroagrícolas y ciudades y poblados. A partir de las capas de información generadas, se realizó el análisis del manejo operativo del distrito de riego; manejo e incorporación de información en bases de datos generados por otras instituciones. Una de estas actividades es el manejo de información topográfica, como variable en el desarrollo de proyectos de riego.

En el caso del manejo del padrón de usuarios, puede realizarse un análisis del plano catastral con respecto al SIPAD.

Otro problema que se tiene en la mayoría de los Distritos de Riego es la venta no oficial de volúmenes de agua de presa; además, se considera que lotes agrícolas regados con agua de pozo también utilizan agua de presa. Así, ambas situaciones impactan de forma negativa en las finanzas de la Asociación de Usuarios, debido a que el cobro del agua se realiza en

la modalidad de ha-riego y se presenta el caso de lotes que no pagan el agua de riego utilizada.

Una vez recopilada la información de avance de riego proporcionada por los canaleros de los módulos de riego, ésta se registra en las bases de datos del SIG del DR. Posteriormente, se contrasta la zona de cultivo en crecimiento detectada a través de imágenes de satélite y, considerando los planos catastrales, digitalizados y georeferenciados con sus respectivos sistemas de conducción y drenaje, puede cuantificarse la superficie cultivada a escala de parcela. Además, durante el ciclo agrícola de otoño-invierno es posible ubicar, en forma rápida y exacta, las parcelas regadas a partir de la superficie cultivada y, dado que las precipitaciones en este ciclo no son significativas para los cultivos en el estado de Guanajuato, pueden detectarse las parcelas de usuarios con derecho y

usuarios precarios que no han realizado el pago del servicio de riego.

Durante el desarrollo de este modelo de SIG, se verificaron las bondades del mismo en el seguimiento de las superficies cultivadas en el DR 085 La Begoña, a través del uso de la imagen de satélite Landsat 7 obtenida para el mes de marzo del año 2000.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados generados para el SIG del DR 085, se detallan a continuación:

### Infraestructura

En la Figura 1, se presenta el plano general de la red de distribución del DR 085, La Begoña, donde

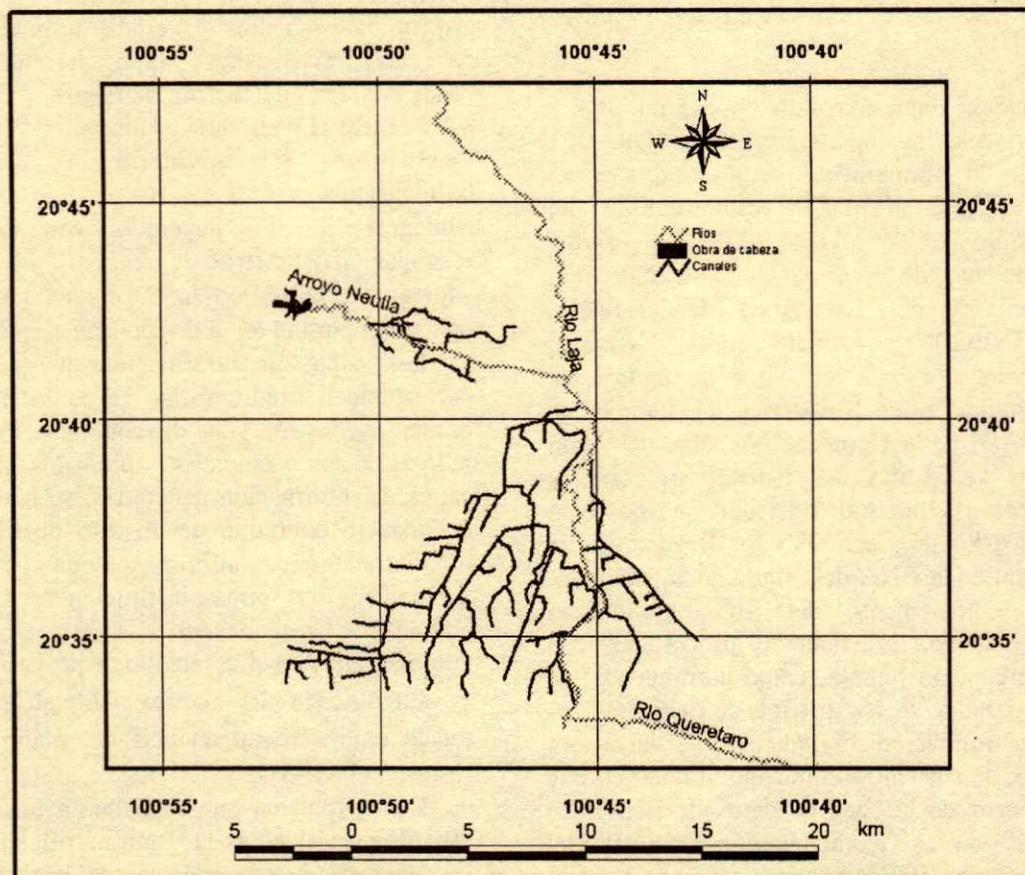


Figura 1. Hidrografía y red de distribución del DR 085 La Begoña, Guanajuato.

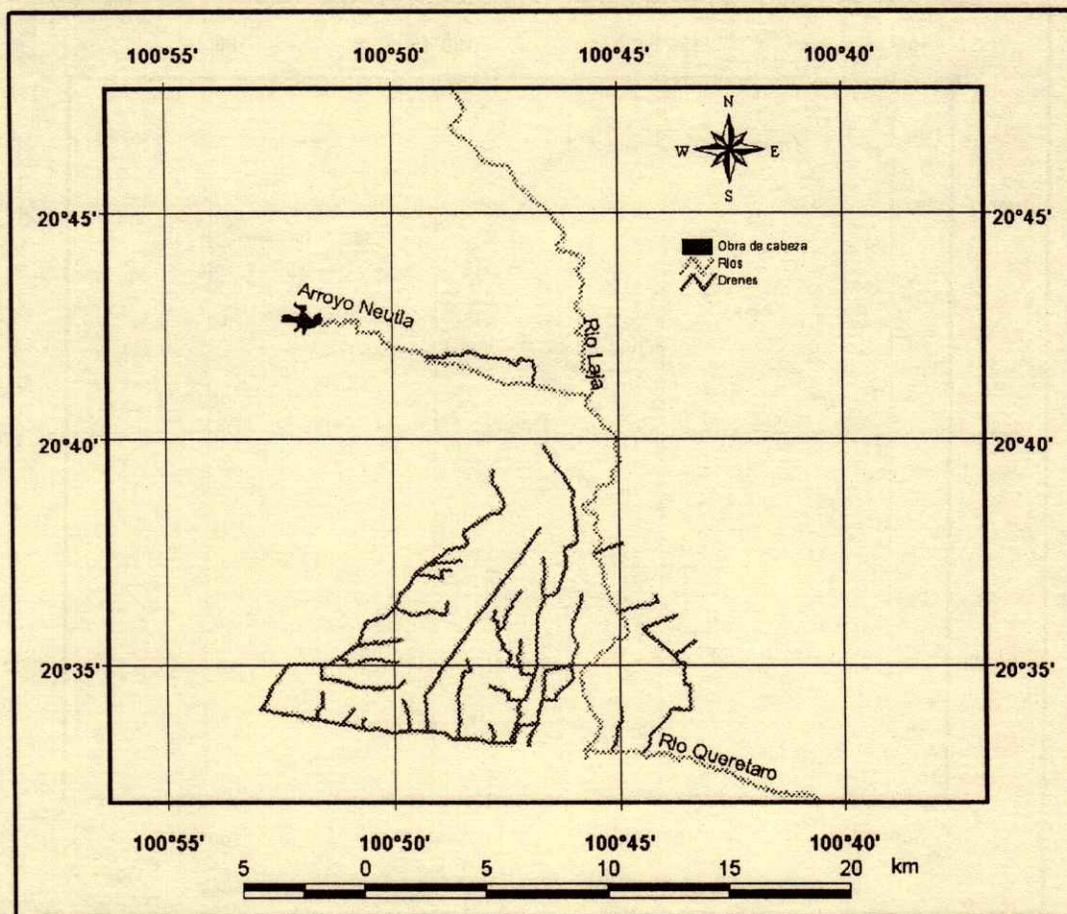


Figura 2. Hidrografía y red de drenaje del DR 085 La Begoña, Guanajuato.

cada canal tiene asignada la información de la base de datos del SIPAD.

En la Figura 2, se muestra la red de drenaje del distrito de riego 085.

La Figura 3 muestra el plano general catastral.

A partir de estos planos base, es posible realizar análisis específicos en las actividades de operación, conservación, administración, ingeniería de riego y drenaje, y contabilidad y finanzas, de los módulos y distritos de riego, como control de superficies cultivadas, seguimiento y avance de siembra, riego, rehabilitación de obra.

Algunas de las utilizaciones que se puede dar al SIG de un distrito o módulo de riego, se presentan a continuación.

#### Análisis de la Topografía del Lugar a Través de un Modelo Altimétrico

La Figura 4 muestra el modelo altimétrico, así como la distribución del plano catastral general, la red de conducción y drenaje del distrito de riego.

Como se muestra en la Figura 4, la zona del DR 085 se encuentra en la parte plana de la región del valle de Celaya. El modelo altimétrico en la operación

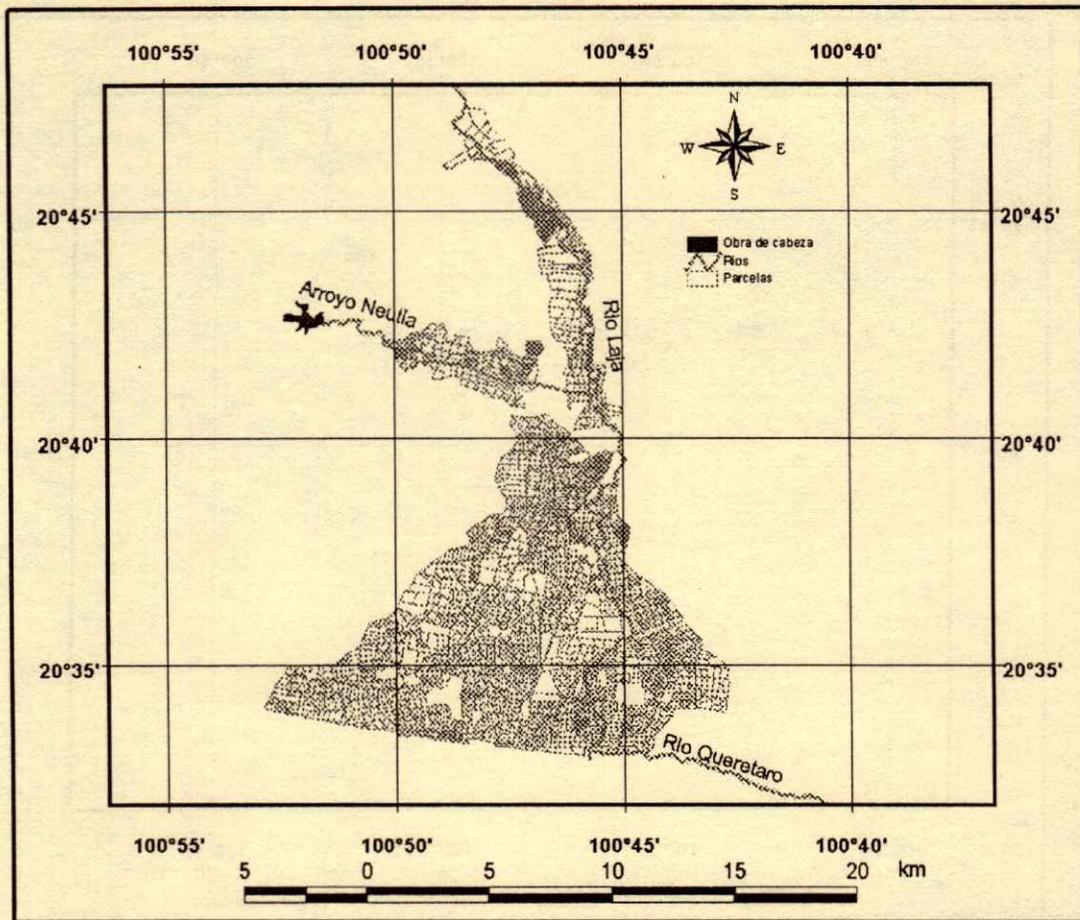


Figura 3. Plano general catastral del DR 085 La Begoña, Guanajuato.

del distrito de riego proporciona información sobre las pendientes del lugar y cauces de escurrimientos naturales.

#### Análisis del Padrón de Usuarios Mediante SIG

La Figura 5 muestra aquellos lotes que no están identificados correctamente, de acuerdo con el padrón de usuarios existente en el distrito de riego.

En esta figura, se observa una cantidad considerable de lotes que tienen problemas de identificación en el padrón de usuarios actual, por lo que es necesario su actualización en la base de datos para superar los problemas actuales que se presentan en la operación, conservación, administración, y contabilidad y finanzas en el Módulo de Riego.

#### Análisis de la Operación

En la Figura 6, se muestran achurados los lotes regados mediante pozo profundo en el ciclo otoño-invierno 1999-2000.

Como parte de las utilidades del SIG, se encuentra el cálculo real de las superficies de cada parcela, de tal forma que la actualización del padrón de usuarios pueda incluir un valor de mayor confiabilidad en cuanto a superficie beneficiada. De igual forma, como se presenta en el siguiente apartado, puede realizarse un cálculo de superficie cosechada y superficie regada, mediante la utilización de técnicas de percepción remota.

Además, la información que se incluye en las bases de datos permite cuantificar y evaluar los

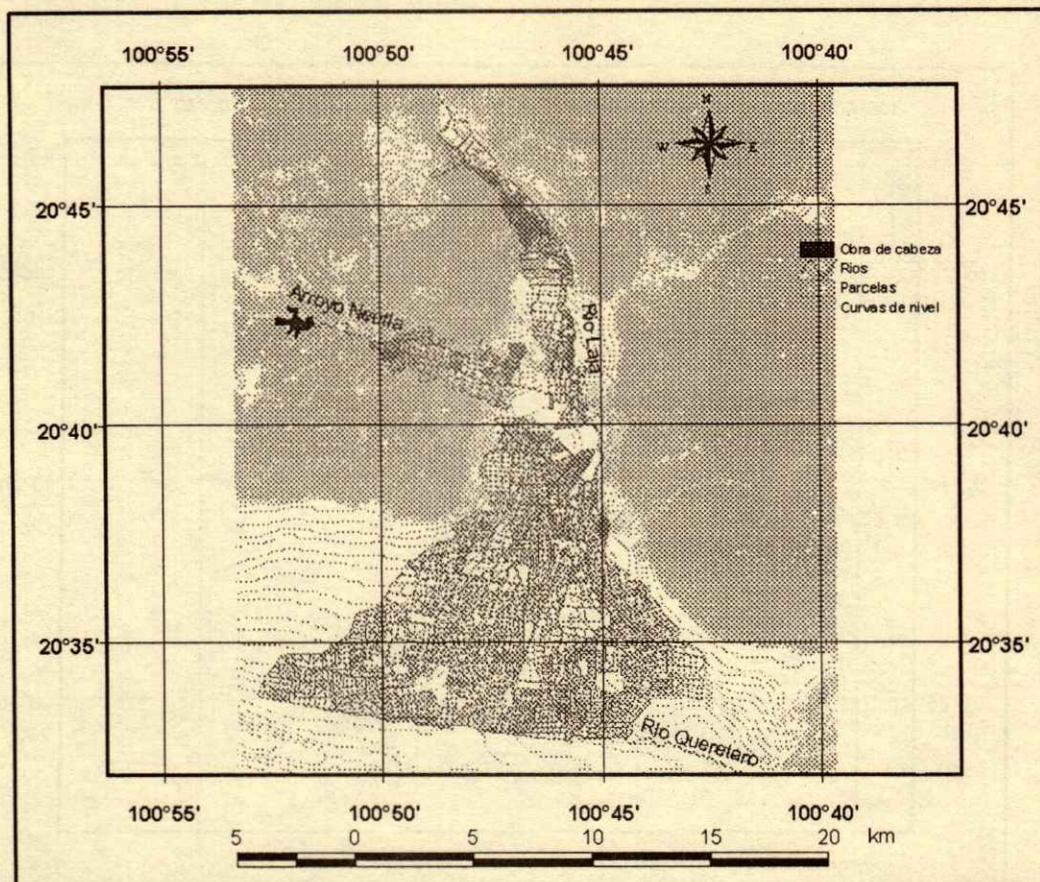


Figura 4. Modelo altimétrico de la zona correspondiente al DR 085, La Begoña, Guanajuato.

requerimientos de inversión de las obras de infraestructura en módulos de riego. Así, dentro de la capa vectorial correspondiente a la red de conducción puede establecerse información sobre el grado de afectación de diferentes tramos de canal, características hidráulicas, y avance en la rehabilitación de la red. En general, el SIG puede ser ampliado con la información estadística de los módulos de riego desde la unidad de superficie o parcela.

#### Evaluación de la Superficie Cultivada a Escala Parcela

La Figura 7 muestra las zonas que, en el momento de la toma de imagen, se encontraban con cultivos en pie.

La figura muestra las parcelas que utilizaron agua para riego de cultivos, durante el mes de marzo de 2000, lo cual es detectable de manera visual. También es posible utilizar criterios y herramientas de clasificación de imágenes a fin de cuantificar en detalle la superficie sembrada.

#### Desarrollos Futuros

Tomando como referencia la metodología expuesta, es posible desarrollar las siguientes actividades:

1) Despliegue gráfico sobre los avances de los programas agrícolas para el mejoramiento de las estadísticas en los ámbitos parcelario, de los módulos y de los distritos de riego.

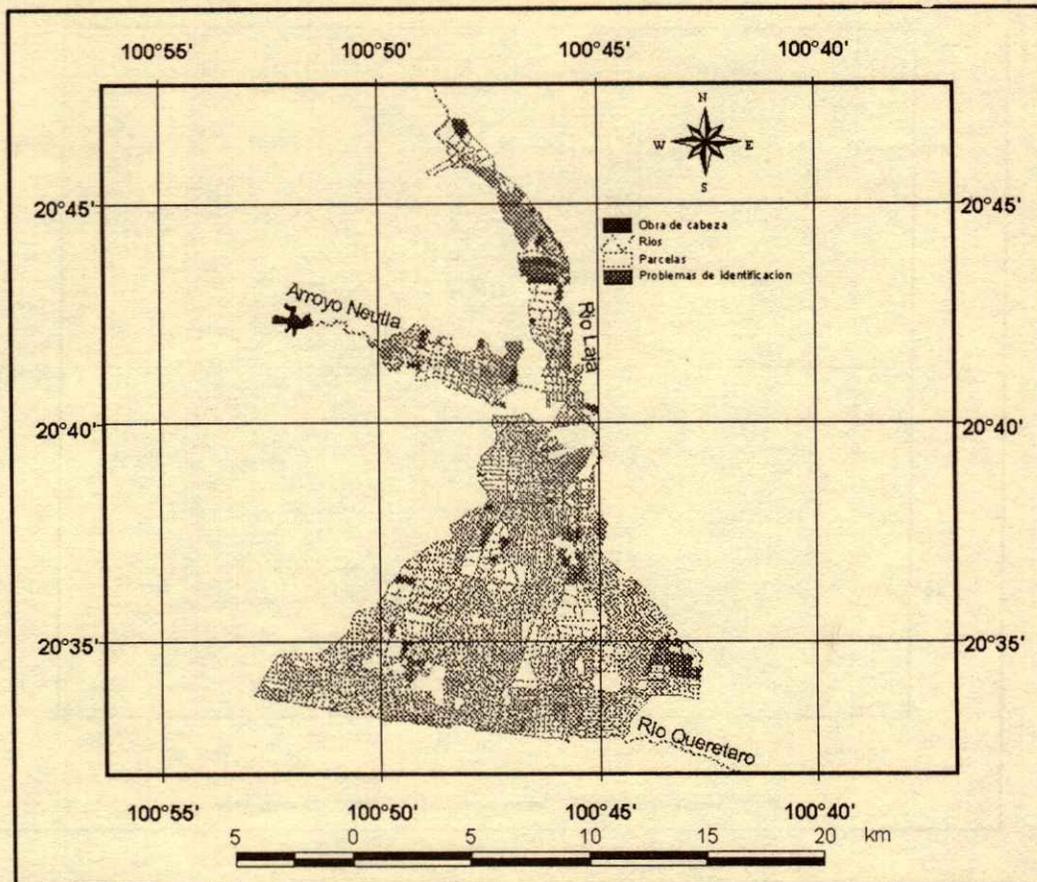


Figura 5. Lotes del DR 085 La Begoña, Guanajuato, que presentan problemas de identificación en el padrón de usuarios

- 2) Verificación y rectificación, en su caso, de áreas regables en planos catastrales y actualización del padrón de usuarios en módulo y distrito de riego, para mejorar la administración.
- 3) Visualización de los avances de los programas de apoyo al campo en distritos y unidades de riego.
- 4) Desarrollo de un sistema para el manejo de la información sobre distribución de aguas, planeación y seguimiento de los programas de conservación de obras y mejoramiento de la administración en los distritos y módulos de riego.
- 5) Integración de la topografía y series de suelos en los SIG para cada distrito de riego
- 6) Integración de las bases de datos de información climática, a diario, de las estaciones automáticas que

se han adquirido en los módulos y distritos de riego, las cuales se encuentran en operación.

7) Integración de modelos de simulación de desarrollo de cultivos para integrar información edáfica, climática y de sensores remotos para mejorar el manejo del agua en general, para la predicción del rendimiento de los cultivos, cuyo objetivo final permitirá incrementar la productividad de los recursos.

8) Las imágenes de satélite que pueden utilizarse en la predicción del rendimiento de cultivos corresponden al sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) satélite Landsat 7, cuya resolución espacial es 30 m. Sin embargo, puede optarse por la utilización de otros sensores, como el MODIS o el AVHRR.

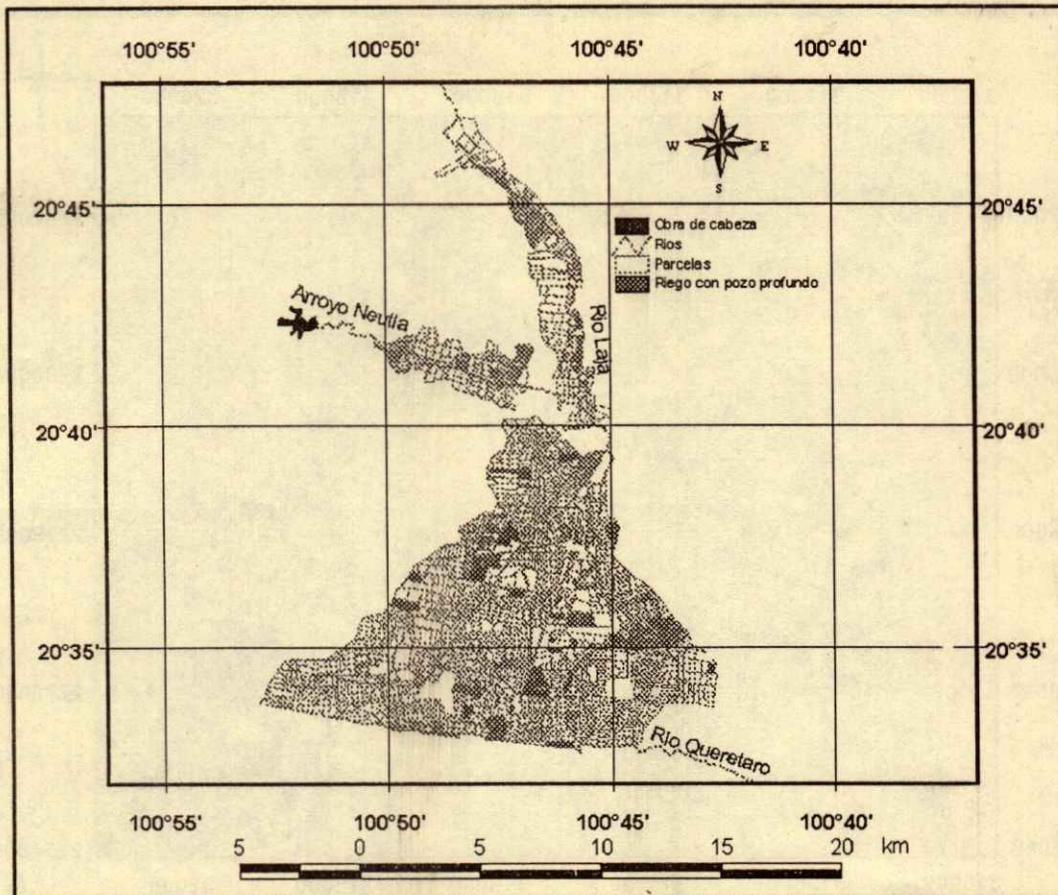


Figura 6. Lotes del DR 085 La Begoña, Guanajuato, que se riegan por medio de pozos profundos en el ciclo otoño-invierno 1999-2000.

### CONCLUSIONES

- Los SIG aplicados en Distritos y Módulos de Riego son una herramienta importante de apoyo en las actividades de operación, conservación, administración, ingeniería de riego y drenaje, y contabilidad y finanzas. Dado que se le incorpora información sustancial de avance de riego, cobro del servicio de riego, programa y avance en la conservación de la infraestructura de riego
- La verificación de las actividades realizadas en los módulos y distritos de riego, puede realizarse de manera oportuna en tiempo y las actividades pueden ser corregidas y marcadas gráficamente.
- Las características de los módulos y distritos de riego, como padrón de usuarios y catastro, pueden ser

fácilmente actualizadas, e identificadas las zonas con problemas de operación y manejo de información.

- Puede darse un mejor seguimiento a la producción de cultivos y realizar actividades de predicción de rendimientos mediante el uso de sensores remotos.

### LITERATURA CITADA

- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1992. Características de los distritos de riego. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola. Gerencia de Distritos de Riego. México, D.F.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección. Rialp S.A. Madrid, España.
- IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1994. Modernización del distrito de riego 085 La Begoña, Guanajuato. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola. Cuernavaca, Morelos, México.

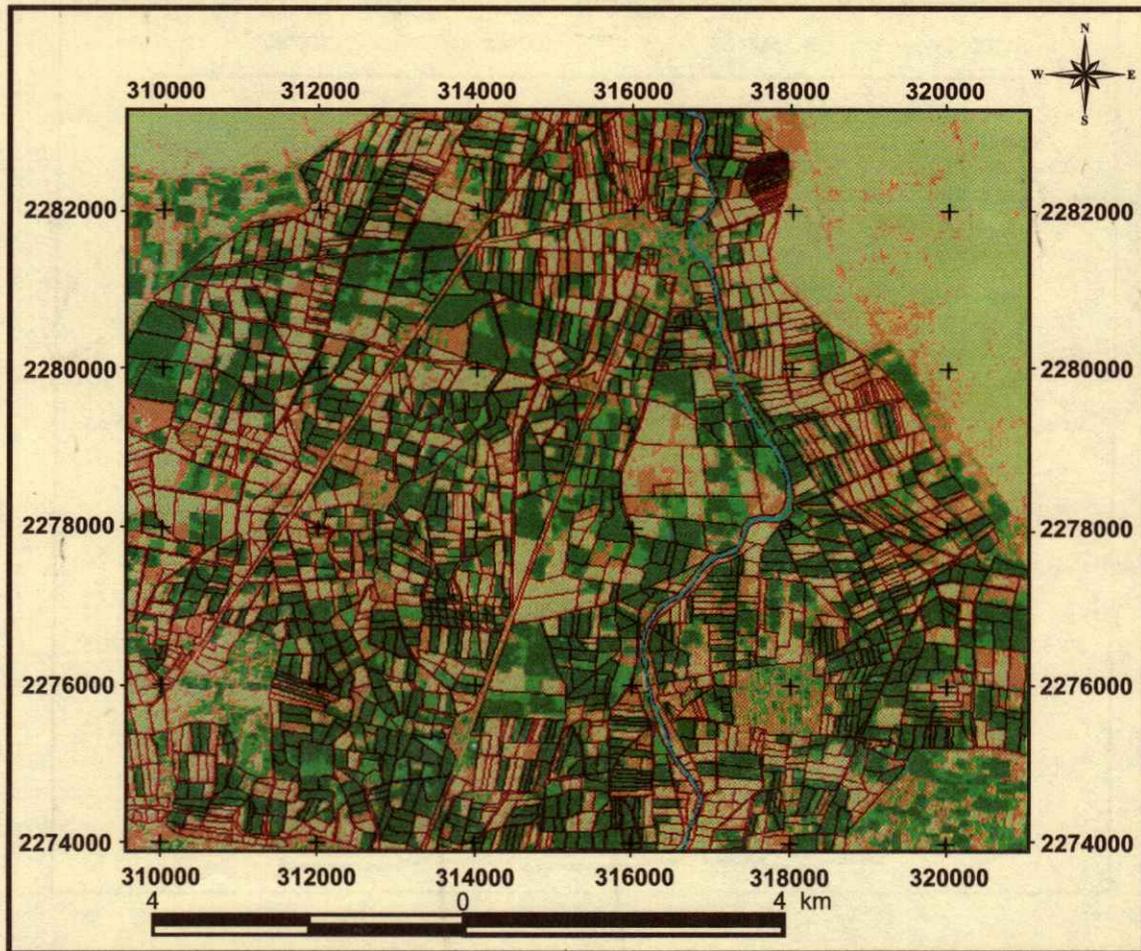


Figura 7. Superficie Cultivada a escala de parcela en el DR 085 La Begoña, Guanajuato.

Pedraza O., J. 2001. Desarrollo de un sistema generador de modelos altimétricos para la República Mexicana. (Sometido a Terra para su publicación).

Sakthivadivel R., S. Thiruvengadachari, U. Amerasinghe, W.G.M. Bastiaanssen y D. Molten. 1999. Performance evaluation of the Bhakra irrigation system, India, using remote sensing and

GIS techniques. Research Report 28. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka.

Soria R., J., C.A Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke H. 1998. Sensores remotos: Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.

# EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DEL DISTRITO DE RIEGO 011 ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO, MÉXICO

## Economic Evaluation of the Transfer Process of the Irrigation District 011 Alto Rio Lerma, Guanajuato, Mexico

Enrique Mejía-Saenz<sup>1‡</sup>, Enrique Palacios-Vélez<sup>1</sup>, Jesús Chávez-Morales<sup>1</sup>, Fedro Zazueta-Ranahan<sup>2</sup>, Leonardo Tijerina-Chávez<sup>1</sup> y Eduardo Casas-Díaz<sup>3</sup>

### RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar una metodología para evaluar el impacto del proceso de transferencia de los distritos de riego del Gobierno Federal a las Asociaciones de Usuarios del Agua (AUA). La evaluación se realizó a través de los siguientes indicadores: productividad marginal del agua de riego, incluyendo la precipitación efectiva; eficiencias de conducción y aplicación de agua; tasas de crecimiento de los componentes del valor de la producción; y beneficio neto de los usuarios. En esta investigación se tomó como estudio de caso la operación del Distrito de Riego 011 "Alto Río Lerma" y sus 11 módulos que lo integran (áreas de riego operadas por las AUA). El distrito de riego se transfirió a las AUA, en 1992. Los resultados obtenidos indican que el proceso de transferencia del Distrito de Riego 011 "Alto Río Lerma" ha resultado benéfico para los usuarios del agua. Sin embargo, algunos errores en el proceso de planeación no se han superado, por el contrario, se han agravado. En este sentido, puede mencionarse la tendencia a usar un volumen mayor de agua que el promedio de aportaciones a las presas de almacenamiento, con lo cual se reduce la productividad del agua utilizada y la capacidad de regulación de las presas. Por otra parte, se ha observado un incremento en la eficiencia del uso del agua y en la productividad de la misma, así como un mejoramiento en el rendimiento de los cultivos, lo cual puede atribuirse, en gran parte, como resultado de un mejor manejo del agua y de los trabajos de mantenimiento por las AUA. Desafortunadamente, el ingreso neto de los productores se ha reducido en

muchos casos por el incremento de los costos de producción y la reducción de los precios de las cosechas. Esta última condición negativa es un efecto directo del proceso de apertura comercial.

*Palabras clave:* Eficiencia de uso de agua, productividad de recursos, ingreso neto.

### SUMMARY

The main objective of this work was to develop a methodology to evaluate the impact of transferring the Federal Irrigation Districts to the Water Users Associations (WUA). The evaluation was carried out with the following indicators: marginal productivity of irrigation water including the effective precipitation, efficiencies of conveyance and application of water, growth rates of the components of the production value, and net income of the users. This research is a case of study the management of the Irrigation District 011 "Alto Río Lerma" and the 11 modules (irrigated areas operated by the WUA) that integrate it. The district was transferred to the users' associations in 1992. The results obtained indicate that the process of transfer of the Irrigation District 011 "Alto Río Lerma," has been beneficial for the water users. Nevertheless, some errors in the planning process have not been surpassed; on the contrary, they have been aggravated. Among these, should be mentioned the tendency to use a volume of water that is larger than the average incoming volume of the reservoir, which reduces productivity of the used water and diminishes the water regulation capacity of the dams. On the other hand, an increase in water use efficiency and water productivity has been observed, as well as an improvement in the crop yields, which could be considered, in large part, a result of better water management and of the maintenance works by the WUA. Unfortunately, a decrease in the producers' net income, in many cases, has been noted, mainly due to an increase in the production costs and a reduction in

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, <sup>3</sup> Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (mejiasae@colpos.colpos.mx)

<sup>2</sup> Universidad de Florida. Gainesville, FL.

crop prices. But this last negative condition is more an effect of the liberalization of the markets.

*Index words:* Water efficiency, resources productivity, net income.

## INTRODUCCIÓN

A finales de la década de los ochenta, el Gobierno Federal tomó la decisión de transferir la responsabilidad de la operación y el mantenimiento de los distritos de riego a sus Asociaciones de Usuarios del Agua (AUA). Una de las principales causas de esta decisión fue que el Gobierno Federal aportaba cerca de 80% de los fondos necesarios para la operación y el mantenimiento de estos sistemas y los fondos federales eran escasos debido a las crisis económicas, lo cual impactó en el deterioro de la infraestructura hidroagrícola y en la disminución de la producción agrícola. Además, el gran subsidio del Gobierno Federal a los Distritos de Riego contrastaba con la total ausencia de apoyo a los usuarios de las pequeñas unidades de riego (Palacios *et al.*, 1998).

Al inicio del proceso de transferencia muchos problemas tuvieron que enfrentarse. Los más importantes, de acuerdo con Palacios *et al.* (1994), fueron:

- La Ley de Aguas Nacionales forzó a la Comisión Nacional del Agua a dividir los Distritos en pequeñas unidades de riego, los cuales se llamaron "Módulos".
- Las cuotas por servicio de riego tuvieron que incrementarse en más de 400% para lograr que los distritos de riego fueran autosuficientes como una condición previa para transferirlos.
- La Comisión Nacional del Agua encontró serias dificultades para organizar a los usuarios en asociaciones civiles, debido en un inicio a la tenencia de la tierra.
- Otras dificultades se encontraron al dividir los distritos de riego en módulos.

Sin embargo, a pesar de las dificultades iniciales, el proceso se ha llevado a cabo de manera satisfactoria, ya que más de 95% de los distritos de riego se han transferido (CNA, 1999).

Es importante indicar que el proceso de transferencia de los distritos de riego a los usuarios se ha desarrollado bajo un escenario de apertura de la economía mexicana a la competencia internacional; la desregulación y la privatización son los elementos más significativos de la política macro-económica en los años recientes (OCDE, 1997).

Las productividades de los recursos, en particular del agua, en los distritos de riego con buen temporal, no pueden evaluarse de igual forma que en los distritos ubicados en climas secos, ya que los requerimientos de agua en los cultivos de otoño se cubren, fundamentalmente, mediante el riego, mientras que en primavera-verano y segundos cultivos, los requerimientos hídricos se cubren, en gran medida, por la lluvia. Sin embargo, es necesario considerar que los cultivos no aprovechan toda la lluvia, por lo cual es necesario tomar en cuenta sólo aquella cantidad disponible para los cultivos, denominada precipitación efectiva.

El principal objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto de la transferencia de los distritos de riego a las AUA para su operación y mantenimiento, en el manejo del agua, en el valor total de la producción, productividad del agua y tierra y en el ingreso neto de los productores. Para llevar a cabo este trabajo, se seleccionó como estudio de caso el Distrito de Riego (DR) 011 Alto Río Lerma, Guanajuato.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El DR 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, el cual inició su operación en el año de 1939, está situado en la parte sur del estado de Guanajuato; comprende una extensión de 110 620 ha en manos de 23 486 usuarios, 55% de los cuales son ejidatarios y 45% son pequeños propietarios. La parcela media global en el distrito de riego es de 4.7 ha, con 3.7 ha en el sector ejidal y 7.6 ha en la pequeña propiedad.

Los datos geográficos medios del distrito son 19° 55' N, 99° 39' O y una altitud de 1722 m. El clima que predomina en la región según Köppen, modificado por García (1981), es Cwah, denominado clima templado sub-húmedo con lluvias en verano, con temperatura media mensual entre 18 y 20 °C y lluvia media anual mayor que 620 mm. El intervalo de heladas es de 10 a 30 días, de noviembre a febrero. Las granizadas son de uno a tres días anuales.

Las obras que abastecen al DR 011 son cuatro vasos de almacenamiento: Presa Tepuxtepec, Presa Solís, Laguna de Yuriria y Presa La Purísima, los cuales mediante cinco presas derivadoras: Chamácuaro, Reforma, Lomo de Toro, Santa Julia y Markazuza, alimentan una red de 475 km de canales principales y 1183 km de canales laterales. Además, el DR 011 cuenta con 1809 pozos profundos, la mayoría de los cuales se construyeron en su mayoría a finales de la década de los setenta e inicios de los ochenta; así

como tres plantas de bombeo sobre el río Turbio, que en la actualidad operan en forma parcial.

El promedio histórico de extracción de las presas es de 1000 millones de m<sup>3</sup> y 350 millones de m<sup>3</sup> de los pozos profundos, para regar una superficie de 140 000 ha año<sup>-1</sup>. La intensidad de uso de la tierra es, en promedio, de 1.3 en los últimos 20 años. Los principales cultivos son trigo, cebada, sorgo y maíz, los cuales representan cerca de 85% del área cosechada; adicionalmente, hay producción importante de alfalfa y hortalizas.

### Uso y Manejo del Agua en el Distrito de Riego

En el DR 11, en general, el agua se usa en forma eficiente. El agua de riego aplicada en exceso escurre al río Lerma y puede usarse en los módulos de riego ubicados aguas abajo. El agua que escurre fuera del distrito de riego, puede utilizarse en otros distritos o unidades de riego ubicados en los estados de Michoacán y Jalisco, llegando en última instancia al lago de Chapala.

Por otra parte, las pérdidas por infiltración que ocurren en la red de distribución, así como una parte del agua de riego, percolan a través del perfil del suelo y recargan los acuíferos que, en la actualidad, se encuentran sobreexplotados. Sin embargo, un uso más eficiente del agua dentro del distrito implica más agua disponible para riego, lo cual produce un aumento en el rendimiento de los cultivos, así como un incremento en la productividad del agua y de la tierra.

### Proceso de Transferencia

El proceso de transferencia del distrito de riego a los usuarios se realizó en 1992, formándose 11 módulos de riego y, en enero de 1997, se constituyó la Sociedad de Responsabilidad Limitada que integra a los módulos. Estos módulos son: Acámbaro, Salvatierra, Jaral, Valle, Cortázar, Salamanca, Irapuato, Abasolo, Huanímaro, Corralejo y La Purísima. En el Cuadro 1, se presentan las características principales de los Módulos del DR 011.

### Metodología

La metodología para evaluar el impacto de la transferencia consistió en:

- Evaluación de los cambios en la eficiencia de conducción y lámina de riego aplicada por ciclo agrícola y evaluación de su comportamiento en el tiempo a través de tasas de crecimiento.
- Estimación del precio sombra del agua.
- Estimación de la productividad del agua, tierra y mano de obra, a través del tiempo, considerando precios y rendimientos constantes. En este caso, la productividad asociada con el agua de lluvia (precipitación efectiva) también se incluyó.
- Evaluación del valor de la producción, considerando su dinámica a través del tiempo, de los cuatro factores de producción: área, rendimiento, composición y precios. A partir de los resultados obtenidos, se obtuvieron las tasas de crecimiento anuales para cada

Cuadro 1. Módulos del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato.

Módulo	Superficie			Porcentaje	Volumen asignado	
	Total	Pozos particulares	Gravedad		Presas	Pozos oficiales
	ha			%	m <sup>3</sup> x 10 <sup>6</sup>	
1 Acámbaro	8 707.91	1 668.89	7 039.02	9.54	72.634	1.73
2 Salvatierra	16 168.15	4 075.87	12 092.28	16.39	124.777	7.86
3 Jaral	6 685.82	2 155.96	4 529.86	6.14	46.742	4.16
4 Valle	13 253.35	3 955.10	9 298.25	12.60	95.946	6.24
5 Cortázar	18 385.01	5 662.65	12 722.36	17.24	131.278	9.13
6 Salamanca	14 064.06	3 771.85	10 292.21	13.95	106.202	5.66
7 Irapuato	8 320.55	4 015.05	4 305.50	5.83	44.427	4.39
8 Abasolo	14 960.05	4 853.45	10 106.60	13.69	104.287	8.78
9 Huanímaro	3 777.47	1 058.62	2 718.85	3.68	28.055	4.39
10 Corralejo	1 525.20	831.15	694.05	0.94	7.162	3.35
Pastor Ortíz <sup>†</sup>					45.090	
Subtotal	105 847.57	32 048.59	73 798.98	100.00	806.60	
11 La Purísima	4 772.65	798.85	3 973.80		24.900	0.00
Total	110 620.22	32 847.44	77 772.78	100.00	831.50	55.69

<sup>†</sup>Módulo del D.R. 087 Rosario-Mezquite, Michoacán.

uno de estos factores, utilizando el método de promedios móviles en períodos de seis años.

- Estimación del ingreso neto de los usuarios, utilizando el Índice de Precios Implícito del Producto Interno Bruto (INEGI, 1999) para deflacionar los precios de insumos y de producción de trigo, sorgo y maíz, tomando como año base 1993.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Eficiencia de Conducción y Lámina de Riego Aplicada

Los resultados obtenidos al analizar la eficiencia de conducción y lámina de riego aplicada se presentan en la Figura 1, en la cual se observa una tendencia a incrementar la eficiencia de conducción y una tendencia a disminuir la lámina de riego (m), a partir de la transferencia a las Asociaciones de Usuarios, lo cual implica un mejor uso del agua en las parcela. Lo anterior implica un mejor manejo del agua en la red de conducción a partir de la transferencia a los Usuarios, de acuerdo con las estadísticas hidrométricas del DR 011 y de cada uno de los módulos de riego.

El análisis de esta variación indica que hay una marcada tendencia negativa en las tasas de crecimiento de lámina bruta, a partir de la transferencia del distrito de riego, lo cual implica un mejor uso del agua en las parcelas. En el caso de la eficiencia de conducción, ésta presenta tasas positivas moderadas en todos los sexenios definidos, lo cual indica un muy ligero mejoramiento del manejo de la red de canales. La tasa de crecimiento media anual para la lámina bruta es de  $-0.63\%$ ,

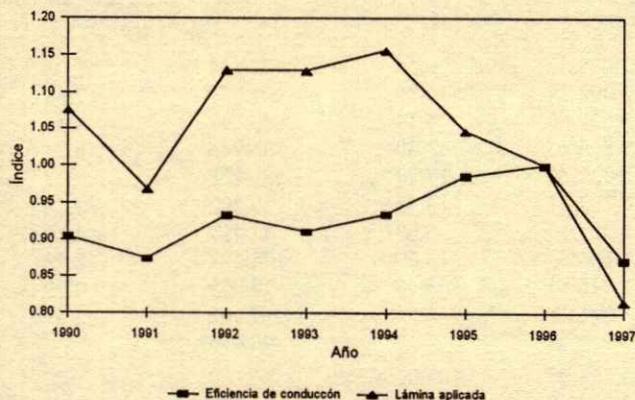


Figura 1. Variación relativa de la eficiencia de conducción y de lámina aplicada (m) en el Distrito de Riego 011.

mientras que la de eficiencia de conducción es de  $0.69\%$ .

### Precio Sombra del Agua

El precio sombra del agua o productividad marginal se calculó mediante dos métodos. El primero consistió en obtener una relación entre los registros históricos del valor de la producción, a precios y rendimientos constantes, en función del volumen de agua utilizado. El segundo método fue con un modelo de programación lineal, mediante el cual se obtuvieron resultados similares. Los modelos encontrados fueron:

$$B = 177.6 V^{0.304}$$

$$PS = 54.02 V^{-0.696}$$

Donde: B = valor de la producción obtenido a partir del volumen de agua utilizado (millones de pesos); V = volumen de agua utilizado (millones de  $m^3$ ); PS = precio sombra del agua (pesos  $m^{-3}$ ).

Tomando en consideración el promedio histórico del valor de la producción, 1470 millones de pesos, se obtiene que el precio sombra del agua es sólo de \$  $0.43 m^{-3}$ , lo cual es un valor bajo.

### Productividad de los Recursos

Los índices de productividad obtenidos para los recursos agua, tierra y mano de obra se presentan en la Figura 2. Las tasas de crecimiento sexenales de estos recursos se muestran en la Figura 3.

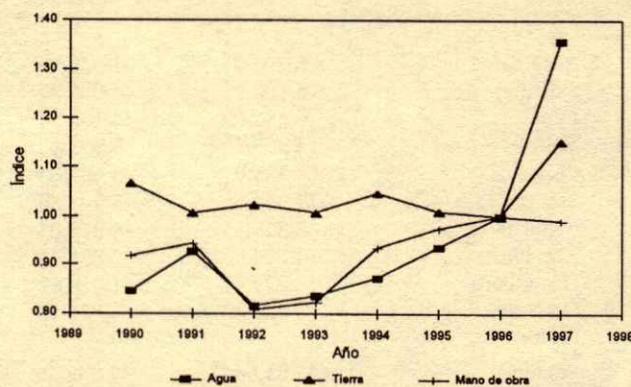


Figura 2. Variación relativa de la productividad de agua, tierra y mano de obra en el Distrito de Riego 011.

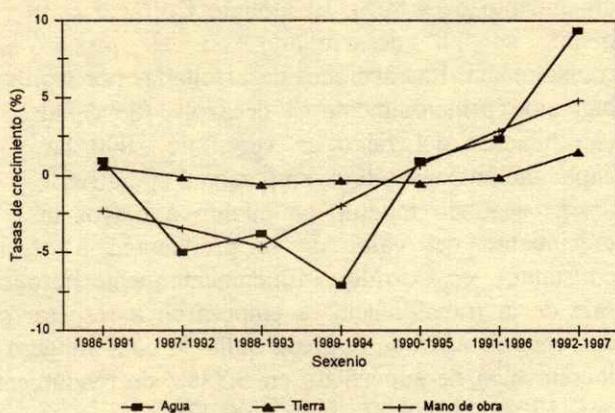


Figura 3. Tasas de crecimiento de la productividad de agua, tierra y mano de obra en el Distrito de Riego 011.

En las Figuras 2 y 3 se observa que, después de la transferencia en el año de 1992, se presenta un mejoramiento en la productividad del agua y de la mano de obra. La productividad de la tierra permanece casi constante, con sólo un reducido incremento en los últimos años. Para mejorar la estimación de la productividad del agua, la cantidad de agua de riego utilizada se corrigió agregando la cantidad de agua utilizada por los cultivos (precipitación efectiva), la cual se calculó mediante un modelo de simulación de balance del sistema suelo-planta-atmósfera. De acuerdo con las simulaciones realizadas mediante este modelo para los cultivos de trigo, sorgo y maíz, la aportación de agua de lluvia a los requerimientos de riego de los cultivos, es del orden de 600 millones de metros cúbicos.

A pesar del mejoramiento en el manejo del agua, los usuarios han extraído volúmenes de agua de las presas muy superiores al promedio de aportaciones, lo cual ha afectado la capacidad de regulación de las mismas.

### Análisis Factorial de los Componentes del Valor de la Producción en el Distrito de Riego 011

El valor agrícola de la producción puede expresarse como el producto de cuatro factores: área cosechada, rendimiento de cultivo, composición (productividad a precios y rendimientos constantes) y precios. En esta metodología, si los precios son constantes para un año base (en este caso se seleccionó 1997), entonces los otros tres factores explican la variación del valor de la producción. Si la tasa de crecimiento promedio se calcula para un período de seis años, mediante el método de

promedios móviles, la suma de los tres componentes es igual a la tasa de crecimiento, en los mismos periodos, del valor de la producción a precios constantes. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 4 y 5.

En estas figuras se observa que el rendimiento de los cultivos, a través del período analizado después de la transferencia, ha crecido a una tasa de 3.5% anual. El área cosechada, por otra parte, tiene una variación cíclica que depende de la disponibilidad de agua almacenada en las presas. A partir del año de 1995 se registra un período de escasez de agua, el cual impacta de manera amplia en la superficie cosechada.

El factor de composición del patrón de cultivos se mantiene sin cambios en todo el período analizado, debido a que el patrón de cultivos no ha cambiado. Sin embargo, en el último año se tiene un pequeño mejoramiento de este factor.

El valor de la producción a precios constantes se incrementó de 1988 a 1995, sin embargo, la falta de

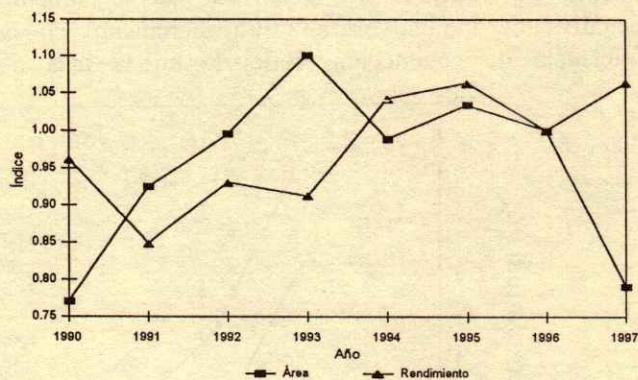


Figura 4. Variación relativa del área cosechada y el rendimiento en el Distrito de Riego 011.

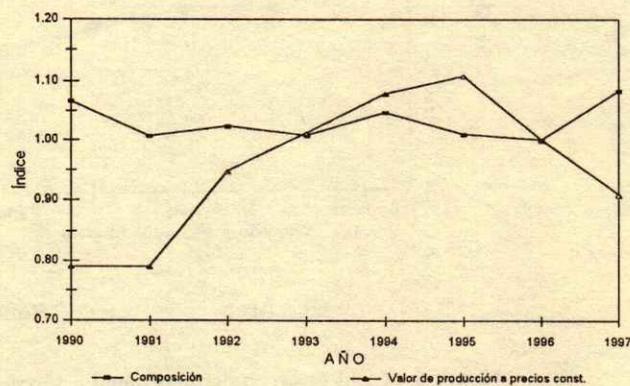


Figura 5. Variación relativa de la composición y valor de la producción a precios constantes en el Distrito de Riego 011.

agua afectó de manera negativa esta tendencia en los últimos dos años.

**Análisis Factorial de los Componentes del Valor de la Producción en los Módulos del Distrito de Riego 011**

Utilizando la misma técnica aplicada a escala de distrito de riego, se analizaron los componentes del valor de la producción para cada uno de los 11 módulos del DR 011 Alto Río Lerma, para el periodo 1992-1998. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.

En esta figura se observa que la tasa de crecimiento del valor de la producción a precios constantes y de sus componentes es diferencial para cada uno de los módulos; Cortázar es el módulo con mayor crecimiento, con una tasa de 9.17%, la cual se debió principalmente al incremento en superficie de 6.18%. Esta tasa de crecimiento en superficie se explica por el incremento de la eficiencia del agua en la parcela reflejado en una tasa de crecimiento negativa de lámina bruta y un incremento en la eficiencia de conducción, reflejada en la tasa de

crecimiento de 4.80%. El módulo Cortázar es el que mejor se ha desarrollado en el proceso de transferencia. Las acciones desarrolladas por Cortázar han sido principalmente el desazolve de canales, la tecnificación del riego en cerca de 2000 ha y la capacitación constante de su personal operativo.

El segundo módulo en cuanto a mayor tasa de crecimiento del valor de la producción a precios constantes, es Corralejo, fundamentalmente porque a raíz de la transferencia se empezaron a respetar sus derechos de agua de la presa Solís, lo cual impactó en incrementos de superficie, en 6.33%; de rendimiento, en 2.13%; y de composición, en 0.27%.

El módulo Valle presenta un incremento en el valor de la producción a precios constantes de 4.70%, también debido a un incremento en la superficie de 2.4%.

Los módulos que han tenido una tasa de crecimiento en el valor de la producción a precios constantes superior a 2% son Abasolo, La Purísima, Irapuato y Acámbaro. En estos módulos, el incremento también se debió a tasas de crecimiento de la superficie próximas a 2%. Sin embargo, las tasas de composición de cultivo son negativas en Abasolo,

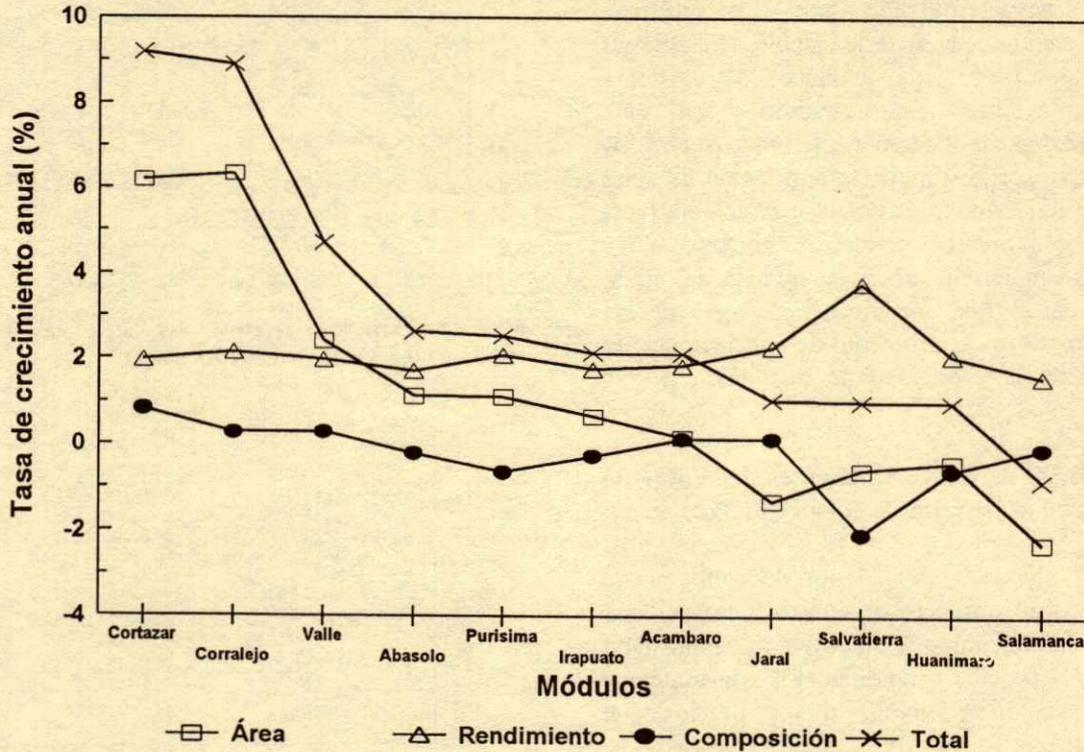


Figura 6. Tasas de crecimiento promedio anuales de los factores de producción en los 11 módulos del Distrito de Riego 011 para el periodo 1992-1998.

Purísima e Irapuato y alrededor de cero en Acámbaro. El componente de rendimiento tiene valores próximos a 2% en estos módulos y la composición es negativa para Abasolo, Purísima e Irapuato, y superior a cero para Acámbaro.

Los módulos con tasa de crecimiento total cercana a 1% son Jaral, Salvatierra y Huanímaro, los cuales presentan tasas negativas de crecimiento en la superficie, con tasas de rendimiento superiores a 2% e incluso cerca de 4% para el caso de Salvatierra, pero con tasas de composición negativas o cercana a cero, como el caso de Jaral. En el caso de Salvatierra, hay un marcado aumento en rendimiento, pero una fuerte tasa negativa de composición (-2.07%), lo cual indica que los cultivos básicos han mejorado su rendimiento, pero que se han abandonado cultivos más rentables. Los incrementos de las eficiencias de uso del agua son negativos o cercanos a cero en la mayoría de los casos.

Finalmente, el módulo que presenta tasa total negativa es Salamanca (-0.85%), lo cual se debe a una tasa de crecimiento de superficie de -2.27%, aunado a una tasa de composición de -0.11%, aunque el rendimiento se ubica en 1.58% de tasa de crecimiento.

### Ingreso Neto de los Usuarios

Para estimar el ingreso neto de los usuarios, se tomaron como cultivos de referencia el trigo, el sorgo y el maíz, para los cuales se obtuvieron los precios deflacionados de insumos y de precios de cosechas, para lo cual se utilizó el Índice de Precios Implícito del Producto Interno Bruto, tomando como año base 1993. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 7 y 8.

En la Figura 7, se observa que el índice de precios de los insumos crece en forma bastante superior al de precios de los productos agrícolas a partir del ciclo 1986-1987. Para comprender el comportamiento mostrado en esta figura, es necesario precisar que los precios de los productos agrícolas se liberaron hacia fines de los años ochenta, cuando el Gobierno Federal propició una apertura en la economía nacional, siendo una de las principales estrategias el eliminar los precios de garantía de casi todos los productos agrícolas.

En la Figura 8, se muestra una dramática caída en la utilidad de los principales cultivos del distrito de riego. Como una explicación de esto, es necesario

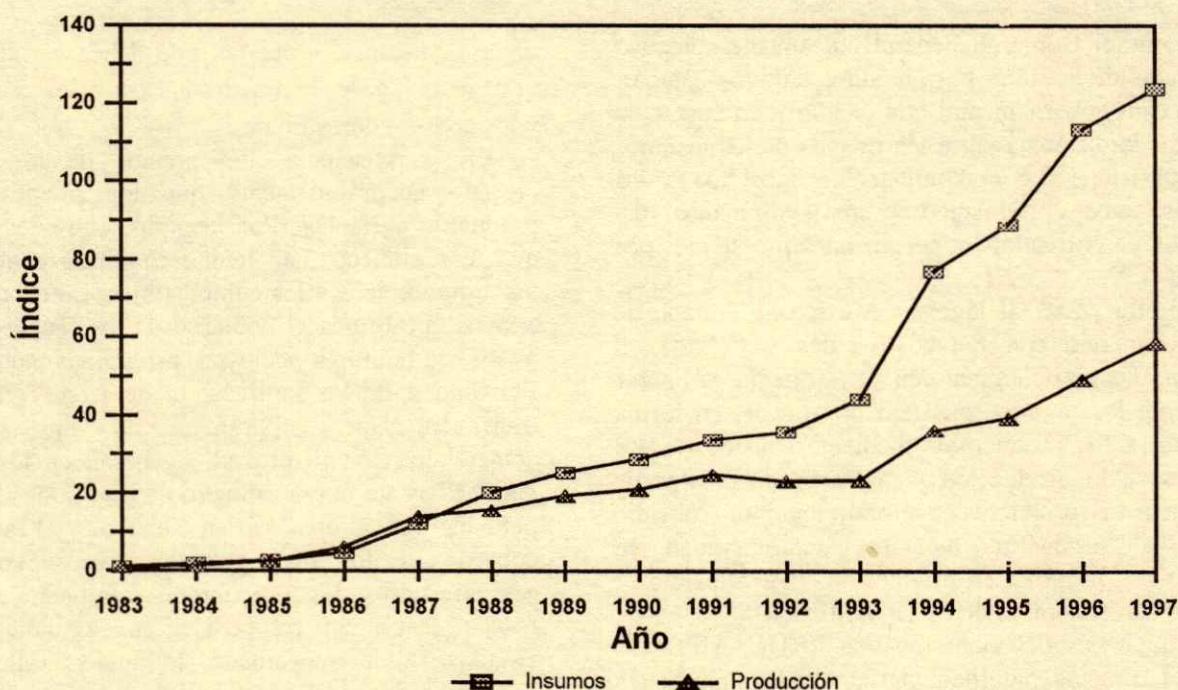


Figura 7. Análisis de índices de precios de insumos y producción en el Distrito de Riego 011 para el período de 1983 a 1997.

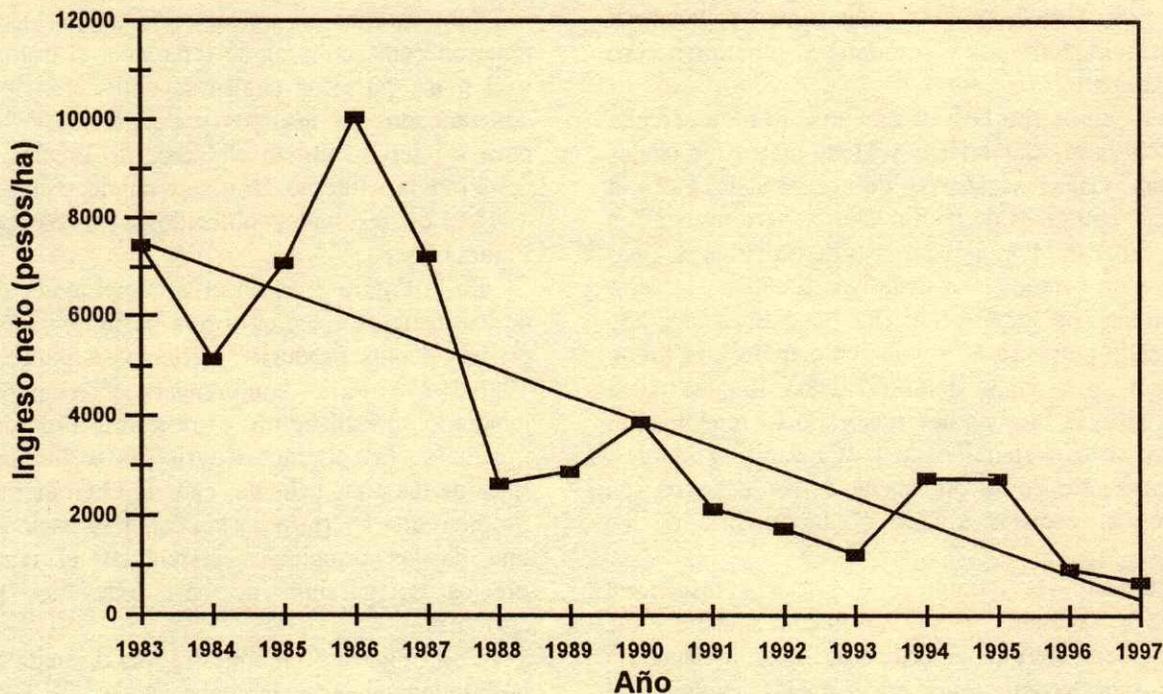


Figura 8. Análisis del ingreso neto de los usuarios a precios deflactados en el Distrito de Riego 011 para el período de 1983 a 1997.

indicar que el Gobierno Federal únicamente conservó los precios de garantía para algunos cultivos básicos. Otra acción gubernamental que incidió fuertemente en aumentar la distancia entre los precios de los insumos y los agrícolas fue el eliminar los subsidios a los insumos, cuya producción estaba en manos del gobierno, en particular los fertilizantes producidos por FERTIMEX.

Por otra parte, al ingresar México al Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y Canadá, el Gobierno Federal continúa con su estrategia de liberar totalmente los precios, pasando de apoyar, en forma indirecta, a los productores mediante subsidios a los insumos de la producción y, a través de precios de garantía a los productos, a proporcionar un subsidio directo al productor, mediante una cantidad en efectivo por hectárea en producción. Este subsidio se etiquetó con el nombre de PROCAMPO.

La hipótesis del Gobierno con PROCAMPO era que los precios internacionales de los productos agrícolas regularían el mercado interno y externo. En la realidad, esta suposición no se ha cristalizado por

diversas razones, entre las que deben resaltarse una gran cantidad de intermediarios entre los productores y los consumidores finales.

En consecuencia, los precios de los insumos crecen más rápidamente que los precios de los productos agrícolas. Por ejemplo, entre los insumos que más aumento han tenido en forma continua son los agroquímicos y los combustibles. En contraste, los apoyos que brinda el gobierno de los Estados Unidos a sus agricultores incluyen programas como el de flexibilidad de los cultivos, el de pagos directos de transición, los programas de apoyo a la comercialización y otros. En general, en los Estados Unidos hay un mayor número de programas de apoyo para los agricultores que en México, y el monto y la cobertura de los mismos también son mayores. Con este escenario, los productores nacionales están en franca desventaja respecto a sus similares de los Estados Unidos y Canadá, lo que se refleja en la competitividad de los productos y de los productores mexicanos.

## CONCLUSIONES

- El proceso de transferencia del distrito de riego 011 Alto Río Lerma, considerándolo en su conjunto, ha sido benéfico para los usuarios. El proceso de transferencia ha permitido la organización de los módulos y el distrito de riego, en figuras jurídicas que permiten el fortalecimiento económico, técnico y financiero de las asociaciones de usuarios de agua. Sin embargo, algunos errores en el proceso de planeación no se han superado. En forma particular, la tendencia a secar las presas cuando hay volumen disponible para riego. Sin embargo, la operación y la conservación del distrito de riego ha mejorado en forma marcada.
- El uso y el manejo del agua de riego han mejorado después del proceso de transferencia, así como la productividad del agua, de la tierra y de la mano de obra a precios y rendimientos constantes.
- En la mayoría de los módulos de riego, un incremento en el área cosechada ha impactado en un mayor valor de la producción a precios y rendimientos constantes.
- Mientras que el proceso de transferencia del distrito de riego a los usuarios ha impactado en una mejor productividad de los recursos, las acciones llevadas a cabo por la Comisión Nacional del Agua y las Asociaciones de Usuarios han sido contrarrestadas por

la apertura comercial, lo cual ha impedido que el incremento en la productividad de los recursos se refleje en el ingreso neto de los usuarios del distrito de riego.

## LITERATURA CITADA

- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1999. Evaluación de la actuación de Asociaciones Civiles de Usuarios y Sociedades de Responsabilidad Limitada en Distritos de Riego Transferidos. Gerencia de Distritos y Unidades de Riego. México, D.F.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Autónoma de México., México, D.F.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1999. Índices de Precios [En línea] Disponible en [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx). (Revisado el 10 de junio de 2002).
- OCDE. Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico. 1997. Examen de las políticas agrícolas de México. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, Francia.
- Palacios V., E., A. Exebio G., E. Mejía S. y E. Rubiños P. 1994. Diagnóstico sobre la administración de los Módulos operados por las Asociaciones de Usuarios. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Palacios V., E., A. Exebio G., E. Mejía S. y E. Rubiños P. 1998. Problemas de Segunda Generación que tienen las Asociaciones de Usuarios del Agua. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

# RESPUESTA DEL PLÁTANO VARIEDAD ENANO GIGANTE A TRES ESPACIAMIENTOS DE DRENAJE SUBSUPERFICIAL, EN LA CHONTALPA, TABASCO

Response of the Grand Nain Banana at Three Subsuperficial Drainage Spacings in "La Chontalpa", Tabasco

Santiago Yzquierdo-Arébalos<sup>1</sup>, Eugenio Carrillo-Ávila<sup>2†</sup> y Oscar L. Palacios-Vélez<sup>3</sup>

## RESUMEN

Los mantos freáticos someros en las zonas tropicales húmedas causan problemas agrícolas, principalmente en cultivos sensibles a excesos de humedad como el plátano (*Musa AAA* subgroup Cavendish). En Tabasco, los productores construyen drenes superficiales que requieren de desazolve constante, obstruyen el paso de maquinaria y reducen el área cultivada. Como alternativa, en el Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados, se construyó un módulo de drenaje subsuperficial, en el que se instalaron drenes entubados con diferentes espaciamentos. La presente investigación tuvo como objetivo estudiar el comportamiento fenológico del plátano variedad Enano Gigante, establecido en una parcela con tres espaciamentos entre drenes subsuperficiales (EDS) que se consideraron como tratamientos. En cada tratamiento, se eligieron 20 plantas al azar, en las que se determinaron las variables: altura de plantas (AP), número de hojas (NH), diámetro del pseudotallo (DT) y peso de racimos (PR), además, se estimó el rendimiento (R). Se midieron también las variables: contenido de humedad ( $\theta$ ), potencial de presión del agua en el suelo ( $h$ ), y profundidad del manto freático (PNF) en cada EDS, y se dispuso de las variables climáticas: temperatura (T) y horas brillo sol (HBS). Como resultado del análisis de varianza, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en las variables AP, DT y PR, cuyos valores presentaron

una tendencia decreciente claramente marcada al aumentar el EDS, comportamiento que también se observó en el valor de R. Se realizaron regresiones múltiples para relacionar a la velocidad de crecimiento del cultivo con las variables independientes:  $h$ , PNF, T y HBS, y se determinaron los valores que optimizan el crecimiento del plátano.

*Palabras clave:* *Musa AAA subgroup Cavendish, manto freático, potencial de presión, rendimiento.*

## SUMMARY

In the wet tropics, shallow water tables cause agricultural problems due to high moisture content in the soil where plant roots develop. These problems mostly affect water-sensitive crops such as banana. In Tabasco, growers build superficial drains to solve problems associated with excessive rain; however, these drains require maintenance, obstruct mechanical cultivation and reduce the cultivated area. As an alternative, at the Campus of the Colegio de Postgraduados in Tabasco, a module of subsuperficial drainage was installed. In this study, different distances between drain tubes were evaluated and Grand Nain banana (*Musa AAA* subgroup Cavendish) was used. Three distances of subsuperficial drainage were evaluated and each distance was considered a treatment. Twenty banana plants were randomly selected per treatment. For each individual plant, height, number of leaves, stem diameter, and bunch weight were recorded as well as crop yield. Furthermore, hydric and meteorological variables such as soil water content, soil water pressure potential at different depths, depth of the water table, air temperature, and sunshine hours were registered. Significant differences among treatments were observed for plant height, stem diameter, and bunch weight. Values were higher when the tubes were separated 10 m from each other. An inverse relationship was observed between phenological variables and drain-tube distances and this effect was

<sup>1</sup> Secretaría de Desarrollo Agropecuario Rural, Forestal, Pesca y Alimentación. Porfirio Díaz 21, Col. Zapotal, 96039 Acayucan, Veracruz. (izquierdoare@yahoo.es)

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Campeche. 24000 Campeche, Campeche.

<sup>†</sup> Autor responsable (eugenio@colpos.colpos.mx)

<sup>3</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México. (opalacio@colpos.colpos.mx)

reflected in yield. Multiple regressions were carried out to define the relationship between banana growth and the hydric and meteorological variables, thus the values that optimize growth were determined.

*Index words:* Musa AAA subgroup Cavendish, water table level, soil water pressure potential, crop yield.

## INTRODUCCIÓN

En México, el plátano es un cultivo tropical de gran importancia económica y social. En el mundo, México se encuentra entre los primeros 12 países productores y, en el ámbito nacional, este cultivo ocupa el tercer lugar en importancia (Ramírez y Rodríguez, 1988). Aunque se cultiva en 18 entidades del país, sólo dos regiones se han destacado como principales productoras: la zona sur de Chiapas y la zona sur de Tabasco. La perfección en las técnicas de producción, así como el manejo post-cosecha en estas regiones, han permitido que el plátano mexicano incursione en el mercado internacional (ASERCA, 1998).

La temperatura óptima para el desarrollo del plátano oscila alrededor de 26 °C (Ramírez y Rodríguez, 1988). Simmonds (1973) señaló que el promedio de las temperaturas mínimas mensuales debe ser ligeramente superior a 15.5 °C para un adecuado crecimiento. Por otra parte, el mismo autor sugirió que 50 mm de lluvia al mes representan una cantidad por debajo de la cual el cultivo sufre por falta de agua, mientras que 100 mm al mes pueden ser juzgados como satisfactorios, excepto para los suelos más arenosos. El plátano es una planta que requiere de condiciones de alta humedad en el suelo, pero que no tolera excesos de humedad, principalmente cuando se trata de agua estancada en la superficie. Se desarrolla adecuadamente en lugares con precipitaciones anuales entre 2300 y 3800 mm, siempre que estén bien distribuidos en el año (Ramírez, 1998). Ramírez y Rodríguez (1988) indicaron que, debido a los requerimientos de humedad del cultivo, los suelos deberán tener un alto poder de retención de humedad y, a la vez, un buen drenaje, para evitar la saturación por periodos de más de tres días, ya que esto marchita la planta, mostrando un amarillamiento que inicia en las hojas más viejas; el estrés provocado por esa condición alarga el ciclo de la planta y provoca racimos de pobre desarrollo. Los mismos autores señalaron que para contrarrestar los problemas de exceso de humedad, se requiere que el manto freático

se mantenga a más de 1.8 m de profundidad y, en áreas muy húmedas, a una profundidad de 1.2 m.

En las regiones Sierra, Centro y Chontalpa del estado de Tabasco, se siembran con plátano aproximadamente 9000 ha. Sin embargo, la irregular distribución temporal de la lluvia limita el establecimiento del cultivo, ya que se presentan temporadas durante las que los suelos tienen mantos freáticos someros que afectan el desarrollo del plátano. Los productores construyen sistemas de drenaje superficial abierto que requieren de trabajos de mantenimiento (desazolve, construcción de puentes para la cosecha y el paso de maquinaria), además, reducen el área cultivada. Como una alternativa, en 1993 se construyó un módulo de drenaje subsuperficial, en el campo experimental del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados (Palacios *et al.*, 1993). El drenaje subterráneo presenta ventajas sobre el drenaje superficial abierto, entre las que se encuentran: a) no requiere de trabajos de mantenimiento constantes; b) su vida útil puede ser bastante larga (alcanzar incluso 100 años); c) no obstruye el paso de maquinaria ni la realización de la cosecha; d) permite abatir el manto freático por debajo de la superficie del terreno.

En este trabajo, se estudió el comportamiento fenológico del plátano, establecido en una parcela con tres espaciamientos (10, 20 y 40 m) entre drenes subsuperficiales, con el objetivo de determinar el efecto que tienen sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación y Clima

La investigación se realizó en el módulo de drenaje subsuperficial del Campus Tabasco del Colegio de Posgraduados, en la región conocida como "La Chontalpa". La zona de estudio se sitúa en el paralelo 17° 49' 03" N y en el meridiano 93° 32' 03" O, con una altitud de 11 m; la topografía es plana, con microrrelieve accidentado. El módulo consiste de un área de 60 ha, en la que se instalaron drenes interceptores (tubería de plástico ranurada, de 7.5 y 10 cm de diámetro) y colectores (tubería de 15 y 20 cm de diámetro), a una profundidad de 1.1 a 1.4 m (Palacios *et al.*, 1993). El clima dominante según la clasificación de Köppen, modificado por García (1988), es del tipo Am (f) w" (i)' g, (Nájera *et al.*, 1998), muy propicio para el cultivo de plátano, ya que

la temperatura casi nunca disminuye por debajo de 12 °C, los vientos no son fuertes y la lluvia se presenta casi todo el año. La evaporación y la precipitación anuales oscilan alrededor de 1400 y 2200 mm, respectivamente. Esta última tiene una distribución temporal irregular, presentándose en el año tres épocas con características pluviométricas diferentes: a) época de lluvias, b) época de "nortes" y c) época de relativa sequía, de febrero a mayo.

### Parcela Experimental

Ésta consistió de un rectángulo de 40 por 269 m y cubrió tres espaciamientos entre drenes subsuperficiales (10, 20 y 40 m). En este rectángulo, se estableció la plantación de plátano y las plantas se situaron en los vértices de triángulos equiláteros de 2.3 m de lado (2174 plantas ha<sup>-1</sup>).

### Diseño Experimental y Tratamientos

Para determinar si los diferentes espaciamientos de drenaje subterráneo (EDS) tuvieron influencia sobre el comportamiento fenológico del plátano y su rendimiento, se les consideró como tratamientos, definidos como T1 (EDS 10 m), T2 (EDS 20 m) y T3 (EDS 40 m). El diseño experimental empleado fue completamente al azar, por lo que se seleccionaron 20 plantas al azar en cada tratamiento, siendo considerada cada planta como una unidad experimental.

### Establecimiento del Cultivo

Se efectuó del 20 al 23 de julio de 1999. En los tres tratamientos se realizaron actividades de nutrición, deshierbe, control de malezas, plagas y enfermedades, y se aplicó un riego de auxilio. Cabe señalar que a pesar de la aplicación de los funguicidas Daconil y Manzate, en promedio cada dos semanas, se presentó la aparición de sigatoka negra, enfermedad que redujo el rendimiento del cultivo en todos los tratamientos.

### Aplicación de Riego

Para satisfacer la demanda de agua del cultivo, se aplicó un riego de auxilio de una lámina de 55 mm por gravedad en toda el área experimental, el día 11 de abril de 2000.

### Variables Evaluadas

**Variables fenológicas.** La medición se realizó en las 20 plantas seleccionadas en cada uno de los tratamientos. Las variables fenológicas determinadas fueron: altura de plantas (AP), número de hojas (NH), diámetro del pseudotallo (DT) y peso de racimos (PR). Su determinación se realizó a intervalos de entre 7 y 15 días desde el 28 de noviembre de 1999 hasta el 21 de octubre de 2000, con excepción de PR, determinado en el momento de la cosecha. Finalmente, se estimó el rendimiento del cultivo (R) con base en el número de plantas por hectárea y en el valor de PR para los tres tratamientos.

**Variables edáficas.** Se realizó un perfil de suelo a 1.2 m de profundidad, al centro de cada tratamiento, para determinar la densidad aparente del suelo a las profundidades de 20, 40, 60, 80 y 100 cm. Los valores obtenidos se utilizaron para estimar la porosidad del suelo a las mismas profundidades.

**Variables hídricas.** Se consideró un área de muestreo central en cada tratamiento para determinar las variables: contenido volumétrico de humedad ( $\theta$ ), potencial de presión del agua en el suelo ( $h$ ) y profundidad del manto freático (PNF). Para estimar el valor de  $\theta$ , se tomaron muestras de suelo con barrena dos veces por semana a las profundidades 20, 40, 60, 80 y 100 cm. Se usó la expresión:

$$\theta = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times \frac{Da}{D} \quad (1)$$

Donde:  $\theta$  = contenido volumétrico de humedad (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);  $Psh$  = peso de la muestra húmeda de suelo (g);  $Pss$  = peso de la muestra seca de suelo (g);  $Da$  = densidad aparente del suelo a la profundidad del muestreo (g cm<sup>-3</sup>);  $D$  = densidad del agua (g cm<sup>-3</sup>), considerada constante e igual a la unidad.

Para determinar el valor de  $h$ , se instalaron cinco tensiómetros de manómetro en el EDS de 20 m a las profundidades de 20, 40, 60, 80 y 100 cm y en el EDS de 40 m a 60 y 80 cm de profundidad. Las lecturas se observaron a diario. En el EDS de 10 m no se midió  $h$  por no disponer de suficientes tensiómetros. Finalmente, se instalaron cinco pozos de observación por tratamiento, construidos con tubo de PVC de 2" de diámetro a una profundidad de 3 m, en los que se determinó cada día la PNF.

**VARIABLES meteorológicas.** Consistieron de datos sobre precipitación pluvial, temperatura (T) y horas brillo sol (HBS), que se determinaron en la estación agrometeorológica del Campus Tabasco.

### Análisis Estadístico

Con el programa Statistical Analysis System (SAS Institute, 1996), se realizó un análisis de varianza para determinar el posible efecto de los tratamientos, así como una prueba de comparación múltiple de medias. Se corrieron regresiones múltiples para relacionar la velocidad de crecimiento del cultivo (VC) con las variables independientes PNF, T, HBS y  $h$  a 60 cm de profundidad en el EDS de 20 m. Se probaron los efectos lineales y cuadráticos, así como las interacciones dobles entre las variables independientes sobre VC, seleccionando los modelos con base en los valores del coeficiente de determinación y en los valores de significancia de los parámetros de cada modelo. Para seleccionar al mejor modelo, se utilizó el comando FORWARD BACKWARD STEPWISE, que elimina las variables independientes (todas menos una) y las interacciones entre éstas que no satisfacen un criterio de significancia previamente establecido ( $P = 0.1$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evolución del Contenido Volumétrico de Humedad ( $\theta$ )

En el Cuadro 1, se muestran los valores promedio de  $\theta$ , así como su coeficiente de variación (CV), para

las profundidades estudiadas en los tres tratamientos. A excepción de 40 cm, en las demás profundidades  $\theta$  fue siempre inferior en el EDS de 10 m. A su vez, en el EDS de 20 m se encontraron valores casi siempre inferiores a los determinados para el EDS de 40 m. En el Cuadro 1, se incluye la porosidad del perfil de suelo, considerada como el límite superior de  $\theta$  para cada profundidad. Por otra parte, los valores del CV tendieron a ser mayores cerca de la superficie, debido al mayor intercambio de agua entre ésta y la atmósfera. Arrieta y Carrillo (2002) encontraron un resultado similar.

### Evolución Temporal del Potencial de Presión ( $h$ ) y de la Profundidad del Nivel Freático (PNF)

En la Figura 1, se ilustra el comportamiento temporal de  $h$  (considerado positivo) medido a 60 y 80 cm de profundidad en el EDS de 20 m y a 80 cm en el EDS de 40 m, así como la evolución de la PNF en los tres tratamientos. En la Figura 1, puede observarse que  $h$  tiene una relación estrecha con el aporte de agua: de enero a fines de mayo, el valor de  $h$  aumenta dentro del perfil como consecuencia de la falta de humedad y, en el momento del riego, disminuye drásticamente. Por otra parte, durante la temporada de lluvias,  $h$  tomó casi siempre valores cerca de cero a causa del humedecimiento constante del suelo. Cabe señalar la diferencia en la evolución de  $h$  para diferentes profundidades y para diferentes EDS: en el EDS de 20 m,  $h$  aumentó más rápidamente a 60 cm que a 80 cm, a consecuencia de un mayor secado por su proximidad a la superficie y por la extracción de agua por las raíces. Por lo que respecta a distintos EDS, es notoria la diferente evolución de  $h$  a la profundidad de 80 cm: en el EDS de 20 m,  $h$  tiende

**Cuadro 1.** Valores promedio y coeficiente de variación del contenido volumétrico de humedad para el período de estudio, así como valores de la porosidad para los diferentes espaciamientos entre drenes y profundidades evaluadas.

Profundidad	Espaciamiento entre drenes (m)								
	10			20			40		
	P <sup>†</sup>	$\theta_m^‡$	CV <sup>§</sup>	P	$\theta_m$	CV	P	$\theta_m$	CV
cm	--- cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ---			--- cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ---			--- cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ---		
			%			%			%
20	0.474	0.346	21.00	0.432	0.416	18.60	0.454	0.428	26.05
40	0.434	0.355	13.02	0.401	0.348	16.33	0.416	0.355	20.08
60	0.419	0.395	9.61	0.430	0.424	12.53	0.434	0.432	13.86
80	0.467	0.383	13.77	0.410	0.407	18.04	0.422	0.419	12.40
100	0.465	0.347	17.16	0.421	0.392	15.50	0.410	0.381	14.30

<sup>†</sup> porosidad; <sup>‡</sup> valor promedio del contenido volumétrico de humedad del suelo; <sup>§</sup> coeficiente de variación de los valores de contenido volumétrico de humedad del suelo (%).

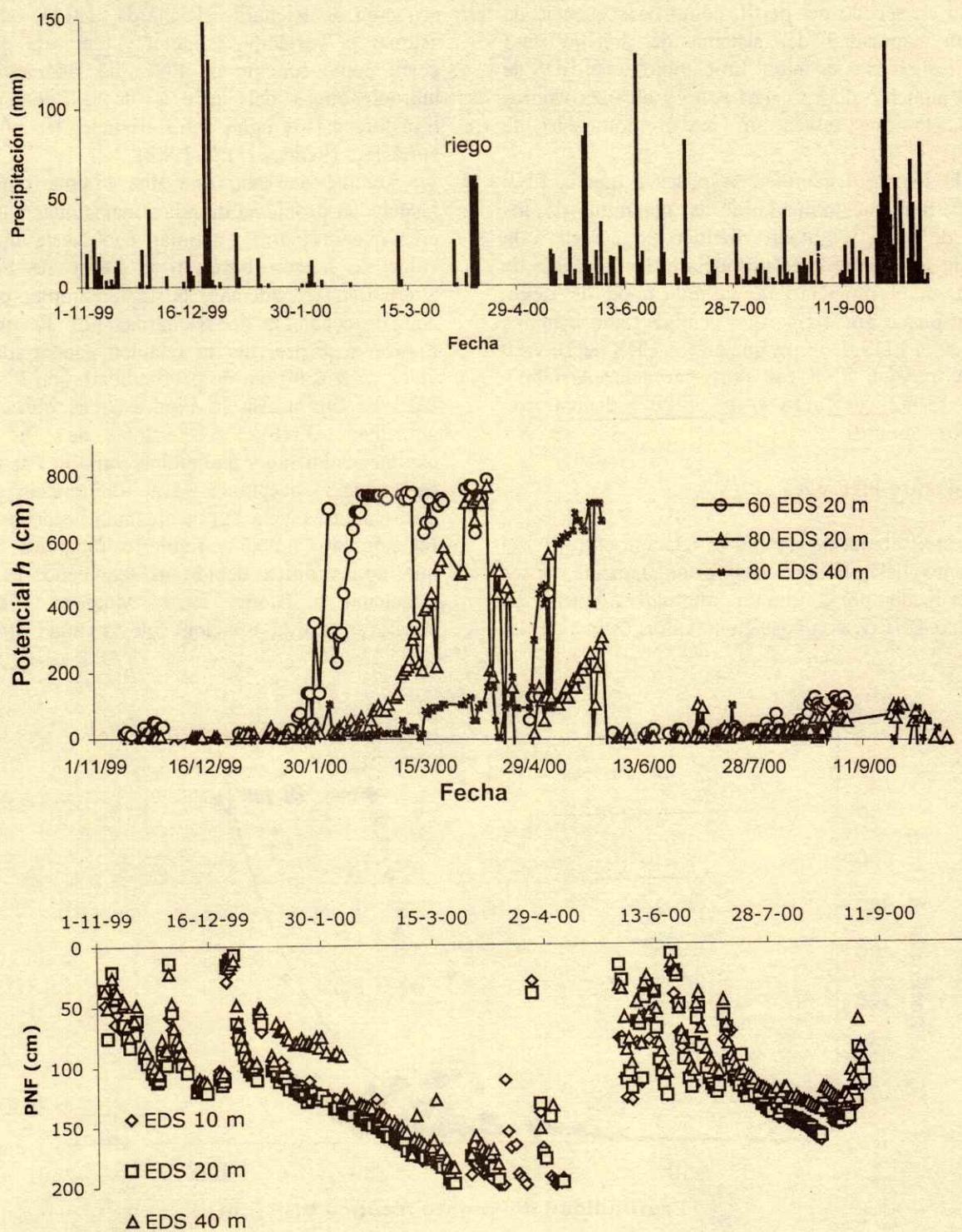


Figura 1. Evolución temporal del potencial de presión del agua en el suelo ( $h$ ) a 60 y a 80 cm de profundidad en el EDS de 20 m y a 80 cm en el EDS de 40 m (centro), así como de la profundidad del manto freático (PNF) en los tres EDS evaluados (abajo), como función del aporte de agua por lluvia y riego (arriba).

a aumentar más rápidamente debido a la mayor velocidad de secado del perfil, como consecuencia de la mayor capacidad del sistema de drenaje para evacuar los excesos de agua. En cambio, en el EDS de 40 m, el aumento de  $h$  es más lento y alcanza valores menores, lo que indica un mayor contenido de humedad.

En la Figura 1 también se observa que la PNF dependió fundamentalmente de la magnitud de los aportes de agua: el manto freático se acerca a la superficie inmediatamente después de la presencia de lluvia o en el momento de la aplicación de riego. También puede apreciarse que la PNF tomó menores valores en el EDS de 40 m que en los EDS de 10 y 20 m, para los que PNF fue muy parecida. Arrieta y Carrillo (2002) y Zarco *et al.* (2002) encontraron resultados similares

### Relación entre PNF y $h$

En este trabajo, se estudió la relación entre  $h$  y el crecimiento del plátano; desafortunadamente,  $h$  es difícil de medir, por lo que una alternativa consiste en determinar PNF y, con base en su valor, estimar  $h$ . La

relación entre  $h$  y PNF se ha podido definir por la ecuación de Richards (Richards, 1931), que permite estimar la variación espacial y temporal de  $h$  en el perfil como función de PNF, de las características hidrodinámicas del suelo y de las condiciones de transferencia de agua entre el suelo, las plantas y la atmósfera (Feddes *et al.*, 1988).

Aunque se sabe que una simple regresión no resuelve el problema de relacionar ambas variables, se cree que sí permite estimar con cierta precisión el valor de  $h$  con base en el valor de PNF. Esta alternativa es, además, bastante simple, comparada con la ecuación de Richards, por lo que, en la Figura 2, se presenta la relación encontrada entre el valor de  $h$  a 60 cm de profundidad, con PNF para el EDS de 20 m. En la Figura 2, se observa que al aumentar PNF, el valor de  $h$  aumenta exponencialmente y que ambas variables se relacionan de manera aceptable. Las diferencias entre las observaciones y la curva ajustada se deben a que la relación entre ambas variables es dinámica, además de que no es única debido al fenómeno de histéresis (Vachaud y Thony, 1971; Mualem, 1984). Cabe señalar que esta relación sólo es válida para el suelo

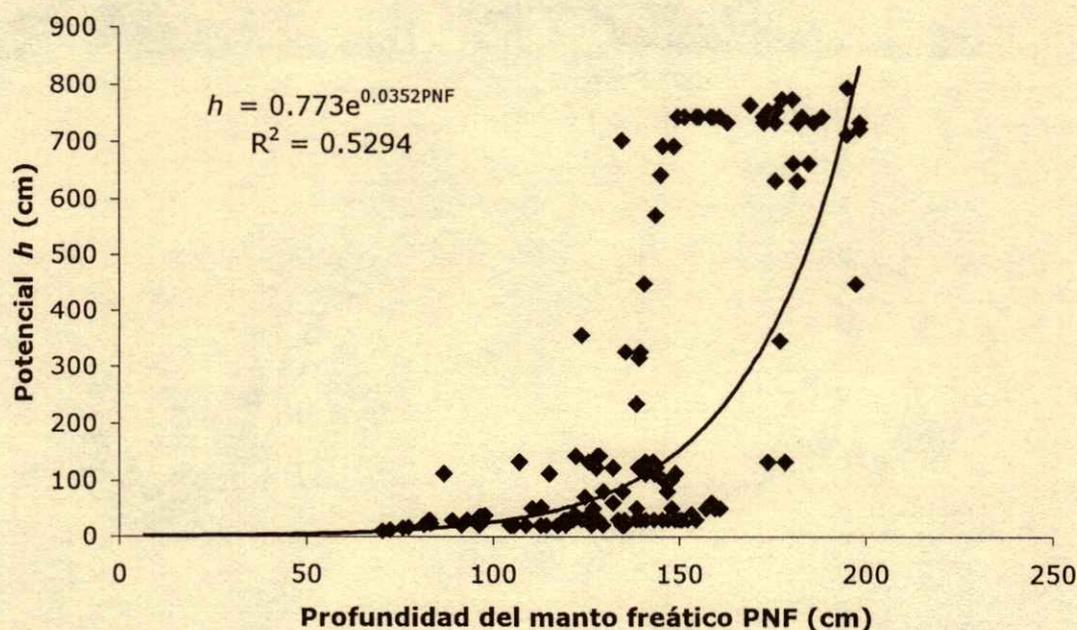


Figura 2. Relación entre la profundidad del manto freático (cm) y el potencial de presión a 60 cm de profundidad en el espaciamiento entre drenes de 20 m.

de la parcela a la profundidad de 60 cm; para otro suelo se requiere determinar de nuevo dicha relación.

### Crecimiento del Cultivo

**Evolución temporal de la altura de las plantas.** En la Figura 3, se ilustra la evolución temporal de AP para los tres tratamientos evaluados, en la que se observa que las plantas muestran un desarrollo más vigoroso conforme el EDS es menor; las plantas correspondientes al EDS de 10 m son aproximadamente 30 cm más altas con relación a las que se establecieron en el EDS de 40 m y 17 cm más grandes con relación al EDS de 20 m, lo que indica que los excesos de humedad reducen la velocidad de crecimiento del cultivo y disminuyen la AP final. La altura promedio presenta oscilaciones al transcurrir el tiempo, lo que se presentó debido al deshoje frecuente en la plantación que, en ocasiones, redujo el valor de AP. El deshoje se realizó para eliminar las hojas enfermas con sigatoka negra y tratar de limitar la severidad de la enfermedad que se presentó en toda el área experimental. Cabe señalar que no se observó una incidencia diferente de la enfermedad en los distintos tratamientos, debido a que su aparición se relaciona más con la humedad relativa ambiental que con la profundidad del manto freático (Ramírez y Rodríguez, 1988).

**Modelo de regresión del crecimiento del cultivo.** Se realizó una regresión múltiple para encontrar la relación entre el crecimiento del cultivo, el tiempo y el

EDS. El modelo encontrado fue:

$$CT = 1.365621 + 0.848654 t - 0.861746 EDS - 0.000924368 t^2 \quad (2)$$

Donde: CT = crecimiento total del cultivo (cm); t = tiempo después del trasplante (días); EDS = espaciamento entre drenes subsuperficiales (m). Con un coeficiente de determinación,  $r^2 = 0.9162$ .

De acuerdo con este modelo, el cultivo crece 0.86 cm menos por cada metro más de EDS. Este resultado ilustra el efecto del drenaje sobre el crecimiento del cultivo, lo que a su vez repercute sobre el rendimiento final. En la Figura 3, se muestra la comparación entre los valores medidos y estimados para los tres EDS, en la que se observa que el crecimiento del plátano fue aproximado adecuadamente por el modelo.

### Análisis de Varianza de Variables Fenológicas

Se realizó un análisis de varianza para las variables fenológicas, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 2. En el análisis se consideraron las mediciones hechas durante todo el ciclo. Para las variables AP, DT y PR se encontró diferencia significativa entre tratamientos; los valores más elevados se encontraron en el Tratamiento T1 (EDS de 10 m) y los valores más bajos en el Tratamiento T3 (EDS de 40 m), diferentes estadísticamente, con una tendencia decreciente marcada, lo que es un indicador claro del efecto que los diferentes espaciamentos de

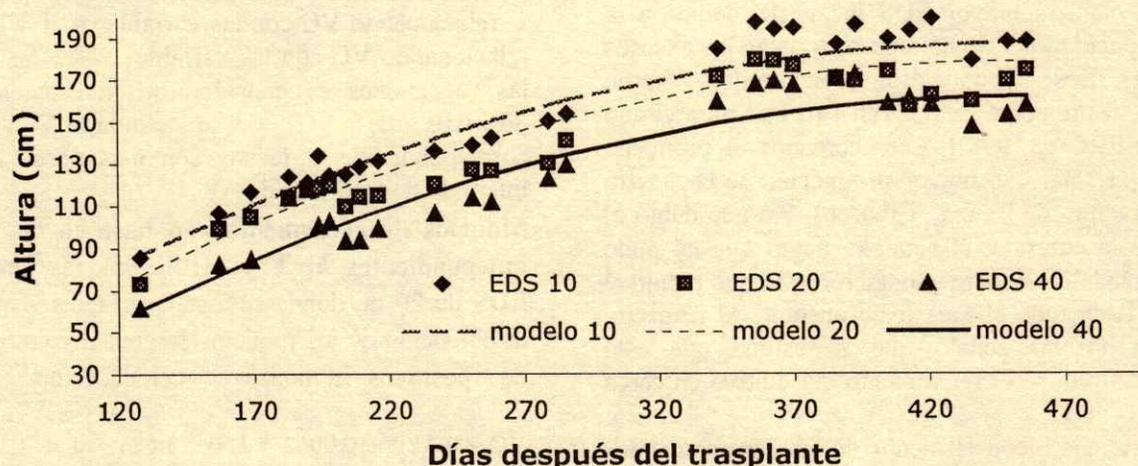


Figura 3. Evolución temporal de la altura promedio de las plantas de plátano para los tres tratamientos evaluados y comparación entre los valores medidos y los estimados con el modelo de regresión (Ecuación 2).

Cuadro 2. Resultados del análisis de varianza de las variables fenológicas.

Variable	Medias de tratamientos			Media general	C.V.	DMS	P > F
	T1 (EDS <sup>†</sup> 10 m)	T2 (EDS 20 m)	T3 (EDS 40 m)				
Altura de plantas (cm)	155.91 a	139.70 ab	128.54 b	141.39	23.24	21.369	0.0115 *
Número de hojas	6.58 a	6.14 a	6.12 a	6.28	32.53	1.329	0.6470 ns
Diámetro del pseudotallo (cm)	15.53 a	14.35 ab	13.69 b	14.53	17.21	1.625	0.0272 *
Peso del racimo (kg)	9.40 a	7.65 ab	6.95 b	8.00	31.77	1.930	0.0106 *
Rendimiento de frutos (t ha <sup>-1</sup> )	20.44	16.63	15.11				

<sup>†</sup> EDS = espaciamiento de drenaje subsuperficial. Medias con la misma letra en hilera son estadísticamente iguales, Tukey ( $\alpha = 0.05$ ); \* = significativo; ns = no significativo.

drenaje tuvieron sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo. No se realizó un análisis de varianza del rendimiento debido a que sólo se estimó un dato para cada tratamiento, tomado como la suma del total de los pesos de los racimos cosechados en cada EDS. En la variable NH no se encontraron diferencias significativas, lo que se debió probablemente al frecuente deshoje realizado en toda el área experimental. Los coeficientes de variación (CV) fueron altos para las variables NH (debido al deshoje) y PR; sin embargo, su valor es todavía aceptable para un experimento de campo.

### Estimación del Rendimiento (R)

El rendimiento de fruto se estimó al final del ciclo, con base en el valor de PR y en el número de plantas por hectárea. En el Tratamiento T1 se encontró el mayor rendimiento, de 20.44 t ha<sup>-1</sup>; en el T2 se obtuvieron 16.63 t ha<sup>-1</sup> y en el T3 15.11 t ha<sup>-1</sup>, con una tendencia clara: a mayor EDS menor R, debido a la menor capacidad del drenaje para evacuar los excesos de agua. Los rendimientos encontrados fueron inferiores al promedio estatal [26.18 t ha<sup>-1</sup> para el año 1997 (ASERCA, 1998)], pero cercanos al promedio regional (la zona con mayor producción se encuentra en el municipio de Teapa, Tabasco). Esto se debió al ataque de la enfermedad sigatoka negra que no pudo ser controlada de manera satisfactoria, lo que redujo el valor de R en toda el área experimental. Al respecto, ASERCA (1998) señaló que se estima que esta enfermedad reduce el rendimiento del cultivo en cerca de 22 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

En este caso, con el menor de los espaciamientos de drenaje se obtuvo el mayor rendimiento, lo que coincide con lo encontrado por Arrieta y Carrillo (2002) para el cultivo de papaya. Sin embargo, esta respuesta no es la misma para cultivos menos

sensibles a los excesos de humedad: Nájera *et al.* (1998) encontraron que el espaciamiento que produjo los rendimientos más elevados para los cultivos de caña de azúcar y chile jalapeño fue el de 30 m.

### Estimación de la Velocidad de Crecimiento del Cultivo

La velocidad de crecimiento del cultivo (VC) se determinó en campo en cada EDS, restando los valores de AP entre dos fechas consecutivas de medición. Con base en los valores encontrados, se realizaron regresiones múltiples para relacionar VC (cm d<sup>-1</sup>) con las variables independientes *h* a 60 cm de profundidad, PNF, T y HBS. Para realizar las regresiones, se calcularon valores promedio de las variables independientes para los periodos entre cada medición de AP, con el objetivo de disponer del mismo número de datos en las variables independiente y dependientes. Se realizaron dos tipos de regresiones: 1. relacionando VC con las variables *h*, T y HBS; y 2. relacionando VC con las variables PNF, T y HBS. En las regresiones se consideraron únicamente valores positivos de VC y se eliminaron los datos correspondientes a fechas con más de siete días de intervalo de medición de AP.

**Modelos de crecimiento con base en las variables independientes *h*, T y HBS.** Sólo se consideró el EDS de 20 m, donde se instalaron tensiómetros. Para la obtención de los modelos se consideró a los valores de *h* positivos. El modelo seleccionado fue:

$$VC = 37.29 + 0.0062 * h60 - 3.676 * T + 2.207 * HBS - 0.0000072 * h60^2 + 0.0739 * T^2 - 0.1486 * HBS^2 \quad (3)$$

Con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0.8211$ . Las interacciones dobles no fueron significativas.

Donde: VC = velocidad de crecimiento del cultivo ( $\text{cm d}^{-1}$ );  $h_{60}$  = potencial de presión a 60 cm de profundidad (cm); T = temperatura promedio diaria del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) y HBS = horas brillo sol promedio.

**Modelos de crecimiento con base en las variables independientes PNF, T y HBS.** En este caso, se determinaron cuatro modelos, uno para cada EDS y otro para los tres EDS considerados de manera simultánea. Los efectos lineales, cuadráticos o interacciones que no fueron significativos no se han incluido.

EDS de 10 m:

$$VC = -3.914 + 0.0529 * PNF - 0.000292 * PNF^2 + 0.00091 * PNF * T \quad (4)$$

EDS de 20 m:

$$VC = 11.2 - 0.0214 * PNF - 1.616 * T + 4.081 * HBS + 0.00024 * PNF^2 + 0.0245 * T^2 - 0.314 * HBS^2 \quad (5)$$

EDS de 40 m:

$$VC = -0.988 + 0.0221 * PNF + 0.0008 * T + 0.0398 * HBS - 0.000088 * PNF^2 \quad (6)$$

En general para los tres espaciamientos de drenaje:

$$VC = 0.602 + 0.0081 * PNF - 0.0626 * T + 0.1381 * HBS - 0.000047 * PNF^2 - 0.0034 * T^2 - 0.0513 * HBS^2 + 0.00017 * PNF * T - 0.00022 * PNF * HBS + 0.0272 * T * HBS \quad (7)$$

Cuyos coeficientes de determinación  $r^2$  fueron 0.8393, 0.9952, 1 y 0.5319, respectivamente.

Donde: PNF = profundidad promedio del manto freático (cm).

Considerando los valores de los coeficientes de determinación, puede afirmarse que VC se estima aceptablemente bien como función de las variables independientes, lo que es un indicador de su influencia sobre el crecimiento.

**Valores de las variables independientes que maximizan el crecimiento.** En los modelos seleccionados, el modelo general adoptado fue:

$$VC = a + bx + cy + dz + ex^2 + fy^2 + gz^2 + hxy + ixz + jyz \quad (8)$$

Donde: x, y, z = variables independientes; a, b, c, d, e, f, g, h, i, j = coeficientes del modelo.

Calculando las derivadas parciales respecto de las variables independientes e igualando a cero se obtiene:

$$\frac{\partial VC}{\partial x} = b + 2ex + hy + iz = 0 \quad (8.1)$$

$$\frac{\partial VC}{\partial y} = c + 2fy + hx + jz = 0 \quad (8.2)$$

$$\frac{\partial VC}{\partial z} = d + 2gz + ix + jy = 0 \quad (8.3)$$

Sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas que puede resolverse mediante álgebra matricial. En ese punto, VC tiene un máximo si los valores de los menores principales de la matriz Hessiana, evaluados en el punto solución de 8.1, 8.2 y 8.3, alternan en signo, iniciando con un valor negativo (Apostol, 1972). Si ello no ocurre, el punto determinado corresponde a un "punto de silla" para el cual la función no tiene ni valor máximo ni valor mínimo. En el Cuadro 3, se muestran los valores de las variables independientes que hacen máxima VC. Cabe hacer notar que, en cuatro casos, el valor máximo se presentó en los extremos del dominio (considerando como dominio de la función al intervalo de variación observado de las variables independientes) y, sólo en un caso, se encontró un máximo absoluto en las vecindades del dominio.

Con la hipótesis de que los modelos seleccionados permiten estimar aceptablemente el crecimiento, el plátano tendrá una VC máxima si las variables independientes se encuentran en los valores determinados por optimización indicados en el Cuadro 3. Considerando que en la definición del Modelo 7 se tomaron en cuenta las observaciones colectadas en los tres EDS, es en éste en el que puede basarse con mayor precisión para el análisis. De acuerdo con ese modelo, el crecimiento será máximo si  $T = 31.01^{\circ}\text{C}$ , se tienen 9.32 HBS y  $PNF = 121.54$  cm, valores para los que el modelo supone una VC de  $0.77 \text{ cm d}^{-1}$ . A la luz de estos resultados puede señalarse que el cultivo sufrió por falta de agua desde fines de enero hasta inicios de junio y de fines de julio a inicios de septiembre de 2003, períodos durante los cuales la PNF fue mayor que 121 cm (Figura 1), aunque de haberse aplicado riegos más frecuentes, no hubiese sido posible identificar el valor de PNF óptimo. Esta situación influyó también en el rendimiento obtenido, que apenas iguala al rendimiento promedio de la zona. Cabe señalar que los valores óptimos determinados para T y PNF son

Cuadro 3. Valores de las variables independientes que maximizan el crecimiento del cultivo de plátano.

Variables independientes	Esp. entre drenes	Valor de las variables independientes			Velocidad de crecimiento máxima
		<i>h</i>	T	HBS	
	m				cm d <sup>-1</sup>
<i>h</i> 60, T y HBS	20	430.48 †	19.86 §	7.43 †	2.9
		PNF	T (°C)	HBS	
	10	95.70 §	28.32 †	NP	0.94
PNF, T y HBS	20	188.51 †	19.86 §	6.49 †	6.68
	40	124.98 †	28.32 †	9.40 †	0.79
	10, 20 y 40	121.54 †	31.01 †	9.32 †	0.77

Notas: *h*60 = potencial de presión del agua en el suelo a 60 cm de profundidad (cm); T = temperatura media del aire (°C); HBS = horas brillo sol; PNF = profundidad del manto freático (cm); NP = no es posible identificar los valores. El signo † identifica a los valores encontrados por optimización en los modelos, mediante la solución de las Ecuaciones 8.1, 8.2 y 8.3. El signo † identifica al extremo máximo y el signo § al extremo mínimo de variación de las variables independientes.

similares a los señalados por Ramírez y Rodríguez (1988), quienes indicaron que la temperatura óptima para el desarrollo del plátano oscila alrededor de 26 °C y que, para evitar los problemas de exceso de humedad, se requiere que el manto freático se mantenga a más de 1.8 m de profundidad y, en áreas muy húmedas, a una profundidad de 1.2 m. Por otra parte, considerando los resultados obtenidos al usar *h* en lugar de PNF, el Modelo 3 hace concluir que el potencial *h* óptimo a 60 cm de profundidad para maximizar VC es de 430.48 cm. La PNF y el potencial *h* a 60 cm están relacionados empíricamente para la parcela por la expresión mostrada en la Figura 2. Para otro tipo de suelo se requiere determinar la relación existente entre ambas variables para definir cuál es la PNF más recomendable, tal que *h* a 60 cm se encuentre cerca del valor determinado, para maximizar la velocidad de crecimiento del cultivo.

### CONCLUSIONES

- Se encontraron diferencias estadísticas significativas en casi todas las variables fenológicas evaluadas. El tratamiento en el que se encontraron los mejores resultados en crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de plátano fue el correspondiente al espaciamiento entre drenes subsuperficiales (EDS) de 10 m; fue en éste donde la humedad del suelo fue menor, las plantas crecieron más rápidamente y se tuvo el mejor peso de racimos.
- En todas las variables fenológicas que caracterizan el desarrollo del plátano, así como en el rendimiento, se

observó una tendencia clara: a menor espaciamiento entre drenes subsuperficiales mayor crecimiento, desarrollo y rendimiento. De acuerdo con el modelo de regresión ajustado, el cultivo crece 0.86 cm menos por cada metro más de espaciamiento entre los drenes subsuperficiales.

- De los resultados obtenidos se concluye que el plátano es muy sensible a los excesos de humedad y que en la región de estudio sólo con espaciamientos entre drenes cortos, de 10 m entre drenes interceptores, pueden evitarse los efectos negativos causados al cultivo por los excesos de humedad.
- De los modelos obtenidos se encontró que la temperatura y las horas brillo sol que maximizan la velocidad de crecimiento del plátano fueron de 31.01 °C y 9.32 h, respectivamente, y que la profundidad del manto freático óptima fue de 121.54 cm, que para el tipo de suelo estudiado corresponde aproximadamente a un potencial *h* óptimo a 60 cm de profundidad de 430.48 cm. Para otro tipo de suelo se requiere determinar la relación entre ambas variables para definir la PNF, tal que *h* a 60 cm se encuentre cerca del valor determinado, para maximizar la velocidad de crecimiento del cultivo.

### LITERATURA CITADA

- Apostol, T.M. 1972. Análisis matemático: Introducción moderna al Cálculo Superior. Editorial Reverté S.A. Barcelona, España.
- Arrieta R., A. y E. Carrillo A. 2002. Respuesta del papayo variedad maradol, a tres espaciamientos de drenaje subsuperficial. Terra 20: 435-447.

- Feddes, R.A., P. Kabat, P.J.T. Van Bakel, J.J.B. Bronswijk y J. Halbertsma. 1988. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone - State of the art. *J. Hydrology* 100: 69-111.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 3a ed. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Mualem, Y. 1984. A modified dependent-domain theory of hysteresis. *Soil Sci.* 137-5: 283-291.
- Nájera H., F., O.L. Palacios V. e I. Nikolskii G. 1998. Evaluación económica de un módulo de drenaje subsuperficial en siembras de caña de azúcar y chile jalapeño en el trópico húmedo. *Agrociencia* 32: 209-215.
- Ramírez S., G. 1998. Plátano. Guía para la asistencia técnica agrícola en el área de influencia del campo experimental Cotaxtla. Agenda Técnica 2. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural-Fundación PRODUCE Veracruz. Campo Experimental Cotaxtla. División Agrícola. Veracruz, Veracruz, México.
- Ramírez S., G. y J.C. Rodríguez C. 1988. Tecnología para la producción de plátano en Tabasco. Folleto Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Fundación PRODUCE Tabasco. Campo Experimental Huimanguillo. Villahermosa, Tabasco, México.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics* 1: 318-333.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1998. La producción de plátano en México: Alcances y perspectivas. *Revista Claridades Agropecuarias* 58: 3-18.
- SAS Institute. 1996. Statistical Analysis System for Windows 6.12. Cary, NC.
- Simmonds, N.W. 1973. Los plátanos. Colección agricultura tropical. Título original "bananas", traducido del inglés. Editorial Blume. Barcelona, España.
- Vachaud, G. y J.L. Thony. 1971. Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. *Water Resour. Res.* 7: 111-127.
- Zarco H., A., O.L. Palacios V., F.J.A. Pedraza O., E. Carrillo A., I. Nikolskii G. y D. Cristóbal A. 2002. *Drainmod* y un enfoque de redes neuronales artificiales para predecir fluctuaciones del nivel freático. *Ingeniería Hidráulica en México* XVII-2: 65-75.

# PREDICCIÓN DEL TIEMPO OPORTUNO PARA PLANEAR Y OPERAR SISTEMAS DE LABRANZA

## Timeliness Prediction for Tillage Planning and Operation

Martín Cadena-Zapata<sup>1†</sup>, Santos Campos-Magaña<sup>2</sup>, Eduardo Narro-Farías<sup>1</sup> y Tomás Gaytán-Muñiz<sup>1</sup>

### RESUMEN

En la actualidad, el tiempo óptimo para la labranza se calcula con criterios subjetivos que utilizan balances simples de humedad y umbrales cualitativos para delimitar el intervalo de humedad adecuado en el suelo, lo cual no proporciona información precisa para seleccionar y operar sistemas de labranza. Este trabajo propone una metodología que utiliza un modelo determinístico de balance de humedad (SWATRE) y límites objetivos de "laborabilidad" del suelo determinados en laboratorio. También se presenta un estudio de caso para evaluar esta metodología, en el cual se predicen los períodos óptimos disponibles para trabajar un suelo franco. Primero, para verificar el modelo, las predicciones de balance de humedad se compararon con los valores medidos en un seguimiento de campo. Los valores calculados por medio del modelo y los valores medidos presentaron una relación lineal con un coeficiente de correlación  $r^2 = 0.93$ . Luego se modeló el balance de humedad con datos climáticos históricos de 24 años. Finalmente, con esta predicción y delimitando el intervalo óptimo de humedad con umbrales obtenidos en muestras de suelo en laboratorio, se calcularon los días disponibles (óptimos) como información básica para planear un sistema de labranza en la zona de estudio. La información que genera esta metodología es de gran utilidad para tomar decisiones al planear y operar sistemas de labranza.

**Palabras clave:** Modelado de humedad del suelo, límites de "laborabilidad" del suelo, días disponibles para la labranza.

<sup>1</sup> División de Ingeniería Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, 25315 Buenavista Saltillo, Coahuila, México.

<sup>†</sup> Autor responsable ([martincadena@att.net.mx](mailto:martincadena@att.net.mx)).

<sup>2</sup> Unidad de Ingeniería y Mecanización. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 429, 91700 Veracruz, Veracruz, México.

Recibido: Julio de 2001. Aceptado: Mayo de 2003.  
Publicado en Terra 21: 545-549.

### SUMMARY

Optimum time for tillage is normally calculated by using a simple water balance and empirical qualitative thresholds of soil moisture, which do not give precise information for selection and operation of farm machinery. This paper proposes a methodology that uses a deterministic water-balance model (SWATRE) in combination with objective workability limits obtained in laboratory, in order to predict optimum periods for tillage. To evaluate the methodology, a case study is presented in which available optimum periods to work a loam soil are predicted. The water balance was predicted with the model and values were compared against those measured in the field. Values calculated with the model and values measured in the field show a linear relationship with a correlation coefficient of  $r^2 = 0.93$ . Also, soil moisture balance was modelled with 24 years of historic data, and the optimum moisture range was delimited using threshold values from tests of soil samples in the laboratory; then the days available for tilling were calculated. This information was used for planning a tillage system in the area under study. The information derived from this methodology is very useful for decision-making in tillage planning and operation.

**Index words:** Modeling soil moisture, soil workability limits, available days for tillage.

### INTRODUCCIÓN

La maquinaria agrícola es uno de los insumos más costosos de los sistemas de producción agrícola; sin embargo, en México, la selección y operación de la misma se realiza empíricamente. Esto ocasiona baja eficiencia y alto costo de las labores, principalmente las de labranza, que pueden llegar a ser en algunas regiones, como en el centro de Veracruz, de hasta 40% (Cadena *et al.*, 2003). El cálculo de las necesidades de implementos y fuentes de potencia debe hacerse con base en el tiempo óptimo disponible

en que el perfil del suelo tiene la humedad adecuada para realizar las labores y en el tamaño del área por trabajar. El objetivo de la mecanización es realizar las labores en los sistemas de producción con la máxima eficiencia y la mejor calidad. Cuando no se cuantifica el tiempo oportuno, se subestiman o sobrestiman las necesidades de maquinaria y las labores se realizan muchas veces en condiciones subóptimas. Esto significa alto gasto de energía, retraso en el calendario de cultivo y exposición del suelo a erosión o daño de la estructura (Pineda *et al.*, 1996; Cadena, 1999). El efecto de un implemento de labranza en el suelo depende principalmente de la humedad en el perfil del mismo (Spoor, 1975). Por ello, es importante medir, calcular o predecir el estado de humedad en el suelo para que, al contrastarlo con los umbrales que delimitan los estados de humedad adecuados para trabajar un determinado tipo de suelo, se opere la maquinaria sólo en la condición donde se obtengan los mejores resultados de las labores. Con el fin de planear las operaciones en forma eficiente, la condición de humedad del suelo a la cual se trabajará debe determinarse cuidadosamente. Lo anterior permitirá que el agricultor tenga información determinante para seleccionar la cantidad y tamaño de equipo agrícola necesario, y no se vea en la necesidad de realizar labores en condiciones subóptimas por no retrasar el calendario de cultivo (Perdok y Kouwenhoven, 1994).

La determinación de períodos óptimos para el trabajo de la maquinaria se ha basado en dos componentes: 1) interacción de datos de suelo y clima (balance de humedad) y 2) umbrales que delimitan el estado de humedad óptimo del suelo para obtener los mejores resultados de las labores, basados en los requerimientos de cultivo específicos (límites de "laborabilidad"), como lo refieren Terzaghi *et al.* (1988).

Para estimar los períodos óptimos para el trabajo de la maquinaria, se desarrollaron varios métodos basados en la predicción del estado de humedad en el suelo. La mayoría de las metodologías se basan en balances simples de humedad (Elliot *et al.*, 1977; Witney *et al.*, 1982; Simalenga y Have, 1992). Estos autores suponen características promedio en el perfil del suelo, asumiendo que la capa arable es homogénea (ejemplo: de 0 a 30 cm). Así, se calcula a escala regional el tiempo promedio en que el suelo debe estar en condiciones apropiadas para ser trabajado. Sin embargo, para las operaciones con maquinaria,

además de conocer el estado de humedad, también importa su distribución en el perfil. Esto es en especial relevante cuando se pasa de una estación o temporada a otra (período seco-período húmedo-período seco), ya que aunque el fondo de la capa de suelo que se va a trabajar presente una humedad adecuada, la parte superior podría estar muy húmeda y ocasionar demasiado patinaje y compactación por las ruedas de la maquinaria. En el caso inverso, la superficie del suelo podría tener una humedad adecuada para la tracción, pero el fondo de la capa trabajada podría estar demasiado húmedo, por lo que la acción de los implementos y el peso de las ruedas causarían compactación (piso de arado). Es claro, pues, que cuando se calcula un balance de humedad simple y se toma el promedio de humedad en el perfil y se pasan por alto los problemas mencionados, se corre el riesgo de daño al suelo y uso inadecuado de maquinaria y equipo agrícola.

Los modelos determinísticos para calcular el balance de humedad simulan el movimiento del agua, dentro y a través del suelo, y permiten desarrollar y mejorar la información acerca del estado y distribución de la humedad del suelo en forma vertical. Normalmente, estos modelos utilizan una relación entre el potencial mátrico y la conductividad hidráulica para simular infiltración, redistribución del agua en el perfil y percolación por debajo de la zona radical (Connolly, 1998). Por lo anterior, es mejor utilizar modelos determinísticos para calcular el balance de humedad en trabajos de manejo de suelos con implementos.

En relación con los umbrales que delimitan el estado óptimo de humedad para la labranza (límites de "laborabilidad"), en forma regional, se han utilizado valores como capacidad de campo y los empíricos límites de contracción y plasticidad (Earl, 1996). Sin embargo, para usar criterios más objetivos en la determinación de los intervalos óptimos de humedad a escala parcela, se han utilizado valores determinados en pruebas de laboratorio, como **permeabilidad al aire y diagramas de humedad-presión-volumen** para un límite húmedo máximo y pruebas de **caída de agregados** para un límite máximo seco, como en los estudios de Hadas y Wolf (1984), Terzaghi *et al.* (1988) y Perdok *et al.* (1996). Estos últimos límites se obtienen objetivamente y determinan un intervalo de humedad en el cual el suelo puede trabajarse sin problemas de deterioro de la estructura y con el menor uso de energía para obtener una adecuada calidad de labor.

Los objetivos de este trabajo fueron: (1) utilizar un modelo determinístico del balance de humedad y límites de "laborabilidad", establecidos en laboratorio, para predecir y calcular los períodos óptimos de humedad para las operaciones de labranza en un suelo franco; (2) comparar la distribución de humedad modelada con datos tomados en campo y (3) proponer, con base en los períodos calculados, el sistema de laboreo más adecuado para una parcela específica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir los objetivos del trabajo, se aplicó y evaluó la metodología propuesta en un estudio de caso. Para esto, se seleccionó un terreno ubicado en un ambiente tropical en Cotaxtla, Veracruz, México. Las condiciones de suelo, clima y fuentes de potencia disponibles son representativas de una zona agrícola de 60 mil ha, donde cada año se establece maíz, y donde se han identificado altos costos de producción y resultados tecnológicos inadecuados para el óptimo establecimiento del cultivo con labranza convencional, usando arados y rastras de discos (Uresti y Campos, 1995).

El predio en estudio tiene un suelo franco (26.3% de arcilla, 38.3% de limo, 35.3% de arena y 2.3% de materia orgánica) con una densidad aparente de 1.3 a 1.4 g cm<sup>3</sup>, en un perfil de 0 a 25 cm.

### Modelo para el Balance de Humedad

Para seleccionar el modelo, se tomó en cuenta información de una exhaustiva revisión de modelos utilizados para representar el balance de humedad en el sistema suelo-cultivo, realizada por Connolly (1998). Para este trabajo, el modelo seleccionado fue SWATRE, que es un modelo unidimensional de flujo de agua en el cual se usan las propiedades físicas del suelo, características de las plantas y datos climáticos para calcular el balance de humedad con base diaria (Feddes *et al.*, 1978; Kabat *et al.*, 1992; De Jong y Bootsma, 1997); este modelo se seleccionó porque los datos de salida permiten una representación vertical de la humedad en el perfil del suelo. Como se mencionó anteriormente, esta representación es adecuada para analizar el estado de humedad del suelo en relación con la labranza. Para modelar el perfil de humedad con SWATRE, se utilizaron datos meteorológicos diarios (lámina de agua y evaporación) obtenidos en una serie de 24 años en una

estación meteorológica ubicada a 1 km del predio en estudio. Los datos anteriores y los parámetros de **curva de retención de humedad y conductividad hidráulica** del suelo del lugar son los datos que se introducen al modelo para calcular el balance de humedad.

### Límites de "Laborabilidad"

Los límites del suelo en estudio se cuantificaron para el mismo predio, tanto en campo, como en laboratorio, por Cadena (1999). El límite húmedo (LH) de "laborabilidad" se establece determinando a muestras de suelo el máximo contenido de humedad al que el suelo puede trabajarse sin sufrir deterioro de su estructura (compactación), utilizando como indicador de la pérdida de porosidad, la disminución en el suelo de la permeabilidad al aire. El límite seco (LS) de "trabajabilidad" se establece determinando a muestras de suelo el mínimo contenido de humedad al cual el suelo puede disgregarse adecuadamente; aquí se utiliza como indicador el diámetro medio de agregados requerido por un cultivo específico. Cuando la operación de labranza se realiza en un suelo dentro de estos límites, se espera que en un solo paso se alcancen resultados satisfactorios del laboreo.

### Monitoreo del Perfil de Humedad en Campo para Verificar el Modelo

Para realizar una comparación entre el perfil de humedad modelado y los datos tomados en campo, se hizo un seguimiento de la humedad en el suelo, iniciando con un perfil uniformemente saturado, de 0 a 30 cm de profundidad. Se dejó secar el terreno en forma natural y se hizo la toma de muestras con una barrena cada 5 cm, hasta una profundidad de 25 cm. Al azar, se tomaron cinco repeticiones de cada muestra dentro de la parcela experimental (10 x 50 m). La determinación de la humedad se hizo en forma gravimétrica.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1, se muestra la relación de los datos de humedad del perfil, obtenidos por medio del modelo y en campo.

La relación lineal entre la predicción de valores y los medidos tiene una alta correlación ( $r^2 = 0.93$ ). De acuerdo con la relación mostrada en la gráfica, ésta es mucho mejor entre los límites de "laborabilidad",

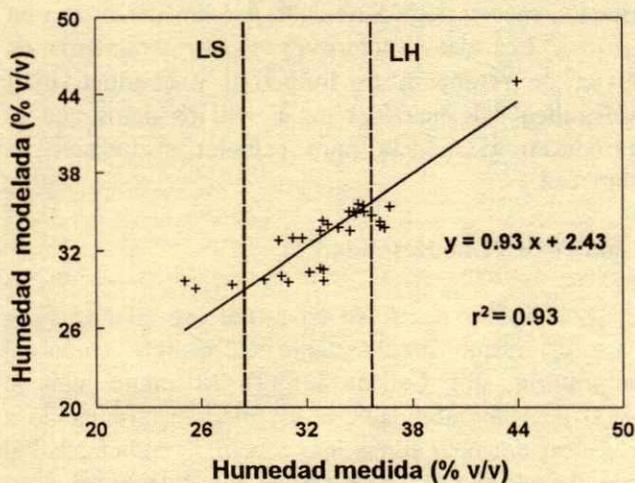


Figura 1. Relación entre la predicción del contenido de humedad en el perfil del suelo utilizando el modelo SWATRE y los valores medidos en campo.

límite seco (LS) y límite húmedo (LH) que es el intervalo ideal para realizar el laboreo sin riesgo de deterioro de la estructura del suelo y obtener la mejor calidad de labor con la mínima inversión de energía, como se demostró específicamente para este suelo, en los estudios de Cadena *et al.* (2003).

El balance de humedad se realizó a diario para el período en que se ha de efectuar la labranza para el establecimiento del cultivo de maíz en la zona (del 15 de mayo al 15 de julio). Como se mencionó anteriormente, se utilizaron datos climáticos históricos de una serie de 24 años y las características hidráulicas del suelo (curva de retención de humedad y conductividad hidráulica). En el Cuadro 1, se muestran los períodos óptimos laborables a diferentes profundidades en el perfil del suelo para un período de 24 años. Se puede observar que sólo en dos años

(1972 y 1982) pudo realizarse la secuencia de operaciones de labranza convencional en la humedad adecuada del suelo, considerando 25 cm de profundidad de trabajo, jornadas de trabajo de hasta 16 h diarias y capacidades efectivas de la maquinaria en el área de 5.4 h ha<sup>-1</sup>, en aradura; 1.4 h ha<sup>-1</sup>, en rastreo y 2 h ha<sup>-1</sup>, en siembra, para predios de 20 ha en la región

En la Figura 2, se muestra la probabilidad de tener cierto número de días con el suelo con un contenido de humedad óptimo (dentro de los límites de "laborabilidad") a diferentes profundidades en el perfil. Es claro que para la mayoría de los años, se necesita trabajar con un sistema de labranza somero (entre 10 y 15 cm), por ejemplo, mínima o cero labranza, para realizar la operación en condiciones

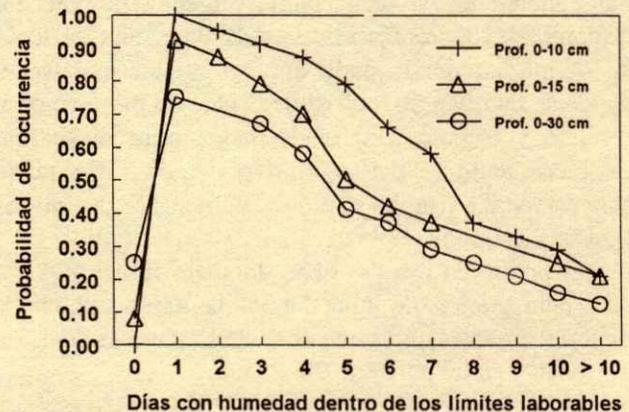


Figura 2. Probabilidad de ocurrencia de días (período del 15 de mayo al 15 de julio) donde la humedad del suelo estará dentro de los límites laborables a diferentes profundidades. El cálculo se realizó para un período de 24 años, para Cotaxtla, Veracruz, México.

Cuadro 1. Períodos con humedad óptima para la labranza para establecer maíz en Cotaxtla, Veracruz, México.

Profundidad	Año											
	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975
cm	Días con humedad del suelo dentro de los límites de "laborabilidad"											
0 a 10	7	4	6	7	10	3	4	8	16	9	2	5
0 a 15	7	4	6	4	10	0	0	5	14	7	2	3
0 a 30	3	4	6	4	10	0	0	6	14	7	0	3
Profundidad	Año											
	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
cm	Días con humedad del suelo dentro de los límites de "laborabilidad"											
0 a 10	7	5	15	6	5	6	32	1	15	7	7	14
0 a 15	3	3	15	5	2	4	32	1	14	4	7	14
0 a 30	1	0	12	4	1	0	28	0	8	4	5	9

óptimas. Para este predio, un sistema como el convencional, donde se tiene como objetivo realizar labores a más profundidad y varios pasos de implemento, en la mayoría de los años se trabajaría en condiciones subóptimas, ya que la probabilidad de tener días disponibles en adecuada condición de humedad, a una profundidad de 30 cm, es muy baja. Lo anterior explica los pobres resultados, la necesidad de varios pasos de implemento y el alto costo de la labranza en la región, mencionados por Cadena *et al.* (2003).

### CONCLUSIONES

- El modelo determinístico SWATRE de balance de agua predice muy bien la distribución de humedad en el perfil del suelo, como se necesita para tomar decisiones en la operación de maquinaria agrícola.
- El cálculo de días disponibles, utilizando las predicciones de humedad basadas en el modelo y límites objetivos de "laborabilidad", proporciona información precisa que puede utilizarse para la planeación (cantidad y tamaño de implementos y fuentes de potencia) y operación (profundidad y tiempo óptimo) de sistemas de labranza adecuados a escala parcelaria.

### LITERATURA CITADA

- Cadena-Zapata, M. 1999. Soil workability as a basis for advice on tillage activities. PhD thesis. Landbouwniversiteit Wageningen. Wageningen, The Netherlands.
- Cadena-Zapata, M., S. Campos-Magaña, E. Narro-Farías y T. Gaytán-Muñiz. 2003. Determinación del estado de humedad para una mínima aplicación de energía en laboreo con tracción motriz. *Terra* 21: 13-19.
- Connolly, R.D. 1998. Modelling effects of soil structure on the water balance of soil-crop-systems: A review. *Soil Tillage Res.* 48: 1-19.
- De Jong, R. y A. Bootsma. 1997. Estimates of water deficits and surpluses during the growing season in Ontario using the SWATRE model. *Can. J. Soil Sci.* 77: 285-294.
- Earl, R. 1996. Prediction of trafficability and workability from soil moisture deficit. *Soil Tillage Res.* 40: 155-168.
- Elliot, R.L., W.D. Lembke y R.D. Hunt. 1977. A simulation model for predicting available days for soil tillage. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 20: 4-8.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik y H. Zaradny. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simul. Monogr. Pudoc. Wageningen, The Netherlands.
- Hadas, A. y D. Wolf. 1984. Refinement and re-evaluation of the drop shatter soil fragmentation method. *Soil Tillage Res.* 4: 237-249.
- Kabat, P., B.J. van de Broek y R.A. Feddes. 1992. SWACROP: A water management and crop production simulation model. Int. Commission on Irrigation and Drainage Bull. 41: 61-64.
- Perdok U.D. y J.K. Kouwenhoven. 1994. Soil-tool interactions and field performance of implements. *Soil Tillage Res.* 30: 283-326.
- Perdok, U.D., B. Kroesbergen y M.A. Hillhorst. 1996. Influence of gravimetric water content and bulk density on dielectric properties of soil. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 361-367.
- Pineda M., T., J.M. Ramírez A. N. Chávez A. y P. Fagundo G. 1996. Efecto del contenido de humedad sobre las operaciones de labranza. *Revista Chapingo (Ingeniería Agrícola)* 3: 91-96.
- Simalenga, T.E. y H. Have. 1992. Estimation of soil tillage work days in a semiarid area. *J. Agric. Eng. Res.* 51: 81-89.
- Spoor, G. 1975. Fundamental aspects of cultivations. Soil physical conditions and crop production. Tech. Bull. 29. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. London, UK.
- Terzaghi, A., W.B. Hoogmoed y R. Miedema. 1988. The use of the wet workability limit to predict the land quality workability for some Uruguayan soils. *Neth. J. Agric. Sci.* 36: 91-103.
- Uresti G., J. y S.G. Campos M. 1995. Respuesta del maíz a la labranza de conservación en cuatro suelos tropicales. *Agronomía Mesoamericana* 6: 80-87.
- Witney B.D., K. Eradat-Oskoui y R.B. Speirs. 1982. A simulation model for predicting soil moisture status. *Soil Tillage Res.* 2: 67-80.

# LABRANZA REDUCIDA Y CONVENCIONAL EN LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA MALEZA Y RENDIMIENTO DE FRIJOL

## Effect of Reduced and Conventional Tillage on the Spatial Distribution of Weed and Dry Bean Yield

Mario D. Amador-Ramírez<sup>1</sup>

### RESUMEN

En 2001, se realizaron experimentos de campo con el objeto de estimar la distribución espacial de la maleza y el rendimiento de frijol en respuesta a la eliminación del volteo y surcado y a la labranza convencional. De acuerdo con los valores de índice de normalidad (W) e índice de Morisita, la distribución de la población total de la maleza antes de la labranza primaria o antes y después de las escardas así como el rendimiento de frijol no fueron normales ni aleatorias, sino en agregados. Modelos exponenciales describieron las distribuciones espaciales de la maleza previo a la labranza primaria y siembra de frijol, así como previo a las escardas, mientras que un modelo lineal describió la distribución espacial de la maleza posterior a las escardas. En cambio, un modelo esférico describió la distribución del rendimiento de frijol. El agregado de la maleza posterior a las escardas en la dirección norte-sur del margen oriental del área de estudio se relacionó con la distribución mostrada por aceitillas *Bidens* spp., mientras que la distribución observada por gordolobo *Helianthus petiolaris* explican los agregados localizados en la parte norte-centro. La tendencia del rendimiento de frijol a agregarse en el centro y margen derecho superior del terreno coincidió con una reducida presencia de la maleza después de las escardas en esas áreas del terreno.

**Palabras clave:** *Phaseolus vulgaris*, distribución numérica, geostadística, semivariograma, análisis de patrones, kriging.

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Zacatecas. Apartado Postal 18, 98500 Calera V.R., Zacatecas, México. (amadorm@inifapzac.sagarpa.gob.mx)

Recibido: Febrero de 2002. Aceptado: Febrero de 2003.  
Publicado en Terra 21: 551-560.

### SUMMARY

In 2001, field experiments were conducted in order to estimate the spatial distribution of weeds and dry bean yield in response to reduced and conventional tillage. Based on values of the normality index (W) and Morisita's index, the distribution of total weed population and of dry bean yield were neither normal nor random, but in aggregates. Weed spatial distributions previous to primary tillage and cultivation were better described by exponential models, whereas weed distribution after cultivation was described by a linear model. In contrast, dry bean yield distribution was better described by a spherical model. The weed aggregate quantified after cultivation located north-south of the east boundary was related with beggarticks distribution, whereas those aggregates localized north-central are explained by sunflower distribution. The tendency of dry bean yield to be aggregated at the center and upper-right side of the plot agreed with a reduced presence of weeds after cultivation in those plot areas.

**Index words:** *Phaseolus vulgaris*, numerical distribution, geostatistics, semivariogram, pattern analysis, kriging.

### INTRODUCCION

En el estado de Zacatecas, se sembraron aproximadamente 614 000 ha de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y se cosecharon 93% de la superficie sembrada durante 2001 ocupando el primer lugar en importancia entre los granos básicos (SAGARPA, 2001). Uno de los factores que reduce el rendimiento de frijol es la presencia de maleza en el cultivo, debido a una competencia por elementos para su desarrollo y crecimiento. Disminución en el rendimiento de frijol de riego manejado con labranza convencional se cuantificaron hasta en 96% si la maleza está presente durante toda la temporada de crecimiento del frijol (Solórzano, 1983). Desafortunadamente, información sobre los efectos de la maleza en frijol sembrado en

condiciones de labranza reducida no está disponible en la región.

El sistema de producción del cultivo de frijol que practican los productores de Zacatecas incluye prácticas agrícolas primarias y secundarias, como el barbecho, dos pasos de rastra y surcado previos a la siembra del grano, así como dos escardas a 22 y 45 días después de la siembra (Pérez, 1998). Esta tradición ha resultado en una lenta adopción de otros sistemas de producción. La labranza reducida, una forma de labranza de conservación, representa un sistema de producción alternativo para frijol. El término labranza reducida se refiere a cualquier sistema de producción usando menos operaciones de labranza que el sistema tradicional de producción (Paxton y Lavergne, 1991).

El interés por el sistema de producción de frijol con labranza reducida se está incrementando por parte de los productores e instituciones en Zacatecas. El interés se basa en los beneficios que tiene esta actividad agrícola, como la reducción en los costos de producción y ventajas agronómicas para el suelo como el control de la erosión, la cual se estimó en 119 t ha<sup>-1</sup> para un suelo franco arcilloso (Francis *et al.*, 1986).

La maleza presente en campos de cultivo es también influenciada por la labranza. La labranza convencional aplicada para la preparación de la cama de siembra reduce las poblaciones de maleza anual así como la germinación de semillas y emergencia de plántulas al labrar el suelo previo a la siembra del cultivo (Buhler, 1998). La composición y cantidad de maleza pueden asociarse con la reducida o cero labranza (Thomas y Frick, 1993).

Las poblaciones de maleza presentan diferente distribución espacial causado por factores genéticos de la especie de maleza, competencia intraespecífica, y competencia interespecífica con otras especies de maleza (Figuroa y Morales, 1992). La maleza puede distribuirse en forma agregada, concentrada, uniforme y lineal. Estos tipos de distribución espacial también son el resultado de la distribución espacial de cultivos y manejo del suelo (labranza primaria y secundaria). Por muchos años, los investigadores asumieron que las poblaciones de maleza se distribuían de manera aleatoria en el cultivo (Schweizer *et al.*, 1998). Sin embargo, el patrón de distribución de semillas y plántulas de maleza tiende a ser agregado en campos de cultivo (Johnson *et al.*, 1995, 1996; Cardina *et al.*, 1996).

Una implicación de la distribución agregada de la maleza es la sobrestimación de la pérdida en rendimiento de cultivos, debido al uso de la densidad promedio de la maleza en lugar de usar su carácter agregado (Schweizer *et al.*, 1998). La agregación en poblaciones de maleza conduce a la ineficiencia en la aplicación de medidas de control. El análisis de la estructura espacial podría influir en las decisiones de asperjar o no asperjar un herbicida, mientras que el uso eficiente del herbicida sería mayor cuando la maleza está espacialmente agregada (Johnson *et al.*, 1995), porque la aplicación del producto químico sería en sitio específico.

La agregación y estructura espacial de poblaciones de maleza pueden caracterizarse mediante medidas de agregación numérica, como el Índice de Agregación de Morisita (Morishita, 1962), los métodos Razón Varianza/Media y Binomial Negativa (Coronado y Sánchez, 1993) o mediante estadística espacial (Halstead *et al.*, 1993; Johnson, 1994; Cardina *et al.*, 1995). Existen diferencias entre descripción numérica y espacial. La descripción numérica sólo indica la proporción de un campo libre de maleza, mientras que la estadística espacial describe localidades libres e infestadas con maleza. Poca información explícita sobre la distribución espacial de maleza es proporcionada por los parámetros de agregación numérica, debido a que no hay un enlace entre localización de la muestra y datos sobre densidad de plantas (Cardina *et al.*, 1997). Un método estadístico para describir la distribución espacial de maleza es la Geoestadística (Schweizer *et al.*, 1998).

Debido a que el uso de la geoestadística para determinar la estructura y distribución espacial de la maleza en cultivos de maíz y soya es relativamente reciente, información de este tipo en frijol y maíz para las condiciones climáticas de la región del Altiplano de Zacatecas, donde el efecto de escardas esté incluido, no está disponible. Sin embargo, los tipos de labranza podrían producir posibles modificaciones en la distribución espacial de poblaciones de maleza y rendimiento de grano de frijol. Por lo tanto, el propósito de este estudio fue determinar la distribución espacial en poblaciones de maleza y rendimientos de semilla de frijol en lotes manejados con labranza reducida y labranza convencional en condiciones de riego. Las distribuciones de los rendimientos de frijol trataron de ser explicadas a través de espacialidad mediante una posible relación con la distribución de la maleza.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

El área de estudio se localizó en el Campo Experimental Zacatecas cerca de Calera de V. R., Zacatecas., el cual se ubica a una altitud de 2197 m, en el paralelo 22° 54' N y 102° 39' O del meridiano de Greenwich. Existen diversas clasificaciones climáticas que se adaptan según las necesidades de los usuarios. Sin embargo, basado en la clasificación ambiental del estado de Zacatecas hecha por Medina *et al.* (1998), el clima en el área de estudio es del tipo subtropical árido templado.

### Establecimiento del Estudio

El experimento de campo se realizó durante 2001 en parcelas manejadas con dos tratamientos: (1) labranza convencional y (2) labranza reducida en condiciones de riego. Estas parcelas experimentales se manejaron por cinco años con estos tratamientos, así como con rotaciones de frijol-maíz-frijol. Las parcelas fueron de 10 surcos cada una por 102 m de largo. La distancia entre surcos fue de 0.76 m. Se sembraron con frijol tres parcelas con labranza reducida y tres con labranza convencional, las cuales estuvieron colocadas alternadamente. La labranza convencional consistió en la aplicación de volteo, rastreo, surcado y dos escardas 25 y 45 días después de la siembra. La labranza reducida consistió en la supresión del volteo y surcado, pero se aplicaron el rastreo y las dos escardas en las mismas fechas.

### Manejo del Cultivo

La variedad utilizada fue 'Flor de Mayo Sol' y la distancia entre plantas fue de 10 cm, lo que produjo una densidad de 130 000 plantas ha<sup>-1</sup>. El 22 de mayo, se realizó la siembra en condiciones óptimas de humedad, proporcionada por un riego de presiembra. En parcelas con labranza reducida, se usaron los surcos construidos en el ciclo agrícola anterior para aplicar el riego de presiembra, mientras que la construcción de surcos tuvo que ser realizada después del rastreo y volteo en las parcelas con labranza convencional para aplicar este riego de presiembra. Se aplicaron un total de cinco riegos durante todo el ciclo del cultivo. La cantidad de agua aplicada en cada riego no se midió. La fertilización se hizo en forma total en la siembra con la fórmula 50-50-00. Se utilizó

urea como fuente de N y 18-46-0 como fuente adicional de N y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

### Colección de Datos

El muestreo de poblaciones de plántulas de maleza se realizó en lugares colocados a 1.5 m en la dirección este-oeste y a 6.0 m en la dirección norte-sur. Las épocas de muestreo de las poblaciones de plántulas de maleza fueron: 1) previo a la siembra del cultivo, 2) previo a las escardas (14 días después de siembra) y 3) 18 días después de la segunda escarda. Todas las plántulas de maleza dentro de un cuadrante permanente de 0.20 x 1.0 m en cada punto de muestreo se identificaron, se contaron, y se removieron en determinado momento por la labranza primaria y secundaria. Se determinaron las poblaciones de plantas de frijol incluidas en 1 m de hilera, así como el peso de grano de esas plantas de cultivo en los mismos sitios donde se cuantificaron las poblaciones de maleza. En el momento de la determinación del rendimiento el grano de frijol contenía 12% de humedad.

### Análisis Estadístico

El análisis estadístico de los datos de poblaciones de maleza y rendimiento de frijol incluyó la obtención de la media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación, usando PROC UNIVARIATE (SAS Institute, 1996). Se calculó el coeficiente de variación, con el cual pudo compararse las variabilidades de dos o más series de datos cuando hubo una diferencia en magnitud de la media y desviación estándar (Rees, 1995). Las distribuciones numéricas de los datos para determinar los patrones espaciales de maleza y rendimiento de frijol se calcularon mediante el Índice de Dispersión de Morisita I<sub>2</sub> (Morishita, 1962).

### Análisis Geoestadístico

La Geoestadística está basada en la teoría de las variables regionalizadas, la cual consiste en asumir una continuidad proporcionada por la correlación espacial de los datos de una variable entre puntos, mientras que la Estadística convencional está basada en la aleatoriedad e independencia entre datos asumiendo cero continuidad. La teoría de la variable regionalizada consiste en expresar como varianza a la

diferencia entre pares de valores de una variable separada por la distancia (Pierson y Wight, 1991).

**Variografía.** El grado de correlación o continuidad entre los datos se midió a través de un semivariograma, el cual describe cómo la varianza de las observaciones cambia con la distancia en una dirección dada. Esta autocorrelación espacial se examinó usando la ecuación de la semivarianza (Isaaks y Srivastava, 1989):

$$\gamma_h = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Donde  $\gamma_h$  es la semivarianza de los sitios de muestreo separados por la distancia  $h$ ,  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$  son densidades de maleza en los puntos  $x$  y  $x+h$ , y  $N_h$  es el número de pares de sitios de muestreo separados por la distancia  $h$ .

Para cada fecha de muestreo, se construyeron semivariogramas omnidireccionales que incluyen ambas series de datos provenientes de los tratamientos de labranza reducida y convencional. Para todos los semivariogramas, el número de intervalos de clase fue 9, con una distancia promedio entre clases de 8.5 m. Cada punto en las gráficas representan datos con al menos 4200 pares de muestras. Para calcular el valor de  $\gamma_h$ , se usaron todos los pares de puntos separados por la distancia  $h$ . Se verificó el patrón de anisotropía en las direcciones de 0 y 90 grados.

**Kriging.** En este estudio, se usó el método de Kriging para predecir valores sin sesgo y con mínima varianza. Los valores interpolados pueden usarse con confianza conocida, ya que la varianza de los estimados puede a sí misma ser estimada (Burgess y Webster, 1980). La primer fase en kriging es la medición de la variación espacial de la población de malezas y rendimiento de frijol, lo que conduce a la elección de una estrategia y técnica apropiada de muestreo. El procedimiento de kriging empieza por ajustar un modelo al semivariograma empírico. Los modelos esférico, exponencial, lineal y gaussiano pueden usarse para describir el semivariograma. El modelo esférico está dado por:

$$\gamma(h) = C_o + C_s \left\{ \left( \frac{3h}{2r} \right) - \left( \frac{h^3}{r^3} \right) \right\}$$

el modelo exponencial está dado por:

$$\gamma(h) = C_o + C_s \{ 1 - \exp(-h/r) \}$$

y el modelo lineal está dado por:

$$\gamma(h) = C_o + wh$$

Donde  $C_o$  es el efecto nugget,  $C_o + C_s$  es el umbral o asíntota,  $h$  es la separación en distancias,  $r$  es el rango y  $w$  es un gradiente considerado como la intensidad espacial de la variación.

Se usaron los parámetros de los modelos exponencial, esférico y lineal para estimar valores en sitios no muestreados, usando kriging ordinario por bloqueo. Se construyeron mapas bidimensionales mostrando la densidad de la maleza o el rendimiento de grano de frijol, usando bloques de 2 x 2 m en una cuadrícula de 45 x 102 m en intervalos de 1.2 m. Se usó un máximo de 16 puntos vecinos para estimar valores en cada bloque con un radio de búsqueda de 110 m. La construcción de los semivariogramas, kriging y mapeo se realizó mediante el uso del programa GS+ (Gamma Design Software, 1998).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Distribución de la Maleza

Basado en el análisis estadístico descriptivo, la densidad media de maleza estimada antes de la labranza primaria, antes de las escardas y 19 días después de la última escarda fue 6, 20 y 58% más alta en parcelas con labranza reducida que en parcelas con labranza convencional, respectivamente (Cuadro 1). Este resultado podría atribuirse al menor disturbio del suelo ocasionado por el menor número de labores agrícolas incluidas en el sistema de labranza reducida. Ball (1992) mencionó que los patrones de disturbio, ocasionados por la aplicación o no aplicación de la labranza primaria y secundaria durante la temporada de crecimiento de cultivos, tiene una influencia en el banco de semillas y, por consiguiente, en la cantidad y composición de especies de plantas de malezas. Este investigador señaló que la labranza de "inversión", como el barbecho, resulta en el entierro de una gran proporción de semillas de maleza, mientras que métodos de labranza de "no-inversión" de suelo, como la labranza reducida, deja una gran proporción de semillas cerca de la superficie del suelo que estarán expuestas a la luz, la cual estimula la germinación (Popay y Roberts, 1970). Tripiett y Van Doren (1977) mencionaron que el objetivo primario de la labranza es el control de la maleza, por lo que métodos como el

**Cuadro 1. Estadísticos clásicos e índices de normalidad (W) y agrupamiento de la población total de malezas en frijol en respuesta a la labranza reducida (LR) y labranza convencional (LC) y épocas de muestreo.**

Época de muestreo <sup>†</sup>	Labranza	W	Media	Mediana	Máx.	Min.	CV <sup>‡</sup>	DS <sup>§</sup>	Coef. de simetría	Índice de Morisita <sup>‡</sup>
----- número m <sup>-2</sup> -----										
ALP	LR	0.72*	0.81	0	7	0	141.2	1.14	2.1	1.8
	LC	0.67*	0.76	0	9	0	160.8	1.24	2.7	2.3
Acult	LR	0.75*	6.0	5	60	0	124.4	7.51	2.6	2.4
	LC	0.77*	4.8	5	25	0	120.8	5.76	1.3	2.2
Dcult	LR	0.68*	106.9	90	735	10	79.5	85.1	4.0	1.6
	LC	0.77*	45.1	35	275	0	83.5	37.7	2.7	1.7

<sup>†</sup> ALP = antes de la labranza primaria; Acult = antes de cultivación; Dcult, después de cultivación. <sup>‡</sup> CV = coeficiente de variación; <sup>§</sup> DS = desviación estándar.

<sup>‡</sup> Valores del índice >1 con base en prueba de  $\chi^2$ .

\* Indica rechazo de la hipótesis nula de que los datos ajustan a una distribución normal a un valor de 1% de significancia.

químico deben usarse para sustituir la disminución de actividades agrícolas en la labranza reducida.

Los resultados mostrados a través de la desviación estándar indicaron que la variación de los datos alrededor de la media fue alta antes de la labranza primaria, así como antes de las escardas. Esta variación estuvo dada por poblaciones de maleza que fluctuaron desde cero hasta 60 malezas m<sup>-2</sup>. En contraste, bajas desviaciones estándar observadas en poblaciones de maleza después de las escardas sugirieron una baja variabilidad en los datos. Los coeficientes de variación fueron similares al comparar las variabilidades entre los datos en cada fecha de muestreo, aunque esta variabilidad fue menor que 100% en el muestreo realizado después de las escardas, lo que indica que la variabilidad (como un porcentaje de la media) en las poblaciones de maleza antes de la labranza primaria y antes de las escardas fue mayor que después de las escardas. Johnson *et al.* (1996) también estimaron coeficientes de variación arriba de 100% durante el análisis espacio-temporal de *Chenopodium album* y *Abutilon theophrasti* en maíz y frijol soya.

Excepto por la similitud entre la media y la mediana poblacional de maleza cuantificada antes de las escardas en parcelas con labranza convencional, valores positivos en los coeficientes de simetría se podrían explicar a través de la media, la cual fue mayor que la mediana (Cuadro 1). Asimismo, todos los coeficientes de simetría fueron mayores que uno, lo que indica que la distribución de los datos fue asimétrica más que simétrica. Basado en los valores de índice de normalidad (W) e índice de Morisita, la distribución de la población total de maleza en las tres fechas de muestreo no fue normal ni aleatoria, sino en agregados. Estos resultados confirman la información obtenida por Halstead *et al.* (1993), Cardina *et al.*

(1995), Johnson *et al.* (1996) y Schweizer *et al.* (1998), quienes también determinaron la distribución de maleza en agregados.

Semivariogramas empíricos se calcularon sólo para la dirección norte-sur (Figura 1), mientras que el cálculo de semivariogramas para la dirección este-oeste no fue posible, debido a la colocación alterna de las parcelas experimentales. La dirección norte-sur correspondió a la dirección de los surcos. La forma de los semivariogramas fue similar entre los muestreos realizados previo a la labranza primaria y previo a las escardas (Figuras 1a,b). La semivarianza para cada espacio de valores se incrementó con el avance en las épocas de muestreo; la semivarianza más alta en poblaciones de maleza después de las escardas indica que la diferencia entre observaciones fue más grande en esta época de muestreo que en las anteriores. Esto es el resultado de una mayor densidad de maleza y una alta varianza entre los datos provenientes del muestreo posterior a las escardas (Cuadro 1). La similitud en la forma de los semivariogramas fue el resultado de ligeras variaciones en la media poblacional y coeficiente de variación.

Basado en los semivariogramas empíricos, el modelo exponencial describió las distribuciones espaciales de la maleza previo a la labranza primaria y siembra de frijol, así como previo a las escardas, mientras que un modelo lineal describió la distribución espacial de la maleza posterior a las escardas (Figura 1). Los resultados de los modelos exponenciales indicaron que las muestras separadas hasta en 3.7 m estuvieron correlacionadas, por lo que la distancia entre muestras deberá ser mayor en futuros muestreos. La distancia entre muestras dada por el rango del modelo lineal fue de 75.4 m, lo que indica que las muestras deberán estar tan lejos una de

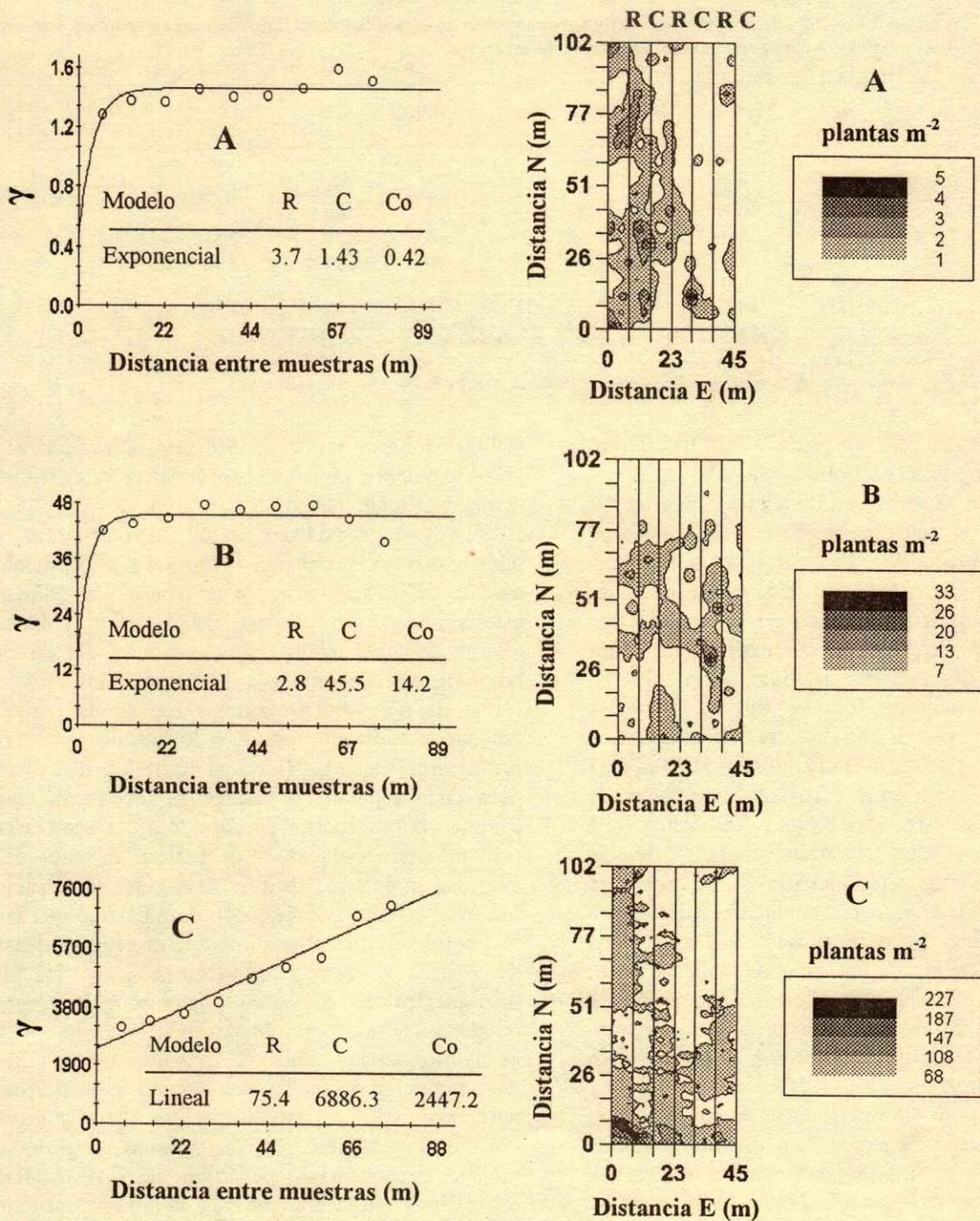


Figura 1. Semivariogramas omnidireccionales con modelos ajustados de la población total de malezas en frijol y distribución espacial de la población total de malezas en frijol con labranza reducida (R) y convencional (C) para antes de la labranza primaria (A), antes de escardas (B) y después de escardas (C); R: intervalo, C: asíntota, Co: intercepto.

la otra como sea posible. Cassel-Sharmasarkar *et al.* (1999) mencionaron que la ausencia de rangos en los modelos lineales es un indicio de que las muestras están correlacionadas sobre cualquier distancia

considerada. Por lo tanto, a pesar del incremento en la distancia espacial entre dos muestras, la relación entre las dos muestras permaneció relativamente constante. En las tres fechas de muestreo, los modelos mostraron

un efecto nugget (y-intercepto) mayor que cero, lo que indica que las observaciones separadas por pequeñas distancias fueron desiguales; esta desigualdad podría haber sido causada por mortalidad de plántulas, germinación, o puede simplemente ser el resultado de error de muestreo (Johnson *et al.*, 1996).

En las tres fechas de muestreo, mapas de la distribución espacial de la maleza estimada por kriging presentan distintos patrones de agregación (Figura 1). El estado inicial de la población estimada de la maleza, la cual se determinó mediante el muestreo que se realizó previamente a las labores de la labranza primaria, manifiestan bandas con densidades de 1.0 maleza/0.76 m<sup>2</sup> con pequeñas aglutinaciones dentro de esas bandas de 2 a 3 malezas/0.76 m<sup>2</sup> en las primeras cuatro parcelas con labranza reducida y convencional (Figura 1a). Este resultado podría atribuirse al efecto producido por el maíz sembrado el ciclo anterior más que por efecto del tipo de labranza. El mapa con la distribución estimada de la maleza previo a las escardas muestra un patrón en agregados (Figura 1b); sin embargo, estos agregados aparentemente no estuvieron relacionados con el tipo de labranza, ya que la maleza tendió a concentrarse en la parte central de la superficie muestreada. Posterior a las escardas, la población total de maleza tendió a distribuirse en bandas en la dirección de los surcos del cultivo (norte-sur) en las parcelas de labranza reducida o labranza convencional donde la densidad de maleza fue baja y relativamente constante (Figura 1c). En contraste, áreas con gran densidad de maleza y considerable variación se determinaron en los márgenes noreste y centro-norte del área de estudio. La causa de los patrones de la distribución de la maleza no pareció estar relacionada simplemente a la dirección de los surcos, sino que es probablemente un resultado de la lluvia de semillas de maleza proveniente de áreas externas a las parcelas, la cual fue dispersada por el agua de riego principalmente. La

distribución de la maleza posterior a las escardas en la dirección norte-sur del margen oriental del área de estudio puede explicarse por la distribución observada por aceitilla, mientras que la distribución mostrada por gordolobo explicarían los agregados localizados en la parte norte-centro.

### Rendimiento de Frijol

Derivado del análisis estadístico descriptivo, el rendimiento medio de grano de frijol fue 4.6% más alto en parcelas con labranza convencional que en parcelas con labranza reducida (Cuadro 2); sin embargo, esta diferencia en rendimiento entre tipos de labranza no fue significativa. El rendimiento mostrado a través de la desviación estándar indicó que la variación de los datos alrededor de la media fue alta debido a la fluctuación en el rendimiento desde 395 hasta alrededor de 4000 kg ha<sup>-1</sup>, pero esta desviación estándar fue similar entre los tipos de labranza. Los coeficientes de variación también fueron similares al comparar las variabilidades en los datos entre tipos de labranza, aunque mayores que los coeficientes reportados por otros investigadores quienes estimaron variabilidades de 10 hasta 28% en respuesta a localidades (Villar, 1989), líneas y variedades (López *et al.*, 1987) y manejo del cultivo (Núñez y Carrizales, 1986).

Valores positivos en los coeficientes de simetría se explican por la media, la cual fue mayor que la mediana (Cuadro 2). Los coeficientes de simetría fueron menores que uno, indicando que la distribución de los datos tendió a ser simétrica, aunque no a la normalidad, ya que la media y la mediana no fueron similares (Rees, 1995). Basado en los valores de índice de normalidad (W) e índice de Morisita, la distribución del rendimiento de grano de frijol no fue normal ni aleatoria, sino en agregados. Gandah *et al.* (2000) obtuvieron resultados similares durante la determinación de la variabilidad espacial del

**Cuadro 2.** Estadísticos e índices de normalidad (W) y agrupamiento del rendimiento de grano de frijol en respuesta a la labranza reducida (LR) y labranza convencional (LC).

Tipo de labranza	W	Media	Mediana	Máx. <sup>†</sup>	Min.	CV <sup>‡</sup>	DS <sup>§</sup>	Coef. de simetría	Índice de Morisita <sup>¶</sup>
		----- kg ha <sup>-1</sup> -----							
Reducida	0.92*	1632.6	1470.4	3967.1	394.7	46.3	755.8	0.8	1.8
Convencional	0.95*	1707.9	1588.8	4026.3	394.7	45.8	781.7	0.5	2.3

<sup>†</sup> Máx. = máximo; Mín. = mínimo; <sup>‡</sup> CV = coeficiente de variación; <sup>§</sup> DS = desviación estándar. <sup>¶</sup> Valores del índice >1 con base en la prueba de  $\chi^2$ .

\* Indica rechazo de la hipótesis nula de que los datos ajustan a una distribución normal a un valor de 1% de significancia.

crecimiento y la agregación del mijo *Pennisetum americanum*.

Con base en el semivariograma empírico, un modelo esférico describió la distribución espacial del rendimiento de grano de frijol (Figura 2). El resultado del modelo esférico indica que las muestras ubicadas dentro de un intervalo de 53 m estuvieron correlacionadas, por lo que la distancia entre muestras deberá ser mayor en futuros muestreos. En el muestreo de rendimiento, el modelo mostró un efecto nugget (y-intercepto) mayor que cero, lo cual implica la existencia de una fluctuación en el rendimiento que ocurre sobre distancias más cortas que el intervalo de muestreo limitando la precisión de la interpolación (Burgess y Webster, 1980).

El mapa de la distribución espacial del rendimiento de grano de frijol, estimado por kriging, muestra distintos patrones de agregación (Figura 2). El rendimiento de frijol reveló un patrón de agregación, tanto en el centro, como en el margen derecho superior, lo cual coincide con una reducida presencia de maleza después de las escardas en esas áreas del terreno. Aparentemente, no existió una relación entre la distribución espacial del rendimiento de grano de frijol y el tipo de labranza, lo cual se demostró por el aglutinamiento del rendimiento en el

centro del mapa que incluyó parcelas manejadas, ya sea con labranza reducida o convencional. El reducido rendimiento ubicado en el margen izquierdo y extremo noreste del área de terreno con frijol podría explicarse por la interferencia producida por la maleza en esa área del terreno. En el extremo noreste, el cultivo de frijol estuvo en competencia con aproximadamente 227 malezas m<sup>-2</sup>, mientras que entre 68 y 107 malezas m<sup>-2</sup> estuvieron compitiendo con las plantas de frijol ubicadas en el margen izquierdo. Por lo tanto, la interferencia por maleza en adición a un ataque por liebres sufrido durante la emergencia de las plántulas de frijol contribuyeron a reducir hasta en 58% el rendimiento en esas áreas de terreno más que por efecto del tipo de labranza. Aunque no hay estudios regionales sobre umbrales económicos de maleza en frijol, es muy posible que las densidades poblacionales de maleza cuantificadas después de las escardas estén dentro de los valores no permisibles que producen daño económico. Por ejemplo, sólo cuatro plantas de cola de zorra por 10 m de hilera fueron suficientes para reducir hasta en 8% el rendimiento de frijol soya (Coble *et al.*, 1981); en cambio, poblaciones umbral de 65 brotes de *Agropyron repens* redujeron en 12% el rendimiento de maíz (Young *et al.*, 1984).

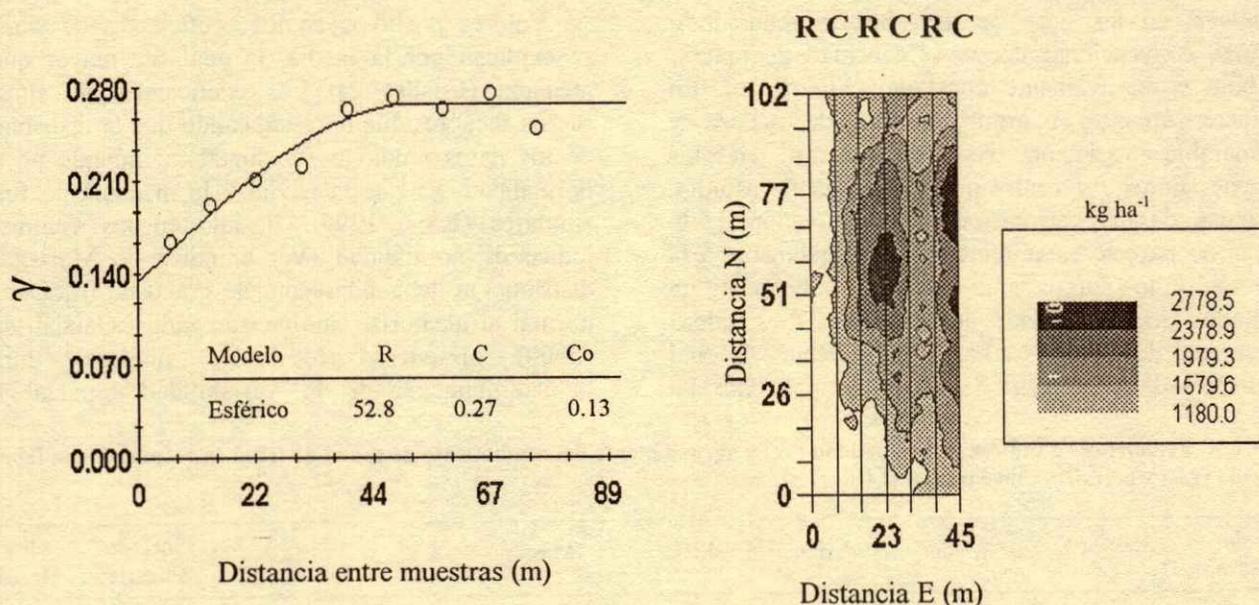


Figura 2. Semivariograma omnidireccional, parámetros usados en kriging y distribución espacial del rendimiento de frijol con labranza reducida (R) y convencional (C) en el 2001; R: rango, C: asíntota, Co: intercepto.

## CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demostraron que el rendimiento de grano de frijol y las poblaciones de maleza constituidas principalmente por especies de hoja ancha, no se distribuyeron en forma aleatoria ni regular en terrenos de frijol, sino que estuvieron espacialmente estructuradas en forma de agregados. Mientras que los rendimientos de grano de frijol en parcelas manejadas con labranza reducida o convencional fueron iguales, la población estimada de maleza en parcelas con labranza convencional fue menor en comparación a la población estimada con labranza reducida. Es un hecho, de que el aumento en la población de maleza causó un incremento de la variabilidad, por lo que sería necesario aumentar el número de cuadrantes mediante la reducción de la distancia entre ellos. Las principales plantas de maleza que contribuyeron en la distribución de agregados en lotes de frijol fueron las aceitillas *Bidens* spp. y gordolobo *Helianthus petiolaris*. La tendencia del rendimiento de frijol a agregarse en el centro y margen derecho superior del terreno coincidió con una reducida presencia de maleza después de las escardas en esas áreas del terreno.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a través del proyecto I35638-B. Asimismo, se agradece a los revisores y el editor de la revista Terra, cuyos comentarios fueron de utilidad para el mejoramiento de este artículo.

## LITERATURA CITADA

- Ball, D.A. 1992. Weed seedbank response to tillage, herbicides, and crop rotation sequence. *Weed Sci.* 40: 654-659.
- Buhler, D.D. 1998. Tillage systems and weed population dynamics and management. pp. 223-246. *In*: Hatfield, J.L., D.D Buhler y B.A. Stewart (eds.). *Integrated weed and soil management*. Ann Arbor Press. Chelsea, MI.
- Burgess, T.M. y R Webster. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. *J. Soil Sci.* 31: 315-331.
- Cardina, J., D.H. Sparrow y E.L. McCoy. 1995. Analysis of spatial distribution of common lambsquarters (*Chenopodium album*) in no-till soybean (*Glycine max*). *Weed Sci.* 43: 258-268.
- Cardina, J., D.H. Sparrow y E.L. McCoy. 1996. Spatial relationships between seedbank and seedling populations of common lambsquarters (*Chenopodium album*) and annual grasses. *Weed Sci.* 44: 298-308.
- Cardina, J., G.A. Johnson y D.H. Sparrow. 1997. The nature and consequence of weed spatial distribution. *Weed Sci.* 45: 364-373.
- Cassel-Sharmasarkar, F., S.H. Sharmasarkar, R. Zhang, G.F. Vance y S.D. Miller. 1999. Micro-spatial variability of soil nitrate following nitrogen fertilization and drip irrigation. *Water, Air, and Pollution* 116: 605-619.
- Coble, H.D., F.M. Williams y R.L. Ritter. 1981. Common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) interference in soybeans (*Glycine max*). *Weed Sci.* 29: 339-342.
- Coronado N., R. y F. de J. Sánchez P. 1993. Discusión de cuatro métodos estadísticos para definir el patrón espacial en poblaciones ecológicas. *Agraria* 9: 87-97.
- Figueroa S., B. y F.J. Morales F. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Colegio de Postgraduados-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Chapingo, México.
- Francis, Ch., A. Jones, K. Crookston, K. Wittler y S. Goodman. 1986. Strip cropping corn and grain legumes: A review. *Am. J. Altern. Agric.* 1: 159-164.
- Gamma Design Software. 1998. GS+ ver.3.1, P.O. Box 201, Plainwell, MI 49080.
- Gandah, M., A. Stein, J. Brouwer y J. Bouma. 2000. Dynamics of spatial variability of millet and yields at three sites in Niger, West Africa and implications for precision agriculture research. *Agric. Syst.* 63: 123-140.
- Halstead, S.J., K.L. Gross y K.A. Renner. 1993. Geostatistical analysis of the weed seed bank. *Weed Science Society of America Absts.* 33: 50.
- Isaaks, E.H. y R.M. Srivastava. 1989. *Applied geostatistics*. Oxford University Press. New York.
- Johnson, G.A. 1994. Model parameterization, parametric sequential sampling, and geostatistical analysis of weed seedling populations. Ph.D. Diss., University of Nebraska. Lincoln, NE.
- Johnson, G.A., D.A. Mortensen y A.R. Martin. 1995. A simulation of herbicide use based on weed spatial distribution. *Weed Res.* 35: 197-205.
- Johnson, G.A., D.A. Mortensen y C.A. Gotway. 1996. Spatial and temporal analysis of weed seedling populations using Geostatistics. *Weed Sci.* 44: 704-710.
- López S., E., K.Y. Okuda y C.M. Cervantes L. 1987. "Negro Veracruz", nueva variedad de frijol para las zonas central y sur del estado de Veracruz. *Fitotecnia* 9: 49-56.
- Medina G., G., J.A. Ruiz C. y R.A. Martínez P. 1998. Los climas de México: Una estratificación ambiental basada en el componente climático. Libro Técnico 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Norte. Guadalajara, Jalisco, México.
- Morishita, M. 1962. Id-index: A measure of dispersion of individuals. *Res. Popul. Ecol.* 4: 1-7.
- Núñez G, S. y N. Carrizales M. 1986. Arreglos topológicos de frijol con maíz en el centro de Chiapas. *Fitotecnia* 8: 126-138.
- Paxton, K.W. y D.R. Lavergne. 1991. An economic analysis of reduced tillage cotton production. *Louisiana Agric.* 34(4): 8-9.
- Pérez T., H. 1998. Guía para cultivar frijol en el estado de Zacatecas. Folleto para Productores 1. Campo Experimental Calera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Calera V.R., Zacatecas, México.

- Pierson, F.B. y J.R. Wight. 1991. Variability of near-surface soil temperature on sagebrush rangeland. *J. Range Manag.* 44: 491-497.
- Popay, A.I. y E.H. Roberts. 1970. Ecology of *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik and *Senecio vulgaris* L. in relation to germination behaviour. *J. Ecol.* 58: 123-139.
- Rees, D.G. 1995. *Essential statistics*. Third Edition. Chapman and Hall. New York.
- SAGARPA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2001. *Estadísticas de Producción de Cultivos Básicos 2001*. Delegación Zacatecas.
- SAS Institute. 1996. *SAS/STAT User's Guide*. Release 6.12. Cary, NC.
- Schweizer, E.E., D.W. Lybecker y L.J. Wiles. 1998. Important biological information needed for bioeconomic weed management models. pp. 1-23. *In*: Hatfield, J.L., D.D Buhler, y B.A. Stewart (eds.). *Integrated weed and soil management*. Ann Arbor Press. Chelsea, MI.
- Solórzano V., E. 1983. Período crítico de competencia entre malezas y frijol de riego en Pabellón, Ags. *Fitotecnia* 5: 75-89.
- Thomas, A.G. y B.L. Frick. 1993. Influence of tillage systems on weed abundance in Southwestern Ontario. *Weed Technol.* 7: 699-705.
- Triplett, G.B., Jr. y D.M. van Doren, Jr. 1977. Agriculture without tillage. *Sci. Am.* 236: 28-33.
- Villar S., B. 1989. Genotipo, fecha de siembra, y reducción del riesgo de sequía en frijol de humedad residual. *Rev. Fitotec. Méx.* 12: 136-146.
- Young, F.L., D.L. Wyse y R.J. Jones. 1984. Quackgrass (*Agropyron repens*) interference on corn (*Zea mays*). *Weed Sci.* 32: 226-234.

# MINERALIZACIÓN DE NITRÓGENO EN EL SUELO Y PRODUCCIÓN DE AVENA FORRAJERA CON TRES SISTEMAS DE LABRANZA

## Nitrogen Mineralization in the Soil and Oat Forage Production under Three Tillage Systems

Enrique Salazar-Sosa<sup>1,†</sup>, Alfredo Beltrán-Morales<sup>1</sup>, Manuel Fortis-Hernández<sup>2</sup>,  
Juan Antonio Leos-Rodríguez<sup>3</sup>, José Antonio Cueto-Wong<sup>4</sup> y Cirilo Vázquez-Vázquez<sup>1</sup>

### RESUMEN

El presente trabajo de investigación es establecido desde 1995, utilizando tres sistemas de labranza: cero, mínima y convencional, con y sin fertilización nitrogenada. El principal objetivo fue el de evaluar la mineralización del nitrógeno orgánico en el suelo y su efecto en la producción de forraje de avena en otoño-invierno en la Comarca Lagunera. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con arreglo en franjas con seis tratamientos y tres repeticiones, tomándose en cuenta para el análisis estadístico factores de suelo como nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), amonio ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) y producción de forraje verde y seco. Los resultados muestran que el contenido de  $\text{NO}_3\text{-N}$  en el suelo fue mayor a menor profundidad, lo cual posiblemente se debió a una alta actividad enzimática, dado que en la parte superficial (0 a 7.5 cm) hay mejores condiciones de temperatura y aeración para que esta actividad se lleve a cabo. La mayor producción de materia verde de avena se generó en las parcelas preparadas con labranza cero con fertilización a razón de  $41 \text{ t ha}^{-1}$  y la menor se obtuvo con labranza mínima sin fertilización con  $16 \text{ t ha}^{-1}$ . Esto posiblemente se debió a que después de cinco años de que se inició el experimento, la acumulación de residuos y la aplicación de fertilizante favorecen la actividad enzimática para una mejor mineralización y absorción del nitrógeno, lo que repercutió en una mayor producción de forraje. Esto explica el porqué la concentración de  $\text{NO}_3\text{-N}$  y  $\text{NH}_4\text{-N}$  en el suelo, en general, fue mayor en los tratamientos de labranza cero con aplicación de nitrógeno.

<sup>1</sup> Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango. Apartado Postal 1-142, 35000 Gómez Palacio, Durango, México.

<sup>†</sup> Autor responsable ([enmageell@yahoo.es](mailto:enmageell@yahoo.es)).

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10-SIGA. 27200 Torreón, Coahuila, México.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, México.

<sup>4</sup> CENID-RASPA-INIFAP. Apartado Postal 41, 35150 Cd. Lerdo, Durango, México.

Recibido: Febrero de 2002. Aceptado: Abril de 2003.

Publicado en Terra 21: 561-567.

*Palabras clave:* Avena sativa L., contaminación, nitratos.

### SUMMARY

In 1995, the present research was established with zero, minimum, and conventional tillage systems, with and without nitrogen fertilization. The results correspond to 1999. The main purpose was evaluating the organic nitrogen mineralization in soil and its effect on the production of oat forage in autumn-winter season in the Comarca Lagunera, located in the north of Mexico. An experimental split block design with six treatments and three replications was used, taking into account the soil factors nitrate ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), ammonium ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) and production of fresh green and dry oat forage for the statistical analysis. The results show that the content of  $\text{NO}_3\text{-N}$  in the soil was higher close to the surface, possibly as a consequence of an enzymatic activity in the surface layer (0-7.5 cm) that participates in N transformation because of better soil physical conditions, such as aeration and temperature. The highest production of oat forage was obtained in the plots prepared with zero tillage with approximately  $41 \text{ t ha}^{-1}$  fertilization, and the smallest production was obtained under minimum tillage without fertilizer, with  $16 \text{ t ha}^{-1}$ .

*Index words:* Avena sativa L., pollution, nitrates.

### INTRODUCCIÓN

La avena es el segundo cultivo forrajero de mayor importancia en la Comarca Lagunera, de los que se siembran en otoño-invierno año con año. Durante los últimos años, se han establecido en promedio más de  $5337 \text{ ha año}^{-1}$  en la región (SAGAR, 1999a). Para aumentar el rendimiento de este cultivo, muchos productores han recurrido a los sistemas de labranza y al uso intensivo de fuentes nitrogenadas de fertilización; sin embargo, el criterio de los agricultores al realizar la labranza y usar fertilizantes

no es controlado, ya que en la mayoría de las ocasiones hacen un uso excesivo de operaciones de preparación del suelo y de aplicación de nitrógeno. Al respecto, Olson y Senjem (1996) definieron a la labranza como la manipulación física del suelo con el fin de lograr las condiciones óptimas de desarrollo para los cultivos. Estos autores señalaron que la labranza convencional es aquella donde los residuos o plantas son incorporados, es decir, deja el suelo desnudo utilizando, por lo general, un paso de arado, un rastreo cruzado, bordeo y nivelación. Por otra parte, la labranza mínima se lleva a cabo reduciendo el número de labores en el terreno. La labranza cero es la eliminación total de las labores de preparación del terreno, utilizando directamente el equipo de siembra sin perturbar el suelo previamente. Sin embargo, Castellanos y Peña-Cabriales (1990) mencionaron que el uso indiscriminado de estas operaciones ha provocado que en algunas ocasiones el agua subterránea se contamine con nitratos, los cuales pueden ser lixiviados a través del suelo y penetrar en los mantos freáticos y aguas subterráneas.

En relación con la fertilización en sistemas de labranza mínima, Johnson (1995) señaló que ésta puede ser complicada por dos factores: la nula incorporación del fertilizante por la acción de la labranza y la acumulación de materia orgánica y residuos de cosecha sobre la superficie del suelo, es decir, se requiere de un manejo más adecuado de la fertilización en la labranza mínima que en la labranza convencional.

Los residuos de cosecha sobre la superficie del suelo pueden incrementar la infiltración, reducir la evaporación e incrementar la temperatura del suelo superficial; sin embargo, también pueden incrementar la velocidad de la pérdida de nitrógeno en el suelo, lo que representa una disminución en el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Sin embargo, existe un limitado conocimiento acerca de los efectos de los sistemas de labranza y las propiedades físicas del suelo en el ciclo del nitrógeno y su disponibilidad en zonas áridas (Rice *et al.*, 1996). Por otra parte, Eck y Jones (1992) realizaron estudios de labranza en un suelo de Clovis, Nuevo México (EE.UU) y determinaron que la labranza afectó de manera significativa a la acumulación de nitrógeno en los residuos de trigo y encontraron que la acumulación de  $\text{NO}_3\text{-N}$  en profundidades de 1 cm en labranza mínima fue de  $37 \text{ mg kg}^{-1}$  y de  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  en labranza cero.

Linn y Doran (1984) encontraron que el nitrógeno retenido con el sistema de cero labranza puede ser

utilizado por la cosecha posterior o potencialmente lixiviar durante un período de barbecho y determinaron que la nitrificación más alta es en los primeros 5 cm con labranza mínima, comparados con labranza convencional, pero lo inverso ocurrió a bajas profundidades; la cantidad total de nitrificación después de 21 cm no fue estadísticamente significativa entre tratamientos.

O'Leary *et al.* (1997) mencionaron que la mineralización del nitrógeno orgánico en el suelo juega un papel muy importante en el ciclo total del nitrógeno, ya que convierte el amoníaco a la forma de nitrato, el cual es un ion más fácilmente asimilado por las plantas. El amoníaco se produce de forma natural en la mineralización de la materia orgánica del suelo o se aplica directamente como fertilizante químico, el cual, si no es manejado adecuadamente, puede causar problemas de contaminación de agua por nitratos, lo que podría originar una posible contaminación con este ion.

Al respecto, en 1989 se tomaron muestras de agua en 187 norias o pozos en operación distribuidos en la Comarca Lagunera; en estas muestras se analizó la concentración de nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) y se encontraron concentraciones de  $37 \text{ mg L}^{-1}$ . Cabe señalar que la Norma Oficial Mexicana permite una concentración en agua para consumo humano de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  (SEMARNAP, 1996). La vía más probable de contaminación es el uso de fertilizantes nitrogenados en las tierras de cultivo o de desechos orgánicos de origen animal; estos últimos en exceso, ya que en esta región se localiza una de las cuencas lecheras más importantes de México y, por lo tanto, en esta región se genera un mayor desecho de estiércol, ya que, de acuerdo con datos de la SAGAR (1999b), hay más de 750 000 cabezas de ganado bovino en existencia.

Ante esta problemática, en esta investigación se propone determinar la mineralización del nitrógeno en el suelo, así como la mejor alternativa de preparación del suelo en la producción de avena forrajera. Se plantea como meta, disminuir al máximo el uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados, así como evitar en lo posible la contaminación del acuífero por la lixiviación de nitratos en la Comarca Lagunera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se llevó a cabo en el campo experimental de la Facultad de Agricultura y

Zootecnia (FAZ-UJED), ubicada en el ejido Venecia, Durango (24°05' N, 107°40' O), a una altitud de 1120 m. El clima, según García (1973), es árido con temperatura media anual de 21 °C y un promedio de precipitación pluvial anual de 240 mm. Sin embargo, en esta región, durante la estación de primavera y verano, la temperatura llega hasta 45 °C. Los suelos se clasifican como Xerosoles, con texturas arcillo-arenosas y arcillosa, tienen un pH de 7.2 a 8.8.

En el ciclo agrícola otoño-invierno 1999-2000, se estableció el experimento, considerando a los sistemas de labranza (A) y dosis de fertilización (B) como los factores analizados, los niveles de cada uno de estos fueron: A1, (LC) labranza convencional (aradura, rastreo, nivelación y bordeo); A2, (LM) labranza mínima (rastreo en seco y rastreo en húmedo); y A3, (LC) labranza cero. En cuanto al factor fertilización, se consideraron: B1, (SF) sin fertilización y B2, (CF) dosis recomendada (100-60-0). Los tratamientos fueron seis, que resultaron de las distintas combinaciones de los dos factores, es decir, (A1B1) labranza convencional sin fertilización, (A1B2) labranza convencional con dosis recomendada, (A2B1) labranza mínima sin fertilización, (A2B2) labranza mínima con dosis recomendada, (A3B1) labranza cero sin fertilización, (A3B2) labranza cero con dosis recomendada. Se usó un diseño experimental de bloques al azar con arreglo en franjas (Lenter y Bishop, 1986) y tres repeticiones; el tamaño de la parcela de cada tratamiento fue de 20 m de largo y de 10 m de ancho, con un total de 3600 m<sup>2</sup>.

Se tomaron muestras de suelo a profundidades de 0 a 7.5, de 7.5 a 15 y de 15 a 30 cm en toda la unidad experimental; se determinó la textura del suelo mediante la técnica del hidrómetro de Bouyoucos, y se estableció la proporción en porcentaje de arena, limo y arcilla en todos los tratamientos. La humedad del suelo se determinó por el método gravimétrico y la temperatura del suelo con un termómetro de varilla marca Tel-Tru (Planecassagne *et al.*, 1997).

Para el análisis químico del suelo se realizaron tres muestreos: a la siembra, a mediados del ciclo y a la cosecha. Las muestras se obtuvieron de cada parcela experimental, haciendo un total de 54 por cada muestreo, a las profundidades mencionadas. Para la determinación de amonio se utilizó la técnica de determinación por destilación rápida y titulación (Planecassagne *et al.*, 1997). Para nitratos se utilizó la técnica de determinación por medio del ácido fenoldisulfónico (Etchevers, 1985) y para nitrógeno

total se empleó la técnica de digestión Kjeldahl y digestión rápida (Planecassagne *et al.*, 1997).

Durante el transcurso del experimento se midieron las siguientes variables de respuesta: humedad del suelo, temperatura, nitratos (NO<sub>3</sub>-N), amonio (NH<sub>4</sub>-N), nitrógeno total del suelo, materia verde y materia seca de planta. Cabe señalar que se cosecharon las plantas de la parcela útil de 2 m<sup>2</sup> de cada uno de los tratamientos.

El terreno se preparó conforme a los tratamientos en estudio, se aplicaron cinco riegos; la siembra, variedad Cuahutemoc, fertilización, y demás labores culturales se realizaron de acuerdo con el paquete tecnológico recomendado por la SAGAR (1999b).

Para el análisis estadístico se usó el paquete del Statistical Analysis System, Versión 4.0 (SAS Institute, 1996). En los casos donde se encontró diferencia estadística se estableció una prueba de medias (DMS) para jerarquizar los tratamientos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación con los resultados del rendimiento de avena forrajera, se encontró diferencia estadística significativa en las parcelas fertilizadas con la dosis recomendada ( $P \leq 0.01$ ), obteniéndose un promedio de rendimiento de 35 t ha<sup>-1</sup> en las parcelas con aplicación de fertilizante químico y de 19 t ha<sup>-1</sup> en las parcelas sin fertilizar. En el caso del rendimiento de materia seca, el promedio de los datos indica que las parcelas fertilizadas ( $P \leq 0.05$ ), sin importar el sistema de labranza utilizado, obtuvieron un rendimiento de 18 t ha<sup>-1</sup> en comparación con los tratamientos sin fertilizar que fue de 11 t ha<sup>-1</sup>, destacando la labranza cero con 41 y 19 t ha<sup>-1</sup> con y sin fertilizante químico aplicados, respectivamente.

Con relación a la utilización de los sistemas de labranza, se obtuvo un efecto significativo sobre la producción de forraje verde de avena ( $P \leq 0.05$ ), siendo el mejor sistema la aplicación de labranza cero con fertilizante con un promedio de rendimiento de 41 t ha<sup>-1</sup>. En relación con la materia seca, los sistemas de labranza tuvieron un efecto estadístico significativo ( $P \leq 0.05$ ) sobre la producción de forraje; en este aspecto, el sistema de labranza cero con la aplicación de la dosis recomendada de fertilización promedio 19 t ha<sup>-1</sup> y el menor rendimiento fue de 8 t ha<sup>-1</sup> en el sistema de labranza mínima sin fertilizar (Cuadro 1).

En relación con la concentración de NO<sub>3</sub>-N en el suelo, producto de los resultados para tres fechas de

**Cuadro 1. Efecto de la aplicación de fertilizante y labranza en la producción de avena.**

Tratamiento <sup>†</sup>	Promedio de rendimiento	
	Peso fresco	Peso seco
	----- t ha <sup>-1</sup> -----	
Labranza conservación SF	17.3	12.0
Labranza conservación CF	33.6	18.0
Labranza mínima SF	16.4	8.0
Labranza mínima CF	29.6	19.0
Labranza cero SF	24.3	15.0
Labranza cero CF	41.3	19.0

<sup>†</sup> SF = sin fertilización; CF = con fertilización.

muestreo durante el ciclo vegetativo de la avena y a tres profundidades, indican que en la muestra de suelo obtenida a la siembra, se encontró diferencia estadística significativa ( $P \leq 0.05$ ) en la interacción de los factores fertilización y profundidad, los valores de los promedios obtenidos se muestran en el Cuadro 2.

En el Cuadro 2, se observa que los promedios más elevados de  $\text{NO}_3\text{-N}$  se encuentran en las parcelas fertilizadas, donde se muestra la diferencia entre las medias obtenidas en las parcelas que no recibieron el fertilizante. El mayor promedio de nitratos se encontró en las profundidades menores del suelo, destacando la profundidad de 0 a 7.5 cm. Estos resultados pueden deberse a una mayor actividad enzimática, la cual se refleja en una mayor nitrificación (Whitehead 1995; Salazar *et al.*, 1998a).

Lo anterior se debe a que los microorganismos que intervienen en la mineralización del nitrógeno, necesitan energía, la cual toman del fertilizante químico aplicado. Esto concuerda con lo encontrado por López *et al.* (1996), quienes afirmaron que las bacterias nitrificantes pueden utilizar sales inorgánicas como fuente de energía. En relación con las fechas de muestreo, sólo se encontró diferencia significativa en la primera fecha ( $P \leq 0.05$ ); sin embargo, con las dos fechas posteriores no hubo diferencia significativa, esto posiblemente se deba a que las temperaturas del suelo fueron bajas ( $10^\circ\text{C}$ ), lo que disminuyó la actividad microbiana del suelo. Otro factor que posiblemente contribuyó fue que después de que se sembró el cultivo, éste absorbió N lo cual repercutió en un decremento del N inorgánico disponible en el suelo. En 1993, se encontraron resultados similares en un experimento con labranza cero y mínima (mulche) con y sin aplicación de fertilizante. En ese experimento se cuantificó la absorción de N en trigo, determinándose que la planta absorbe entre 35 y 40%

**Cuadro 2. Efecto de la profundidad sobre el contenido de nitratos en el suelo.**

Fertilización <sup>†</sup>	Profundidad (cm)			Promedio
	0 a 7.5	7.5 a 15	15 a 20	
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----			
CF	32.10	10.50	11.66	18.08 a
SF	8.03	5.20	5.03	6.08 b
Promedio	20.06 a	7.85 b	8.34 b	12.08

<sup>†</sup> CF = con fertilizante, SF = sin fertilizar.

Medias en la misma hilera y/o columna con distinta letra son diferentes ( $P < 0.01$ ).

de N aplicado al suelo en forma de fertilizante (Salazar *et al.*, 2002).

Con respecto a la utilización de los diferentes sistemas de labranza en el contenido de nitratos no fue estadísticamente diferente en ninguno de los sistemas utilizados. En la Figura 1, puede apreciarse que en la labranza mínima con aplicación de fertilizante (LMCF) se encuentra la mayor cantidad de nitratos. Esta tendencia puede deberse a que en este sistema de labranza la temperatura del suelo fue mayor, como lo mencionó Meek *et al.* (1994).

Los datos obtenidos en relación con la concentración de  $\text{NH}_4\text{-N}$  en el suelo, muestreados en las mismas fechas que en los nitratos y realizadas en una muestra compuesta, indican que en las muestras tomadas en las parcelas fertilizadas se encontró el mayor contenido de nitrógeno en forma de  $\text{NH}_4\text{-N}$ , (Figura 2). Puede observarse que el porcentaje más elevado del contenido de  $\text{NH}_4\text{-N}$  fue de 0 a 7.5 cm, esto posiblemente se debe a que la actividad enzimática es más alta a esta profundidad dado que condiciones como aeración y temperatura son más altas a nivel superficial lo que favorece lo anterior. Resultados similares se encontraron en un experimento de labranza de mulche y cero en Clovis, Nuevo Mexico, en 1983, donde la mineralización del N orgánico en el suelo es mayor en labranza mínima (mulche) y cero a una profundidad de 0 a 7.5 cm, dado que las condiciones de aeración y temperatura ( $25$  a  $35^\circ\text{C}$ ) son más adecuadas para que esta transformación del N se lleve a cabo (Salazar *et al.*, 1998a,b).

La mayor concentración de amonio se encontró en el sistema de labranza convencional, debido posiblemente a que este tipo de labranza y las condiciones ambientales del suelo sean las propicias para que las bacterias encargadas de la mineralización del nitrógeno lleven a cabo su actividad metabólica.

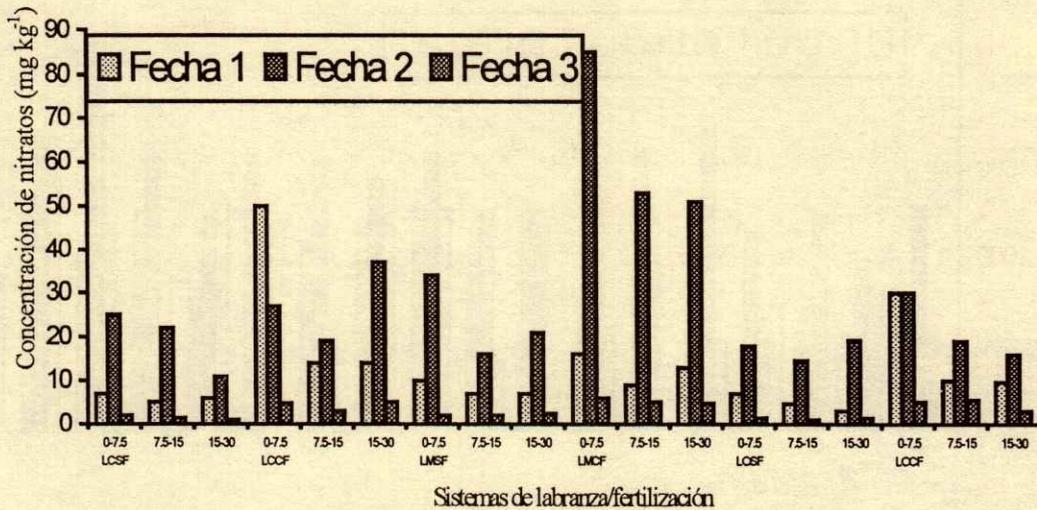


Figura 1. Concentración de nitratos ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo, con y sin aplicación de fertilizantes en el cultivo de avena con tres sistemas de labranza

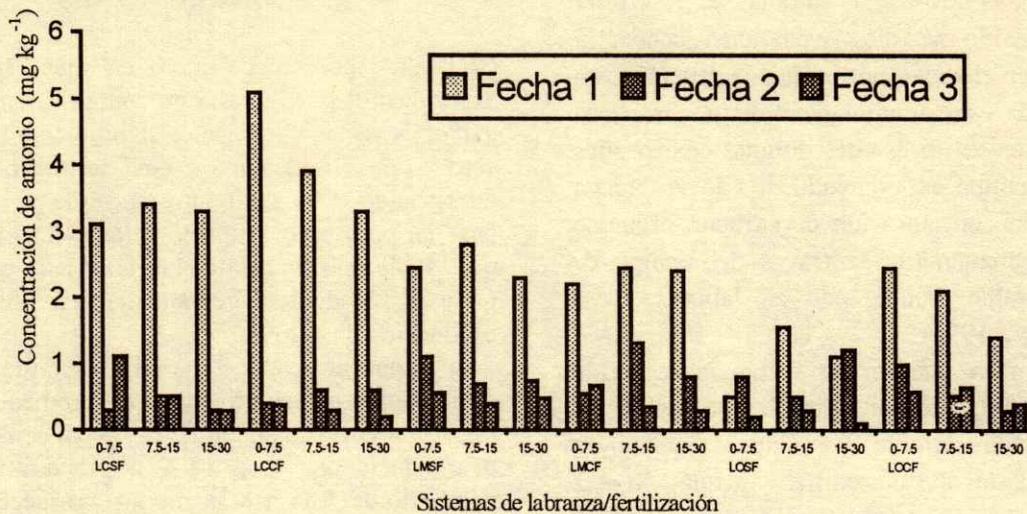


Figura 2. Concentración de amonio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo, con y sin aplicación de fertilizantes en el cultivo de avena con tres sistemas de labranza.

Finalmente, la mayor concentración de nitrógeno total en el suelo se encontró en las muestras obtenidas de las parcelas fertilizadas, como se aprecia en la Figura 3. La mayor concentración de nitrógeno total se halló en el sistema de labranza cero; los porcentajes más elevados se encontraron en la segunda fecha de muestreo, siguiendo una tendencia proporcional de incremento en los sistemas de labranza convencional, labranza mínima y labranza cero, respectivamente.

Información similar describieron Karlen y Colvin (1992), quienes trabajaron en un experimento con labranza convencional y labranza cero. En la Figura 3, se aprecia que conforme se incrementa la profundidad del suelo, el contenido de nitrógeno total aumenta ligeramente, sin importar el sistema de labranza utilizada, lo cual indica que la acumulación del residuo en el suelo después de cinco años de iniciado el estudio ya repercutió en un incremento del N total y

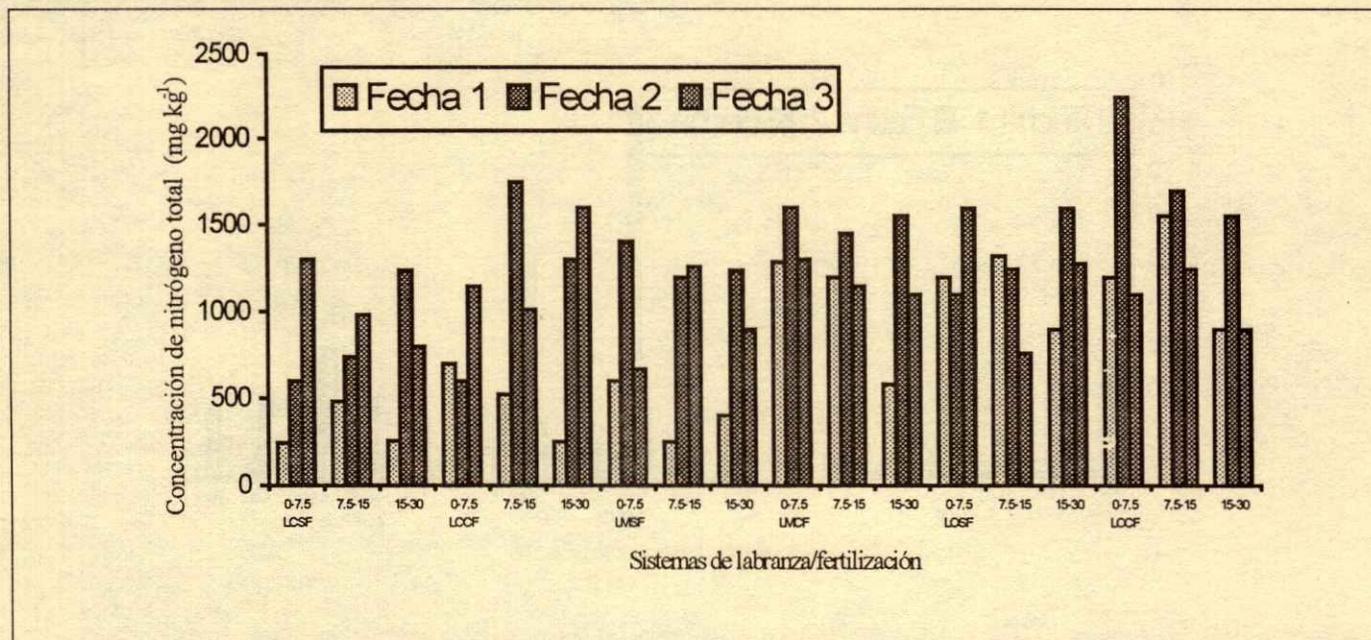


Figura 3. Concentración de nitrógeno total ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo, con y sin aplicación de fertilizantes en el cultivo de avena con tres sistemas de labranza.

más aun en parcelas fertilizadas en donde el desarrollo y del cultivo han sido más altos y, en consecuencia, la cantidad dejada en el suelo, por lo que se deberá en un futuro cuantificar esta acumulación. Esto concuerda con lo encontrado en un estudio durante cuatro años realizado en el campo experimental de Clovis, Nuevo México, donde la concentración de carbono orgánico y N total se incrementaron a través del tiempo de manera considerable, sobre todo en labranza cero (Christensen *et al.*, 1994).

Con base en lo anterior se recomienda que la aplicación de fertilizantes nitrogenados se realice de manera escalonada durante las etapas fenológicas principales del desarrollo del cultivo, ya que con esta investigación se ha demostrado, a lo largo de cinco años de trabajo, que el uso de la dosis recomendada de fertilizante es la mejor alternativa en la producción de avena forrajera y, a pesar de que no se encontró diferencia estadística significativa con los sistemas de labranza, la labranza cero puede ser una alternativa viable para la producción de este forraje. Esto implica hacer un seguimiento de la concentración de nitratos a mayor profundidad del suelo, así como en el acuífero de esta región para determinar la conveniencia o no de estos sistemas productivos.

## CONCLUSIONES

- Después de cinco años en que se inició el experimento, la respuesta en cuanto a rendimiento fue mayor y estadísticamente significativa en labranza cero con aplicación de fertilizante químico nitrogenado. Con  $41 \text{ t ha}^{-1}$  en verde y  $19 \text{ t ha}^{-1}$  con base en peso seco, respecto a los demás tratamientos; por lo que este sistema de labranza cero es una opción para el productor, reduciendo así los costos de producción de cultivo.

- La concentración de  $\text{NO}_3^- \text{N}$  fue mayor y estadísticamente significativa en promedio con  $20.06 \text{ mg kg}^{-1}$  a la profundidad de 0-7.5 cm con respecto a la profundidad de 7.5 a 15 y de 15 a 20 cm con un promedio de  $7.85$  y  $8.34 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. Se refleja así una mayor actividad enzimática en la parte superior (0 a 7.5 cm) del perfil del suelo.

- Los resultados respecto a la concentración de  $\text{NH}_4 \text{N}$  fueron muy similares a los de  $\text{NO}_3^- \text{N}$ ; esto indica que la actividad enzimática, la cual induce a una mineralización, fue continua a través del ciclo. Aunque en los tres sistemas de labranza en la primera fecha, lo antes mencionado no ocurrió, debido posiblemente a una nitrificación, lo cual permitió la transformación del  $\text{NH}_4$  a  $\text{NO}_3$ .

- Por último y como se esperaba después de cuatro años, la concentración de nitrógeno total se

incrementó y fue mayor, en general, en labranza cero y labranza mínima, respectivamente.

### LITERATURA CITADA

- Castellanos, J.Z. y J.J. Peña-Cabriales. 1990. Los nitratos provenientes de la agricultura: Una fuente de contaminación de los acuíferos. *Terra* 8: 113-126.
- Christensen, N.B., W.C. Lindeman, E. Salazar-Sosa y R.L. Gil. 1994. Nitrogen and carbon dynamics in no-tillage and stubble mulch tillage system. *Agron. J.* 86: 298-303.
- Eck, H.V. y O.R. Jones. 1992. Soil nitrogen status as affected by tillage, crops, and crops sequence. *Agron. J.* 84: 660-668.
- Etchevers, J.D. 1985. Determinación de nitrógeno en suelos. Serie Cuadernos de Edafología 4. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Johnson, J. 1995. Best management practices: Managing fertility in no-till. Ohio State University. Columbus, OH.
- Karlen, D.L. y T.S. Colvin. 1992. Alternative farming system effects on profile nitrogen concentration on two Iowa farms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1249-1256.
- Lenter, M. y T. Bishop, 1986. Experimental design and analysis. Valley Book Company. Madison, Wisconsin.
- Linn, D.M. y J.W. Doran. 1984. Aerobics and anaerobics microbes populations in no-tillage and plowed soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 794-799.
- López, B.L., M. Fuentes, J.E. Castillo, F.J. López y E.J. Fernández. 1996. Long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agron. J.* 88: 783-791.
- Meek, B.D., D.L. Carter, D.T. Westermann y R.E. Peckenpaugh. 1994. Root-zone mineral nitrogen changes as affected by crop sequence and tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1464-1469.
- Olson, K. y N. Senjem. 1996. Economics comparison of incremental changes in tillage systems in the Minnesota river basin. University of Minnesota. Crookston, MN.
- O'Leary, M., G. REM y M. Schmitt. 1997. Understanding nitrogen in soils. University of Minnesota. Crookston, MN.
- Plenecassagne, A., F.E. Romero y B.C. López. 1997. Manual de laboratorio. Análisis de suelos, aguas, plantas. CENID-RASPA-INIFAP. Gómez Palacio, Durango, México.
- Rice, C.W., L. Smith y R.L. Blevins, 1996. Soil nitrogen availability after long-term continuous no tillage and conventional tillage corn production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 996-1000.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1999a. Anuario estadístico de la producción agropecuaria y forestal. Delegación en la Comarca Lagunera. Lerdo, Durango, México.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1999b. Paquetes tecnológicos y costos de producción de los principales cultivos de la Comarca Lagunera. Lerdo, Durango, México.
- Salazar-Sosa, E., J.A. Leos-Rodríguez, M. Fortis-Hernández y C. Vázquez-Vázquez. 2002. Nitrogen recovery and uptake by wheat and sorghum in stubble mulch and no-tillage systems. *Agrociencia* 36: 433-440.
- Salazar-Sosa, E., W.C. Lindemann, E. Cárdenas y N.B. Christensen. 1998a. Mineralización y distribución del nitrógeno a través de la zona radicular en dos sistemas de labranza bajo condiciones de campo. *Terra* 16: 163-172.
- Salazar-Sosa, E., W.C. Lindemann, G. Smith y E. Cárdenas. 1998b. Comparación entre la mineralización y la denitrificación potencial en dos sistemas de labranza bajo condiciones de laboratorio. *Terra* 16: 173-180.
- SAS Institute Inc. 1996. SAS for windows. Release 6.12. Version 4.0. Cary, NC.
- SEMARNAP. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-055-FITO. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de octubre de 1995. México, D.F.
- Whitehead, D.C. 1995. Grassland nitrogen. CAB-International. London, United Kingdom.

# MINERALIZACIÓN DE NITRÓGENO EN EL SUELO Y PRODUCCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO CON TRES SISTEMAS DE LABRANZA

## Nitrogen Mineralization in the Soil and Corn Forage Production under Three Tillage Systems

Enrique Salazar-Sosa<sup>1†</sup>, Alfredo Beltrán-Morales<sup>1</sup>, Manuel Fortis-Hernández<sup>2</sup>,  
Juan Antonio Leos-Rodríguez<sup>3</sup>, José Antonio Cueto-Wong<sup>4</sup>, Cirilo Vázquez-Vázquez<sup>1</sup> y  
Juan José Peña-Cabriales<sup>5</sup>

### RESUMEN

Se evaluó la mineralización del nitrógeno en forma de nitratos con tres sistemas de labranza: cero, mínima y convencional en parcelas fertilizadas y sin fertilizar en la producción de maíz forrajero en la Comarca Lagunera, ubicada al norte de México. Los resultados del presente estudio corresponden al año de 1999 y muestran los resultados del quinto año de experimentación con los mismos tratamientos de labranza y fertilización con nitrógeno. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con arreglo en franjas con seis tratamientos y tres repeticiones, tomándose en cuenta para el análisis estadístico factores de humedad, temperatura y profundidad del suelo, nitratos y producción de forraje. Los resultados muestran que el contenido de los nitratos en el suelo fue más alto de 0 a 7.5 cm de profundidad (31.7 mg kg<sup>-1</sup> en promedio) que de 7.5 a 15 y de 15 a 30 cm (con 11.5 y 9.2 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente). Se asume que esto se debió a que los microorganismos que participan en su transformación son aerobios obligados. La temperatura es más nítida en la superficie del suelo, lo que indica que las bacterias encargadas de la transformación del nitrógeno a nitratos son mesófilas. En consecuencia, la mayor cantidad de NO<sub>3</sub>-N se presentó en la parte más somera del suelo en las parcelas con aplicación de fertilizante, durante el muestreo intermedio del ciclo del cultivo,

en los sistemas de labranza mínima y labranza convencional. La mayor producción de forraje se obtuvo en las parcelas preparadas con labranza convencional con un promedio de 33 t ha<sup>-1</sup> y la menor se generó con labranza cero sin fertilización con 17 t ha<sup>-1</sup>.

*Palabras clave:* Zea mays L. Transformación, contaminación, nitratos.

### SUMMARY

In the present study, mineralization of nitrogen in the form of nitrates under zero, minimum and conventional tillage systems was evaluated in fertilized and non-fertilized plots in the production of corn forage in the Lagunera Region, located in northern Mexico. The results of the present study correspond to the year 1999 and they show the data of the fifth year of experimentation under the same farming process and nitrogen fertilization. An experimental split block design with six treatments and three replications was used, taking into account humidity, temperature, soil depth, nitrate, and forage production factors for the statistical analysis. The results show that the content of nitrate in the soil was higher at a depth of 0-7.5 cm (31.7 mg kg<sup>-1</sup>, on average) than at a depth of 7.5-15 and 15-30 cm (11.5 and 9.2 mg kg<sup>-1</sup>, respectively). It is assumed that this is because the microorganisms that participate in its transformation are obligated aerobic. Temperature is proportionally inverse to soil depth which indicates that the bacteria in charge of transforming N into nitrate are mesophyllic. Consequently, the highest quantity of NO<sub>3</sub>-N was present in the split plots with fertilizer application but very close to the soil surface, during the intermediate sampling of the crop, in minimum and conventional tillage systems. The highest production of corn forage was obtained in the plots prepared under conventional tillage with approximately 33 t ha<sup>-1</sup>, and

<sup>1</sup> Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango. Apartado Postal 1-142, 35000 Gómez Palacio, Durango, México.

<sup>†</sup> Autor responsable (enmageel@yahoo.es).

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10-SIGA. 27200 Torreón, Coahuila, México.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

<sup>4</sup> CENID-RASPA-INIFAP. Apartado postal 41, 35150, Ciudad Lerdo, Durango, México.

<sup>5</sup> CINVESTAV-Instituto Politécnico Nacional, Unidad Irapuato. 36500 Irapuato, Guanajuato, México.

the smallest was obtained under no-tillage system without fertilizer with 17 t ha<sup>-1</sup>.

*Index words:* *Zea mays L.*, *transformation*, *pollution*, *nitrites*.

## INTRODUCCIÓN

La producción de maíz forrajero es una de las actividades agrícolas más importantes en la Comarca Lagunera, ya que es la segunda fuente de forrajes que abastecen a la creciente demanda de la principal cuenca lechera de México. De los cultivos que se siembran en primavera-verano y verano-otoño, durante los últimos años, se han establecido en promedio más de 15 233 ha año<sup>-1</sup> de este cultivo forrajero en la Comarca Lagunera (SAGAR, 1999a). Sin embargo, la decisión de los agricultores al realizar las prácticas de labranza y usar fertilizantes no es uniforme, ya que en la mayoría de las ocasiones hacen un uso excesivo de operaciones de preparación del suelo y de aplicación de fertilizantes. La labranza es la manipulación física del suelo con el fin de lograr las condiciones óptimas de desarrollo para los cultivos. La labranza convencional es aquella donde los residuos o plantas son incorporados, es decir, deja el suelo desnudo utilizando, por lo general, un paso de arado, un rastreo cruzado, bordeo y nivelación. La labranza mínima se lleva a cabo reduciendo el número de labores en el terreno (Olson y Senjem, 1996). La labranza cero es la eliminación total de las labores de preparación del terreno, utilizando directamente el equipo de siembra sin perturbar el suelo; el uso indiscriminado de estas operaciones ha provocado que, en algunas ocasiones, el agua subterránea se contamine con nitratos, los cuales pueden lixiviar a través del suelo y penetrar en los mantos freáticos y aguas subterráneas (Castellanos y Peña-Cabriales (1990).

La fertilización en sistemas de labranza mínima puede ser complicada por dos factores: la nula incorporación del fertilizante y la acumulación de materia orgánica y residuos de cosecha sobre la superficie del suelo, es decir, se requiere de un manejo más adecuado de la fertilización en la labranza mínima que en labranza convencional (Johnson, 1995).

Los residuos de cosecha dejados sobre la superficie del suelo pueden incrementar la infiltración, reducir la evaporación e incrementar la temperatura del suelo superficial. Pero estos factores pueden incrementar la velocidad de la pérdida de nitrógeno en

el suelo, lo que representa una disminución en el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, existe un limitado conocimiento acerca de los efectos de los sistemas de labranza y las propiedades físicas del suelo en el ciclo del nitrógeno y su disponibilidad en zonas áridas (Rice y Bevlins, 1996). Eck y Jones (1992) realizaron estudios de labranza en un suelo de Clovis, Nuevo México (EE.UU) y determinaron que la labranza afectó de manera significativa a la acumulación de nitrógeno en los residuos de trigo, y sus resultados indicaron que la acumulación de NO<sub>3</sub>-N en profundidades de 1 cm en labranza mínima con cubierta de rastrojo fue de 37 mg kg<sup>-1</sup> y en labranza cero de 20 mg kg<sup>-1</sup>.

Linn y Doran (1984) determinaron que el nitrógeno retenido con el sistema de cero labranza puede ser utilizado por la cosecha posterior o potencialmente lixiviar durante un periodo de barbecho. Estos autores concluyeron también que la nitrificación más alta ocurre en los primeros 5 cm con labranza mínima, comparados con labranza convencional. Lo inverso ocurrió a bajas profundidades; la cantidad total de nitrificación después de 21 cm no fue estadísticamente significativa entre tratamientos.

La mineralización del nitrógeno juega un papel importante en el ciclo del nitrógeno, ya que convierte el amoníaco a su forma más oxidada de nitrato, que es un ion más fácilmente asimilado por las plantas. El amoníaco se produce naturalmente en la mineralización de la materia orgánica nitrogenada del suelo o se aplica directamente como fertilizante químico, el cual, si no es manejado de forma adecuada, puede causar problemas de contaminación de agua por nitratos, lo que finalmente afecta la calidad del agua (O'Leary *et al.*, 1997).

Al respecto, en 1989 se tomaron muestras de agua en 187 norias o pozos en operación distribuidos en la Comarca Lagunera. En estas muestras se analizó la concentración de nitratos (NO<sub>3</sub>-N) y se encontraron concentraciones de 37 mg L<sup>-1</sup>. Cabe señalar que la concentración permitida para agua de beber es de 10 mg L<sup>-1</sup> según la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAP, 1996). La vía más probable de contaminación es el uso de fertilizantes nitrogenados en las tierras de cultivo o de desechos orgánicos de origen animal; estos últimos en exceso, ya que en esta región se encuentra la cuenca lechera más importante de México (más de 750 000 cabezas de ganado bovino) y, por lo tanto, donde se genera un mayor desecho de estiércol.

Ante esta problemática, en la presente investigación se propone determinar la mineralización del nitrógeno en el suelo, así como la mejor alternativa de preparación del suelo en la producción de maíz forrajero, y se plantea como meta disminuir el uso de fertilizantes químicos para minimizar la contaminación del acuífero por nitratos en la Comarca Lagunera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en el campo experimental de la Facultad de Agricultura y Zootecnia (FAZ-UJED), ubicada en el ejido Venecia, Durango (24°05' N, 107°40' O), a una altitud de 1120 m, con clima árido con temperatura media anual de 21 °C y precipitación pluvial promedio anual de 240 mm (García 1973). Sin embargo, en la región durante la estación de primavera y verano, la temperatura llega hasta 45 °C.

Los sistemas de labranza (A) y dosis de fertilización (B) fueron los factores estudiados en este trabajo. Los niveles de cada uno de los factores en estudio son: (A1) labranza convencional (aradura, rastreo, nivelación y bordeo); (A2) labranza mínima (rastreo en seco y rastreo en húmedo); y (A3) labranza cero. En cuanto al factor fertilización se consideraron: (B1) sin fertilización y (B2) dosis recomendada (120-80-0). Los tratamientos fueron seis, que resultaron de las distintas combinaciones de los dos factores, es decir, (A1B1) labranza convencional sin fertilización, (A1B2) labranza convencional con dosis recomendada, (A2B1) labranza mínima sin fertilización, (A2B2) labranza mínima con dosis recomendada, (A3B1) labranza cero sin fertilización, y (A3B2) labranza cero con dosis recomendada. Se usó un diseño experimental de bloques al azar con arreglo en franjas y tres repeticiones, donde el tamaño de la parcela de cada tratamiento fue de 20 m de largo y de 10 m de ancho, con un total de 3600 m<sup>2</sup>.

Se tomaron muestras de suelo a profundidades de 0 a 7.5, de 7.5 a 15 y de 15 a 30 cm en toda la unidad experimental, se determinó la textura del suelo mediante la técnica del hidrómetro de Bouyoucos y se estableció la proporción de arena, limo y arcilla (en porcentaje) en todos los tratamientos. La humedad del suelo se determinó por el método gravimétrico y la temperatura del suelo con un termómetro de varilla Tel-Tru, Modelo 6-200 A.

Para el análisis químico del suelo se realizaron tres muestreos: a la siembra, a mediados del ciclo y a

la cosecha. Las muestras se obtuvieron de cada parcela experimental, haciendo un total de 54 por cada muestreo, a las profundidades mencionadas con anterioridad. Se determinaron el nitrógeno orgánico e inorgánico en el suelo. Para el amonio se utilizó la técnica de determinación por destilación rápida y titulación (Planecassagne *et al.*, 1997). Para nitratos, se usó la técnica de determinación por medio del ácido fenoldisulfónico (Etchevers, 1985) y para N total, la técnica de mineralización kjeldahl y digestión rápida.

Durante el transcurso del experimento, se midieron las siguientes variables de respuesta: humedad del suelo, temperatura, nitratos (NO<sub>3</sub>-N), amonio (NH<sub>4</sub>-N), N total, materia verde y materia seca. Cabe señalar que se cosecharon las plantas en la parcela útil de 3 m lineales en cada uno de los tratamientos.

El terreno se preparó conforme a los tratamientos en estudio. En relación con siembra, variedades, fertilización, labores de cultivo, riegos y demás labores culturales de ambos cultivos, éstas se realizaron de acuerdo con el paquete tecnológico recomendado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR, 1999b).

Para el análisis estadístico se utilizó el paquete SAS, Versión 4.0 (SAS Institute, 1998). En los casos donde se encontró diferencia estadística se estableció una prueba de medias (DMS) para jerarquizar los tratamientos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rendimiento de forraje verde obtenido en este cultivo se observa en la Figura 1. En estos análisis se encontró diferencia estadística en la producción de forraje en las parcelas con aplicación de fertilizante ( $P < 0.05$ ); para las parcelas fertilizadas se promedió una producción de 30 t ha<sup>-1</sup> y para las parcelas sin fertilizante una producción de 26 t ha<sup>-1</sup>.

La utilización de los sistemas de labranza en este experimento no tuvo efecto significativo sobre la producción de maíz forrajero, ya que la mayor producción se obtuvo en el sistema de preparación de suelo mediante labranza convencional con aplicación de fertilizante con una producción media de 33.14 t ha<sup>-1</sup>. Esto coincide con lo señalado por López *et al.* (1996), quienes señalaron las mismas tendencias estadísticas en el uso de estos sistemas. En cuanto a la producción de materia seca, se encontró diferencia estadística en las parcelas con aplicación de

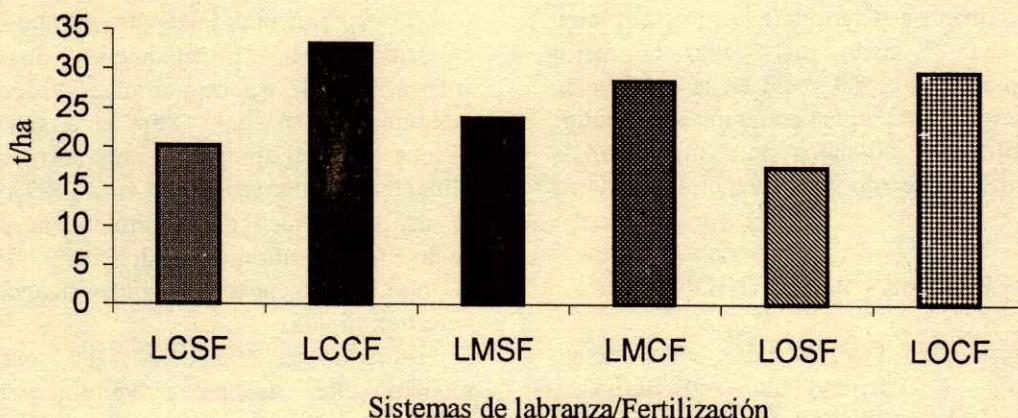


Figura 1. Producción de maíz forrajero con tres sistemas de labranza, con y sin fertilizante. LC = labranza convencional; LM = labranza mínima; LO = labranza cero; SF = sin fertilizante; CF = con fertilizante.

fertilizante. Con la dosis recomendada se obtuvo un mayor rendimiento ( $P < 0.01$ ), es decir, un rendimiento de  $14 \text{ t ha}^{-1}$  con fertilización y de  $7 \text{ t ha}^{-1}$  sin fertilización. La utilización de los sistemas de labranza no tuvo un efecto estadístico sobre la producción de materia seca.

#### Concentración de Nitrógeno ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) en el Suelo

Los resultados obtenidos en tres fechas de muestreo señalan que el promedio más elevado de nitratos se encuentra en las parcelas fertilizadas con la dosis recomendada. Esto pudo deberse a que, al aplicar el fertilizante químico en forma de urea y al biodegradarse por la acción de los microorganismos esto trajo como resultado un incremento en la concentración del  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Salazar *et al.* (1998a,b), en un experimento similar, encontraron que la adición de fertilizante químico en sistemas de labranza mínima aumenta la concentración de  $\text{NO}_3\text{-N}$  y estos repercuten fuertemente en el desarrollo y en la producción del maíz. Con respecto a la comparación entre los diferentes sistemas de labranza, no se encontró diferencia estadística significativa (Cuadro 1). Esto puede deberse a la absorción y lixiviación del  $\text{NO}_3\text{-N}$  (ya que es un ion altamente soluble), sin embargo, estos dos procesos no se cuantificaron. Salazar *et al.* (2000) determinaron que del total del fertilizante químico aplicado al suelo alrededor de 35% lo absorbe la planta de maíz, 40% se inmoviliza y el resto se pierde por lixiviación que no puede cuantificarse.

En cuanto al contenido de nitratos en el suelo, éste no fue estadísticamente diferente en ninguno de los sistemas de labranza utilizados en este estudio. En la Figura 2, puede apreciarse que en labranza convencional y en labranza mínima con aplicación de fertilizante se encuentra la mayor cantidad de nitratos.

Esta tendencia puede deberse a que al utilizar los sistemas de labranza convencional y el sistema de labranza mínima se incrementa la aireación en el suelo, así como la cantidad de materia orgánica al incorporar los residuos al suelo, respectivamente. Además, los microorganismos que se encargan de la mineralización del nitrógeno prefieren condiciones aerobias para desarrollar sus funciones. Meek *et al.* (1994) y Whitehead (1995) han descrito resultados similares.

En cuanto a las fechas de muestreo, se tiene que en la segunda y tercera, se encontraron las más altas y estadísticas concentraciones de  $\text{NO}_3\text{-N}$  a la primera profundidad (0 a 7.5 cm) y en parcelas donde se aplicó fertilizante químico ( $P < 0.05$ ). Estos muestreos

Cuadro 1. Efecto de diferentes sistemas de labranza en el contenido de nitratos en el suelo, con y sin aplicación de fertilizantes.

Fertilización	Profundidad (cm)			Promedio de ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )
	0 a 7.5	7.5 a 15	15 a 30	
----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
Con fertilizante	49.26	18.60	13.56	27.14 a
Sin fertilizar	14.16	4.43	4.76	7.78 b
Promedio	31.71 a	11.51 b	9.16 b	17.46

Medias en la misma hilera y/o columna con distinta letra son diferentes ( $P < 0.01$ ).

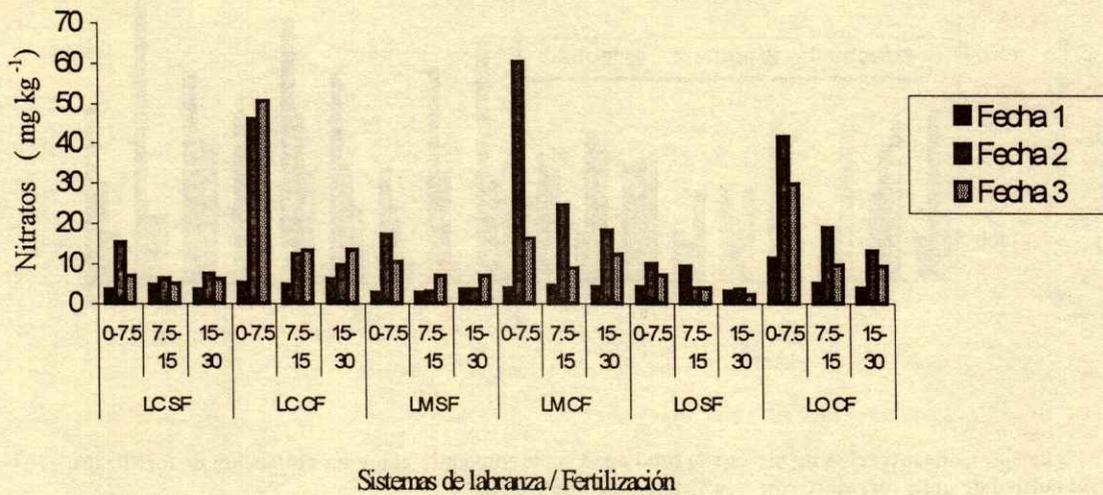


Figura 2. Concentración de nitratos en el suelo con y sin aplicación de fertilizante en tres sistemas de labranza.

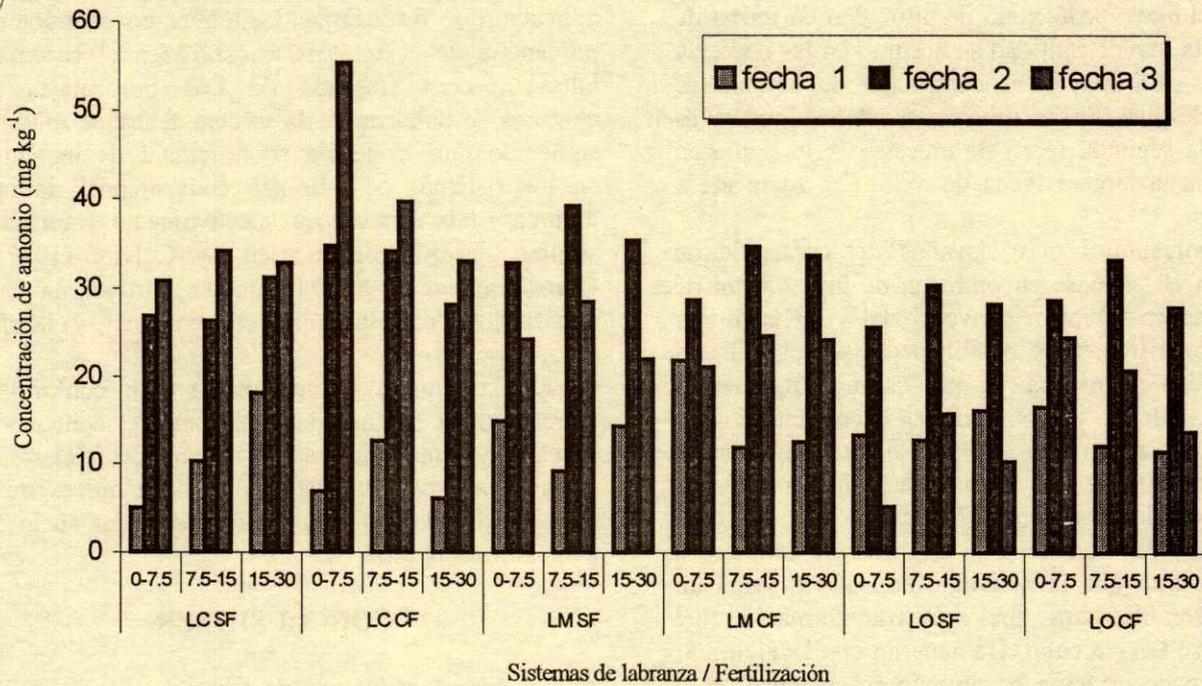


Figura 3. Concentración de amonio en el suelo, con y sin aplicación de fertilizante en maíz forrajero, con tres sistemas de labranza.

se realizaron a la mitad del ciclo vegetativo del maíz y a la cosecha por lo que los nitratos contenidos en la ultima fecha de muestreo pueden ser aprovechados por el cultivo siguiente como nitrógeno residual.

### Concentración de Amonio en el Suelo

Los resultados se obtuvieron en las mismas fechas que los de nitratos. Se tomó una muestra compuesta

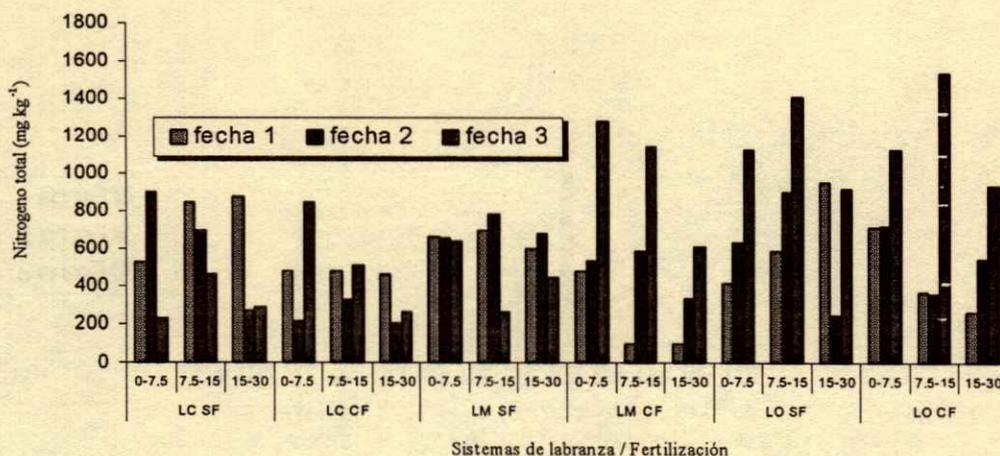


Figura 4. Concentración de nitrógeno total en el suelo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), con y sin aplicación de fertilizantes en el cultivo de maíz forrajero con tres sistemas de labranza.

de las tres repeticiones establecidas en el experimento cuyos resultados se muestran en la Figura 3.

Durante el ciclo de cultivo pudo observarse que en las muestras tomadas en las parcelas fertilizadas se encontró el mayor contenido de nitrógeno en forma de amonio y la mayor cantidad se acentuó en las parcelas fertilizadas. La mayor concentración de amonio se encontró después de la aplicación del fertilizante, es decir, en la segunda fecha de muestreo y le siguió en importancia la tercera fecha de muestreo, realizada a la cosecha.

Los porcentajes más elevados del contenido de amonio en el suelo se encontraron de 0 a 7.5 cm de profundidad en labranza convencional y en la última fecha de muestreo. Esto posiblemente se debió a una alta actividad enzimática, ya que los microorganismos encargados de la amonificación, son aerobios o facultativos. Salazar *et al.* (1998a) determinaron en un experimento similar que la máxima mineralización se presenta en los primeros 7.5 cm, dado que las condiciones de aeración y temperatura son más adecuadas para que la actividad enzimática tenga un efecto favorable para que esta transformación del nitrógeno se lleve a cabo. De acuerdo con la Figura 3, la mayor concentración de amonio se encontró en el sistema de labranza convencional. Es posible que esta mayor concentración pueda deberse a que en este tipo de labranza las condiciones ambientales del suelo son propicias para que las bacterias encargadas de la mineralización del nitrógeno lleven a cabo su actividad metabólica.

### Concentración de Nitrógeno Total en el Suelo

La mayor concentración del N total se encontró en las muestras obtenidas de las parcelas con la aplicación de fertilizante. La mayor concentración en porcentaje de N total se encontró en el sistema de labranza cero (Figura 4). Los porcentajes más elevados se hallaron en la tercera fecha de muestreo, siguiendo una tendencia proporcional de incremento en los sistemas de labranza convencional, labranza mínima y labranza cero, respectivamente. Información similar describieron Karlen y Colvin (1992) y Christensen *et al.* (1994), quienes trabajaron en un experimento con labranza convencional y labranza cero.

En la Figura 4, se aprecia que conforme se incrementa la profundidad del suelo, el contenido de N total aumenta ligeramente, sin importar el sistema de labranza utilizado. Esto quiere decir que existe una relación directa entre la profundidad del suelo y el contenido de N total.

### CONCLUSIONES

- La máxima producción de forraje verde en maíz en promedio para labranza convencional con aplicación de fertilizante N en una cantidad de  $33.14 \text{ t ha}^{-1}$ .
- La concentración de  $\text{NH}_4\text{-N}$ , como se esperaban por sembrarse el maíz en verano, fue más alta en parcelas fertilizadas y en las Fechas 2 y 3, respectivamente, pero sólo de 0 a 7.5 cm de profundidad en los tres

sistemas de labranza con un promedio de 48, 38 y 35.4 mg kg<sup>-1</sup> para labranza convencional, mínima y cero, respectivamente, pero todas con aplicación de fertilizante.

- Después de cuatro años de estudio, la concentración de N-total fue consistentemente mayor en labranza cero con y sin aplicación de fertilizante y en labranza mínima sólo con aplicación de fertilizante y en la última fecha de muestreo.

- Con base en los resultados obtenidos, la labranza cero y mínima son una opción viable para el productor en la región, lo que aparte de disminuir los costos de producción, la acumulación de residuos a través del tiempo son una fuente considerable de materia orgánica que puede reflejarse en una mayor concentración de nitrógeno inorgánico.

### LITERATURA CITADA

- Castellanos, J.Z. y J.J. Peña-Cabiales. 1990. Los nitratos provenientes de la agricultura: Una fuente de contaminación de los acuíferos. *Terra* 8: 113-126.
- Christensen, N.B., W.C. Lindeman, E. Salazar-Sosa y R.L. Gil. 1994. Nitrogen and carbon dynamics in no-tillage and stubble mulch tillage system. *Agron. J.* 86: 298-303.
- Eck, H.V. y O.R. Jones. 1992. Soil nitrogen status as affected by tillage, crops, and crops sequence. *Agron. J.* 84: 660-668.
- Etchevers, J.D. 1985. Determinación de nitrógeno en suelos. Serie Cuadernos de Edafología 4. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México. D.F.
- Johnson, J. 1995. Best management practices: Managing fertility in no-till. Ohio State University. Columbus, OH.
- Karlen, D.L. y T.S. Colvin. 1992. Alternative farming system effects on profile nitrogen concentration on two Iowa farms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1249-1256.
- Linn, D.M. y J.W. Doran. 1984. Aerobics and anaerobics microbes populations in no-tillage and plowed soils. *Soil Sci Soc. Am. J.* 48: 794-799.
- López, B.L., M. Fuentes, J.E. Castillo, F.J. López y E.J. Fernández. 1996. Long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agron. J.* 88: 783-791.
- Meek, B.D., D.L. Carter, D.T. Westermann y R.E. Peckenpaugh. 1994. Root-zone mineral nitrogen changes as affected by crop sequence and tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1464-1469.
- O'Leary, M., G. Rem y M. Schmitt. 1997. Understanding nitrogen in soils. University of Minnesota. Crookston, MN.
- Olson, K. y N. Senjem. 1996. Economics comparison of incremental changes in tillage systems in the Minnesota river basin. University of Minnesota. Crookston, MN.
- Plenecassagne, A., F.E. Romero y B.C. López. 1997. Manual de laboratorio. Análisis de suelos, aguas, plantas. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria-Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Gómez Palacio, Durango, México.
- Rice, C.W. y R.L. Bevlins. 1996. Soil nitrogen availability after long-term continuous no tillage and conventional tillage corn production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 996-1000.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1999a. Anuario estadístico de la producción agropecuaria y forestal. Delegación en la Comarca Lagunera. Lerdo, Durango, México.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1999b. Paquetes tecnológicos y costos de producción de los principales cultivos de la Comarca Lagunera. Lerdo, Durango, México.
- Salazar-Sosa, E., W.C. Lindemann, E. Cárdenas y N.B. Christensen. 1998a. Mineralización y distribución del nitrógeno a través de la zona radicular en dos sistemas de labranza bajo condiciones de campo. *Terra* 16: 163-172.
- Salazar-Sosa, E., W.C. Lindemann, G. Smith y E. Cárdenas. 1998b. Comparación entre la mineralización y la denitrificación potencial en dos sistemas de labranza bajo condiciones de laboratorio. *Terra* 16: 173-180.
- Salazar-Sosa, E., J.A. Leos-Rodríguez, M. Fortis-Hernández y C. Vázquez-Vázquez. 2002. Nitrogen recovery and uptake by wheat and sorghum in stubble mulch and no-tillage systems. *Agrociencia* 36: 433-440.
- SAS Institute Inc. 1998. SAS for windows. Release 6.12. Version 4.0. Cary, NC.
- SEMARNAP. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-055-FITO. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de octubre de 1995. México, D.F.
- Whitehead, D.C. 1995. Grassland nitrogen. CAB-International. London, United Kingdom.

**Revisores de este número**  
**Reviewers of this number**

Adame Martínez, Salvador	Toluca, estado de México
Adams Schroeder, Randy H.	Villahermosa, Tabasco, México
Arteaga Tovar, R. Eduardo	Chapingo, estado de México
Bullon Ames, Juan	Chillán, Chile
Coras Merino, Pablo H.	Chapingo, estado de México
Chávez Aguilera, Noel	Chapingo, estado de México
Duran García, Héctor M.	San Luis Potosí, San Luis Potosí
Faz Cano, Ángel	Cartagena, España
García Calderón, Norma	México, D.F.
Garrigó Reixach, Jordi	Pamplona, España
Gómez Cruz, Guadalupe	Chapingo, estado de México
Gutiérrez Coronado, Marco Antonio	Ciudad Obregón, Sonora, México
Jaén Contreras, David	Montecillo, estado de México
Lee Rodríguez, Vicente	Tapachula, Chiapas, México
Martínez Rodríguez, Juan Guillermo	Ciudad Lerdo, Durango, México
Mirafuentes Hernández, Felipe	Huimanguillo, Tabasco, México
Mora Gutiérrez, Manuel	Querétaro, Querétaro, México
Morales Salinas, Luis	Santiago, Chile
Ordaz Chaparro, Víctor M.	Montecillo, estado de México
Ortiz Olguín, Miguel	Chapingo, estado de México
Pineda Pineda, Joel	Chapingo, estado de México
Rubio Covarrubias, Oswaldo A.	Metepec, estado de México
Sánchez del Castillo, Felipe	Chapingo, estado de México
Serrano Covarrubias, Luis Manuel	Chapingo, estado de México
Velázquez Mendoza, Juan	Montecillo, estado de México
Wall, Luis Gabriel	Bernal, Argentina
Zermeño González, Alejandro	Saltillo, Coahuila, México

**Editores Técnicos de este número**  
**Technical Editors of this number**

Alvarado López, Jorge	Montecillo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
Espinosa Victoria, David	Montecillo, estado de México
González Chávez, Ma. del Carmen	Montecillo, estado de México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
Pineda Pineda, Joel	Chapingo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México

**Revisores Volumen 21, Número 1**  
**Reviewers Volume 21, Number 1**

Acosta Gallegos, Jorge A.	Celaya, Guanajuato, México
Aguirre Gómez, Arturo	Cuautitlán, estado de México
Becerril Román, A. Enrique	Montecillo, estado de México
Bornemisza, Elemer	San José, Costa Rica
Campos Cascaredo, Adolfo	Xalapa, Veracruz, México
Cram Heydrich, Silke	México, D.F.
Chávez Aguilera, Noel	Chapingo, estado de México
Duran García, Héctor M.	San Luis Potosí, San Luis Potosí
Enriquez Reyes, Sergio A.	Querétaro, Querétaro, México
Farías Larios, Javier	Tecomán, Colima, México
Gallegos Vázquez, Clemente	Zacatecas, Zacatecas, México
Garrigó Reixach, Jordi	Pamplona, España
Gómez Díaz, Jesús D.	Chapingo, estado de México
González, Norma Susana	Balcarce, Argentina
Gutiérrez Castorena, Ma. del Carmen	Montecillo, estado de México
Jasso Ibarra, Rodolfo	Ciudad Lerdo, Durango, México
López Reyes, Lucía	Puebla, Puebla, México
Maldonado Torres, Ranferi	Chapingo, estado de México
Martínez Garza, Ángel	Montecillo, estado de México
Olivares Pascual, José	Granada, España
Orona Castillo, Ignacio	Ciudad Lerdo, Durango, México
Ortiz Solorio, Carlos A.	Montecillo, estado de México
Palacios Mayorga, Sergio	México, D.F.
Peña-Cabriales, Juan José	Irapuato, Guanajuato, México
Pérez-Zamora, Octavio	Tecomán, Colima, México
Pineda Pineda, Joel	Chapingo, estado de México
Polo Gómez, María José	Córdoba, España
Rivera Díaz, Jorge	Chapingo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Sommer Cervantes, Irene	México, D.F.
Valdés Ramírez, María	México, D.F.
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México

**Editores Técnicos Volumen 21, Número 1**  
**Technical Editors Volume 21, Number 1**

Alvarado López, Jorge	Montecillo, estado de México
Corlay Chee, Langen	Chapingo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
González Chávez, Ma. del Carmen	Montecillo, estado de México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México
Vázquez Alarcón, Antonio	Chapingo, estado de México

- Aceves Navarro, Lorenzo A. 225  
 Aguilar-Acuña, José Luis 417  
 Aguilar Márquez, Armando 21  
 Aguilar Santelises, Andrés† 73  
 Aguirre Gómez, Arturo 21  
 Alarcón, Alejandro 91, 503  
 Alcántar-González, Gabriel 73, 167, 177, 185, 365  
 Alemán-Martínez, V. 389  
 Alonso Baéz, Moisés 225  
 Amador-Ramírez, Mario D. 551  
 Amaral-Sobrinho, Nelson M.B. 351  
 Arjona Suárez, Enrique 167, 177, 185  
 Baca-Castillo, Gustavo A. 461, 471  
 Balderas-Plata, Miguel Ángel 449  
 Barrios-Ayala, A. 127  
 Bautista-Zúñiga, Francisco 1  
 Becerra Morales, Carmen Teresa 285  
 Becerra Rodríguez, Salvador 47, 285  
 Beltrán-Morales, Alfredo 561, 569  
 Benitez-Pardo, Daniel 273  
 Bucio Alanis, Lauro 267  
 Byerly-Murphy, K.F. 389  
 Cadena Zapata, Martín 13, 545  
 Cajuste, Lenom J. 31, 449  
 Camas-Gómez, Robertoni 381  
 Campos-Magaña, Santos 13, 545  
 Carrillo-Ávila, Eugenio 533  
 Carrillo-González, Rogelio 31, 233  
 Casas-Díaz, Eduardo 523  
 Castellanos Ramos, Javier Z. 65, 101, 167, 177, 185  
 Castro-Meza, Blanca I. 341  
 Contreras-Hinojosa, José Rafael 427, 437  
 Cortés Becerra, José 117  
 Cortés-Flores, J.I. 127  
 Cruz-Díaz, J. 31  
 Cuenca-Adame, Ernesto 373  
 Cueto Wong, José A. 41, 285, 561, 569  
 Chávez-Morales, Jesús 523  
 Delgadillo Piñón, Ma. Eugenia 117, 513  
 De Oliveira, Clarice 351  
 Díaz-Mederos, P. 389  
 Dontsova, Katerina 259  
 Echeagaray-Alemán, Alfredo 373  
 Enriquez-Reyes, Sergio A. 167, 177, 185  
 Escalante Estrada, J. Alberto 225, 471  
 Escamilla García, José Luis 157  
 Espinoza Arellano, J. de Jesús 195  
 Etchevers Barra, Jorge D. 73, 341  
 Exebio García, Adolfo 117, 513  
 Fernández-Linares, Luis 493  
 Ferrera-Cerrato, Ronald 73, 81, 91, 493, 503  
 Flores Hernández, Arnoldo 195  
 Flores López, Hugo Ernesto 233, 389  
 Fortis-Hernández, Manuel 561, 569  
 Galindo González, Guillermo 137  
 Galván Piña, Blas 273  
 Galvis S., A. 101  
 García Calderón, Norma E. 73, 481  
 García-Esteva, A. 471  
 Gardezi, Abdul Khalil 417  
 Gaytán Muñiz, Tomás 13, 545  
 Gómez-Hernández, Teodoro 57  
 González-Chávez, Ma. del Carmen 503  
 González Eguiarte, Diego 167, 177, 185  
 González-Hernández, V. 481  
 González Mateos, Ricardo 245  
 González Ríos, Jesús 245  
 Grageda-Cabrera, O.A. 65  
 Granados-Sánchez, Diódoro 311, 321  
 Gutiérrez Castorena, Ma. del Carmen 149, 493  
 Hernández Acosta, Elizabeth 81, 493  
 Hernández-Montoya, Migdonio 273  
 Hidalgo-Moreno, Claudia 341  
 Jiménez-Osornio, Juan 1  
 Kohashi-Shibata, Josué 461, 471, 481  
 Lazcano-Ferrat, Ignacio 167, 177, 185  
 León Rodríguez, Frida María 21  
 Leos Rodríguez, Juan Antonio 561, 569  
 Loeza-Ramírez, Gil 409  
 López-A., Raúl 333  
 López-Martínez, Jaime 381  
 López-Morgado, Rosalío 417  
 Lozano, Rufino 1  
 Lugo-de la Fuente, Jorge Alberto 449  
 Lluch, Carmen 203, 213  
 Manu, Andrew 1  
 Manzo Ramos, Fernando 245  
 Martínez, J. Guillermo 195  
 Martínez Damián, Ma. Teresa 157  
 Martínez-Garza, Ángel 101, 127, 157, 225, 341, 427, 437, 461  
 Martínez Menes, Mario 233  
 Martínez-Montoya, Juan F. 301  
 Martínez-Saldaña, Tomás 427, 437  
 Martínez-Sifuentes, J.A. 389  
 Mazur, Nelson 351  
 Medina Urrutia, Víctor 47  
 Mejía Sáenz, Enrique 117, 233, 513, 523  
 Murillo-Amador, B. 333  
 Narro Farías, Eduardo 13, 545  
 Navarro-Alberto, Jorge 1  
 Norton, Darrell 259

- Núñez Escobar, Roberto 267, 417  
Ocaña, Antonio 203, 213  
Ojeda-Trejo, Enrique 301  
Olivares Sáenz, Emilio 41  
Ordaz Ch., V. 109  
Orona Castillo, Ignacio 195  
Oropeza Mota, José Luis 233, 427, 437  
Ortega-Escobar, M. 481  
Ortiz-Solorio, Carlos A. 127, 149, 245, 301  
Osuna-Enciso, Tomás 273  
Pájaro-Huertas, David 301  
Palacios-Vélez, Enrique 513, 523  
Palacios-Vélez, Oscar L. 533  
Peña-Cabriales, Juan José 65, 569  
Pérez-Mangas, Julián M. 373  
Pérez-Nieto, Joel 381  
Pérez Trujillo, Héctor 137  
Pérez-Zamora, Octavio 47, 401  
Pliego, Lina 203, 213  
Prat, Ch. 109  
Preciado-Rangel, Pablo 461  
Quintero Lizaola, Roberto 73  
Quiroga Garza, Héctor Mario 285  
Ramírez-Barajas, J.L. 333  
Ramírez-Moreles, P. 101  
Ramírez-Vega, H. 389  
Real-Rosas, M.A. 333  
Riestra-Díaz, David 373  
Rivera González, Miguel 195  
Rivera-Ortiz, Patricio 341  
Rodríguez-Alcázar, Jorge 341  
Rodríguez-Franco, Carlos 427, 437  
Rodríguez Kabana, Rodrigo 73  
Rodríguez-Mendoza, Ma. de las Nieves 365  
Rodríguez-Vázquez, Refugio 81, 493  
Rubiños-Panta, Juan Enrique 493  
Ruelas-Angeles, G. 481  
Rugama U., J.A. 109  
Ruiz-Corral, J.A. 389  
Ruiz-Vega, Jaime 409  
Salazar Sosa, Enrique 41, 561, 569  
Salgado García, Sergio 267  
Sánchez-Bernal, E. 481  
Sánchez-del Castillo, Felipe 57  
Sánchez García, Prometeo 101, 157, 225  
Sánchez-González, Arturo 311, 321  
Santos Hernández, Ana Laura 117, 513  
Saucedo Veloz, Crescenciano 157  
Segura Castruita, Miguel A. 149  
Soares-dos Santos, Fabiana 351  
Soto Hernández, Ramón Marcos 157  
Tijerina Chávez, Leonardo 101, 225, 461, 523  
Tirado-Torres, Juan L. 461  
Torres Benites, Elibeth 117  
Trejo Téllez, Libia Iris 365  
Turrent Fernández, A. 127  
Valenzuela-López, Marino 273  
Vargas-Pérez, Eduardo 301  
Vázquez-Alarcón, Antonio 365, 449  
Vázquez-Vázquez, Cirilo 561, 569  
Ventura, Eusebio Jr. 259  
Vera-Núñez, J.A. 65  
Villar-Sánchez, Bernardo 381  
Villavicencio-Floriani, E. 333  
Volke Haller, Víctor 245, 427, 437  
Yzquierdo-Arébalos, Santiago 533  
Zazueta-Ranahan, Fedro 523  
Zúñiga Tarango, Rafael 41

# NORMAS PARA PUBLICAR EN TERRA

## TIPOS DE MANUSCRITOS PARA PUBLICACIÓN

La Revista TERRA acepta trabajos en español, portugués e inglés, sobre temas relacionados con la ciencia del suelo y el agua. Éstos pueden ser artículos científicos, notas de investigación, ensayos, cartas al editor y reseñas de libros.

Se entiende por artículo científico aquél basado en un trabajo de investigación en el cual se ha aplicado en forma rigurosa el método científico y se ha estudiado el efecto que tienen diferentes tratamientos sobre la respuesta medible de un sistema, como metodología para comprobar o rechazar una hipótesis claramente establecida en el trabajo.

Las notas de investigación son artículos basados en trabajos experimentales que presentan aspectos metodológicos novedosos o resultados que el autor quisiera publicar antes de finalizar su investigación.

Los ensayos son artículos basados en una recopilación de artículos científicos o informes de investigación, en los que el autor aporta su opinión personal sobre el tema y establece conclusiones respecto al estado actual del conocimiento sobre el mismo.

TERRA publicará en la sección cartas al editor, aquéllas que juzgue convenientes, las cuales deben contener opiniones o comentarios debidamente argumentados. Esta sección tiene por objeto fomentar la discusión sobre temas publicados en sus páginas o de interés para la comunidad científica.

La reseña de libros es una sección destinada a dar a conocer la obra, en particular de autores mexicanos e iberoamericanos, que sea de interés para los científicos del suelo.

Los trabajos que se envíen deberán ceñirse a estas normas para publicación y estarán sujetos a revisión por el Comité Editorial o por quien éste designe, antes de su publicación. No se aceptan trabajos ya publicados o que estén sometidos a la consideración de otras revistas.

## CONTENIDO Y FORMATO DEL MANUSCRITO

Los artículos científicos y las notas científicas que se presenten deberán constar de las siguientes partes: 1) título, título en inglés; 2) autor(es); 3) institución(es) del trabajo y dirección de los autores; 4) Resumen; 5) Palabras clave; 6) Summary; 7) Index words; 8) Introducción; 9) Materiales y Métodos; 10) Resultados y Discusión; 11) Conclusiones y 12) Literatura Citada. El Comité Editorial podrá aceptar algunas modificaciones a esta estructura, cuando el tenor del texto así lo aconseje.

Los ensayos deberán constar de las siguientes partes: 1) título, título en inglés; 2) autor(es) y dirección; 3) institución donde se desarrolló el trabajo y dirección de autores; 4) Resumen; 5) Palabras clave; 6) Summary; 7) Index words; 8) Introducción; 9) Desarrollo del tema, con los subtítulos que se estimen convenientes; 10) Discusión, cuando proceda; 11) Conclusiones y 12) Literatura Citada.

Las cartas al editor y las reseñas de libros no tienen un formato definido, pero no deberán exceder dos cuartillas a doble espacio.

Los trabajos deben enviarse con original y dos copias, en papel tamaño carta a doble espacio, dejando márgenes de 2.5 cm en los cuatro costados y con las líneas numeradas. Las páginas, incluyendo los cuadros y las figuras, se numerarán progresivamente. El texto no deberá exceder 15 páginas para un artículo científico y de ocho para una nota científica **incluidos cuadros y figuras**. En la primera versión, cada cuadro o figura deberá estar insertado en el texto.

Los cuadros y las figuras contendrán sólo la información esencial y en ningún caso repetirán los datos que se presenten en otra forma. Las unidades que se empleen serán las del Sistema Internacional de Unidades y Medidas, **por ejemplo para ppm usar  $\text{mg kg}^{-1}$  o  $\text{mg L}^{-1}$** . Los manuscritos, figuras y cuadros deberán entregarse también en un disquete de 3.5" en procesador Word para Windows de la versión más reciente. Las figuras deberán estar en un formato que permita hacer modificaciones posteriores.

## FORMATO PARA PUBLICACIÓN

En Terra, los trabajos se publican con el formato que se describe a continuación; sin embargo, los manuscritos deben ser preparados por los autores como se indicó en la sección anterior y tomando en cuenta, hasta donde sea posible, las instrucciones en esta sección. El personal editorial de Terra preparará la versión definitiva para su impresión en las páginas de la revista.

**Título.** El título se escribirá con mayúsculas, al inicio, centrado, con negritas y tipo de letra TIMES NEW ROMAN 14, se colocará su traducción al inglés debajo del título en español. El título en inglés se escribirá con minúsculas, excepto la primera letra de cada palabra, centrado, con negritas y tipo de letra TIMES NEW ROMAN 12. Para el encabezado de páginas se requiere un título corto con 60 caracteres o menos.

**Autores.** Se incluirá el nombre del autor o autores en la manera en que éstos acostumbran escribirlo en sus publicaciones. No se usarán títulos ni grados. La primera letra del nombre(s) y apellidos se escribirán con mayúsculas. Los nombres de los autores se separarán por comas, se centrarán, con negritas, tipo de letra TIMES NEW ROMAN 12, a un espacio después del título en inglés.

**Institución(es) patrocinadora(s) y dirección de los autores.** El objetivo de esta parte del artículo es dar el crédito respectivo a la institución que patrocinó el trabajo y que los lectores puedan contactar a los autores en caso necesario; la dirección postal y electrónica del autor responsable deberán quedar claramente especificadas. Para los otros autores, incluir sólo el nombre y dirección de la institución. Esta identificación se escribirá con minúsculas, excepto las siglas, debajo de los autores, centrado y con tipo de letra TIMES NEW ROMAN 11.

**Notas al pie de página.** Se podrán utilizar, cuando sea necesario para identificar información adicional; se numerarán progresivamente a través de todo el texto. **Deberán emplearse sólo cuando sea imprescindible.**

**Forma de titular.** Los títulos tienen diversos órdenes y señalan automáticamente la posición de una parte del artículo dentro de éste.

**Título de primer orden.** Es el título principal del artículo.

**Títulos de segundo orden.** A este tipo corresponden las diferentes partes del artículo; Resumen, Summary,

Introducción, etc. Se escriben con mayúsculas, centrados, con negritas (TIMES NEW ROMAN 11).

**Títulos de tercer orden.** Se escriben al margen izquierdo, con minúsculas, excepto la primera letra de las palabras, en negritas, con espacios sencillos después del último texto escrito y antes del que continúa.

**Títulos de cuarto orden.** Se escriben al margen izquierdo, con negritas, con minúsculas excepto la primera letra, con punto seguido de texto. Sin numeración.

**Títulos de quinto orden.** Se escriben al margen izquierdo, sin negritas, con minúsculas excepto la primera letra, con punto seguido de texto. Sin numeración.

**Resumen.** Esta sección debe sintetizar, con menos de 300 palabras, los aspectos más importantes del trabajo, esto es, su justificación, importancia, método experimental (cuando corresponda) y las conclusiones más importantes.

**Palabras clave.** Estas palabras no deben incluir los mismos términos contenidos en el título. Se colocan a un espacio debajo del resumen al margen izquierdo, con un máximo de cinco. El término "Palabras clave:" se escribe con letra TIMES NEW ROMAN 11, con cursivas, negritas y las palabras clave con el mismo tipo de letra, cursivas, sin negritas. Ejemplo:

*Palabras clave: Rizósfera, agroquímicos.*

**Summary.** Se siguen las mismas normas que para el Resumen en español.

**Index words.** Se seguirán las instrucciones dadas para palabras clave.

**Introducción.** En esta sección se indica la motivación, la importancia y los objetivos del trabajo que llevan implícitas las hipótesis del mismo. Contiene, además, los aspectos más relevantes del tema tratados por otros autores e identificados en la revisión de literatura. La Introducción no debe exceder tres cuartillas a doble espacio.

**Materiales y Métodos.** Esta sección debe describir las características relevantes de los materiales usados en el estudio y los métodos experimentales empleados. Se le debe dar particular importancia a la descripción del método experimental utilizado para lograr los objetivos planteados. Debe mostrar concordancia plena con las hipótesis.

**Resultados y Discusión.** Aquí se incluyen los resultados obtenidos en la investigación. Éstos se presentarán en forma de texto, cuadros, o figuras y **no deberán duplicar la información presentada.**

Además deben contener resultados que puedan ser fácilmente calculables.

En la Discusión se resaltarán los principios más importantes y las relaciones causa-efecto derivadas del análisis de los resultados. Además, se deberá explicar, en función de las observaciones hechas, el porqué de lo observado sin establecer suposiciones. Los resultados obtenidos se compararán con los de otros investigadores y se señalarán las divergencias y las semejanzas.

**Conclusiones.** Las primeras conclusiones que se presenten deben ser aquellas correspondientes a los objetivos planteados. Se pueden incluir, además, otras conclusiones relevantes y recomendaciones que emanen del trabajo.

**Citas en el texto.** Las citas en el texto se harán de acuerdo con la forma en que éstas participan en la oración. Se seguirán las siguientes reglas: 1) se citará el apellido principal del(los) autor(es) y el año, cuando se trate de uno o dos autores, y el apellido principal del primer autor seguido de *et al.* y el año cuando se trate de tres o más autores; 2) las citas, cuando más de una, se colocarán en orden cronológico; 3) cuando el nombre del(los) autor(es) participa en la oración se colocará el apellido principal seguido del año entre paréntesis, ejemplo: Martínez (1982) observó que..., Carrasco (1983) y Merino (1984) encontraron gran diferencia...; 4) cuando la cita se agrega al final de la oración, los nombres de los autores y el año se colocarán entre paréntesis separados por una coma, ejemplo: al final de la cosecha (Martínez, 1982) o (Carrasco, 1983; Merino, 1984) o (Bravo *et al.*, 1979); 5) cuando el autor tiene más de una publicación en un año se adiciona a este a, b, c, ejemplo: (Moreno, 1984a), (Moreno, 1984b) o (Moreno 1984a,b); 6) Las referencias bibliográficas consultadas en internet, se redactarán de acuerdo con lo enunciado previamente, además de incluir la dirección electrónica y fecha en que se obtuvo la consulta.

Howell, A. T. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture.

<http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/93/2/281>

(28 mayo 2001).

**Literatura Citada.** Para confeccionar la lista de citas de literatura se seguirán las normas que se detallan con ejemplos a continuación.

1. Caso de artículos en revistas seriadas, ejemplo:

Contreras-Hinojosa, J. R., V. Volke-Haller, J. L. Oropeza-Mota, C. Rodríguez-Franco, T. Martínez-Saldaña y A. Martínez-Garza. 2003. Enalado y fertilización fosfatada en el cultivo de papa en un Andosol de la Sierra Veracruzana. *Terra* 21: 417 - 426.

Obsérvese que la inicial del nombre propio se ha trasladado al final de los apellidos sólo para el caso del primer autor, y que se escriben completos los apellidos ligados con guión. Se mantiene el nombre propio en el lugar que corresponde en el resto de los casos. Es común que los nombres ingleses se escriban con dos nombres personales y un apellido; ejemplo: L.J. Brown, el cual se redactará en caso de ser primer autor como Brown, L.J. y como L.J. Brown, si es coautor.

2. Caso de artículos en una publicación colectiva no periódica con o sin editor, ejemplo:

a) con editor

Turrent F., A. 1984. Los agrosistemas del trópico. pp. 315-328. *In:* E. Hernández X. (ed.). Los sistemas agrícolas de México. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

b) sin editor

Cortés F., J. I. 1984. El manejo de los frutales en zonas frías. pp. 181-192. *In:* La fruta y su perspectiva en México. CONAFRUT. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F.

3. Caso de los boletines técnicos u otras publicaciones seriadas no periódicas, ejemplo:

Hartemink, A. E. 2001. Publish or perish (6) - Soil science for pleasure. *Bull.* 100: 50-56. International Union of Soil Science. Vienna, Austria.

4. Caso de los libros, ejemplo:

Martínez, G. A. 1995. Diseños Experimentales. Métodos y elementos de teoría. Trillas. México, D.F.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press. London, U.K.

**No deben incluirse referencias de tesis ni de trabajos publicados en memorias y en proceedings.**

La lista de citas se confeccionará en orden alfabético, con sangría francesa de 0.6 cm, con tipo de letra TIMES NEW ROMAN 9, sólo se incluirá en ella los trabajos citados en el texto.

### Otros Aspectos del Manuscrito

Para referir a plantas, animales u otros organismos, usar el nombre en latín binomial y con letras itálicas. A continuación se dan algunas indicaciones acerca de los cuidados y consideraciones que hay que tomar en cuenta para la elaboración de figuras, cuadros, mapas, etc. Los cuadros deben ser

numerados en forma secuencial con números arábigos y en el mismo orden como aparecen en el texto. Los cuadros y las figuras se emplean para reemplazar al texto, cuando el contenido de éste no puede expresarse claramente con palabras o su uso contribuye a un ahorro importante de espacio. Los cuadros y las figuras deben ser claros, simples y concisos. Para ello es necesario seleccionar los datos de modo que se presenten sólo aquellos que se emplearán para hacer énfasis en algún aspecto o que expliquen otros. Los datos deben ordenarse en una forma tal que sean fáciles de interpretar.

En el pie de cuadro se incluirán las llamadas que sean pertinentes. Los asteriscos se reservarán para indicar significación a 5% (\*) y 1% (\*\*), respectivamente; es recomendable incluir el error estándar promedio en las figuras. Otras notas serán señaladas con los siguientes símbolos en orden: †, ‡, §, ¶, #, ††, ‡‡, ..., †††.

Los cuadros deben tener tres líneas horizontales continuas: al inicio del cuadro, al inicio del campo del cuadro (no en el encabezado) y al final. El campo y el encabezado de las columnas se pueden dividir a conveniencia del autor. No se deben añadir líneas verticales. Los encabezados, de columnas y líneas, se describirán con minúsculas, excepto la primera letra de la oración. Las unidades se colocan debajo de la segunda línea horizontal. Se empleará sólo el número de cifras significativas necesarias para destacar el punto que se desee. Los cuadros no podrán ser

mayores que una página tamaño carta, considerando los márgenes antes señalados.

Los mapas y las figuras, incluido el título, no deben exceder las dimensiones de una página tamaño carta con márgenes especificados previamente. La leyenda debe ser con letras (con minúscula excepto la primera letra) y números lo suficientemente grandes como para que puedan leerse al ser reducidos, al igual que el grosor de los ejes y las líneas interiores. En una figura lo que interesa destacar es el contenido y no los ejes. En consecuencia, el grosor de estos últimos tiene que ser menor que el de las líneas interiores. Los puntos experimentales deben marcarse visiblemente con símbolos que puedan diferenciarse entre sí, sin color en el relleno y sin marco, por ejemplo: ○● □■ ▲▲. Para dividir los ejes se deben escoger intervalos constantes para cada uno.

**Agradecimientos.** Podrán incluirse al final del texto, esto es, después de las Conclusiones y antes de la Literatura Citada.

#### **Información Adicional**

Para mayor información sobre la preparación de manuscritos se recomienda consultar el libro: Alvarado, L.J. 2000. Redacción y preparación del artículo científico. Segunda edición. Publicación Especial 11. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. y Colegio de Postgraduados, Agrociencia. Chapingo, México.

# TERRA

## Journal of the Mexican Society of Soil Science

### Instructions to Authors

#### SUBMISSION OF MANUSCRIPTS

Submission of manuscripts for publication should be sent in triplicate to:

Editorial Office of Terra  
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.  
Apartado Postal 45  
56230 Chapingo, Edo. de Mexico, Mexico.  
Fax: +52 (595) 95 2 17 21  
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

Upon receipt of a manuscript the authors will receive the file number of their paper. This number should be quoted in all correspondence. Papers already published, or under consideration elsewhere cannot be accepted.

#### TYPE OF MANUSCRIPT

The Journal welcomes concise papers presenting original research findings from authors throughout the world, making a significant contribution to the advancement of knowledge of existing soil science concepts. The Journal publishes papers of topics related to Soil Science, Water Management and Environmental Sciences. The contributions may be Scientific Papers, Research Notes and Critical Reviews. The Journal publishes also Letters to the Editor and Book Reviews.

**Scientific Papers** must be generated from original research in which the scientific method was implemented to accept or reject a given hypothesis.

Work based on limited experimentation will not generally be acceptable.

Work of local interest only is not considered appropriate for this International Journal.

**Research Notes** are articles based on experimental work that presents new methodological aspects or important results that the author wants to publish before the research project is completed.

**Critical Reviews** are articles in which the author reports the State of the Art about a given topic of interest to the scientific community, based on the published literature, establishing some conclusions regarding the analysis of the published data.

#### MANUSCRIPT

The manuscripts should be provided with a **title page**, containing the title typed in uppercase letters, centered, in English and Spanish; author(s) name(s) and affiliation(s) and including a complete address for correspondence (e-mail). A short title not exceeding 40 characters must be provided for the running headlines. Manuscripts should be typed in double space, with at least 2.5 cm margin on both sides.

Scientific Papers and Research Notes should be divided into the following sections: 1) **Summary** in English and Spanish, not exceeding 300 words for scientific papers and 150 words for research notes; 2) **Index words**, include up to five; 3) **Introduction**, which should set the work in context, presenting the essential background and including a concise statement of the objectives; 4) **Material and Methods**, indicating relevant details of the experimental methods and design, the

techniques and statistical methods used in the study, so that the results can be judged for validity and so that previous experiments may serve as a basis for the design of future experiments. It is highly recommended to describe the soil type and characteristics in which the experiment was conducted; 5) **Results and Discussion**, indicating numerical results in tables or figures and should not be repeated in the text. All statements should be based on proof and not supposition, and should be supported with statistical analysis, i.e. Standard Error and Degrees of Freedom, Least Significant Difference, and Multiple Range Test. The level of significance should be indicated in the text and tables. Discussion should briefly relate the author's results of other works on the subject and give the author's conclusion; 6) **Acknowledgments** and 7) **References**.

#### STYLE

The acceptable languages are Spanish, English and Portuguese. For plants, insects and pathogens give the Latin binomial name (in Italics) at first mention and do not include them in the title, but in the summary. The International System of Units is required. Follow Chemical Abstracts and its indexes for chemical names. Give cation exchange capacity in  $\text{mmol kg}^{-1}$ . For ppm use  $\text{mg kg}^{-1}$  or  $\text{mg L}^{-1}$ . Use  $\text{kg ha}^{-1}$  or  $\text{t ha}^{-1}$ . For time units use min, h, d, month (abbreviate to three letters, i.e. Jan, Feb). A zero must always precede a decimal point e.g. 0.24. All abbreviations must be explained at first mention in the text. The use of asterisks is reserved to indicate statistical significance \*( $P < 0.05$ ), \*\*( $P < 0.01$ ), \*\*\*( $P < 0.001$ )

#### MANUSCRIPTS ON DISK

The original manuscript should always be sent on paper. After acceptance, the submission of the final version must be on disk, formatted for use on windows based computers. An accompanying printout should be provided. Word software is preferred.

**Headings** should be used in dividing and subdividing the paper e.g.

First-order headings: Centered, boldface type and uppercase letters Times New Roman 14. Reserved for the main title of the paper.

Second-order headings: Centered, boldface type and uppercase letters. Times New Roman 11. Used

for the different parts of the manuscript i.e. Introduction.

Third-order headings: Against left margin, bold face type and first letter of each word in uppercase letter.

Fourth-order headings: In the paragraph. Lowercase letters except the first one, boldface type.

#### TABLES

These must be numbered consecutively with Arabic numerals, in the same order as they are mentioned in the text. Tables are always printed in a small letter type and should be provided with descriptive headings. All column headings should begin with a capital letter. Table notes should be referred to by superscript: †, ‡, §, ¶, #, ††, †††. When preparing the tables it should be considered that they could be printed in one column (85 mm) or two columns (180 mm). Tables must have three horizontal solid lines: one at the beginning of the table, the second at the beginning of the field and the last one at the end of the table. No vertical lines are allowed. All tables must present statistic parameters to do the appropriate comparisons.

#### FIGURES

These can be photographs, graphs, charts or diagrams. They must be included in the text. Figures may not reproduce the same matter as tables. Originals of figures must be provided of good quality, drawn or printed clearly in black on white. There should be no numbering or lettering on the originals but in the copies. Vertical axes should be labeled vertically. Keep in mind that the final reduced size is 9-point type for numbers on the axis scale, 10 to 11 points for the axis labels and 7 to 8 points for inside legends. A typewritten, double-spaced list of legends of all figures must be supplied. Each legend should contain sufficient explanation to be meaningful without cross-referencing, giving a key to all the symbols on it. The preferred symbols are ○● □■ ▲▲, Standard Errors of the means are strongly recommended to be included in the figures.

## LITERATURE CITED

In the text the references should be quoted by the author's last name followed by the year and in date order, e.g. (Laird, 1990; Pratt and Adriano, 1993; Jensen *et al.*, 1995) or Follett (1991). The list of references should be provided at the end of the text, listing in alphabetical order, surname of first author and initials, initials and surname of following authors, year of publication, title of the paper, name of the journal in abbreviation, volume, and first and last page, e.g.:

Flach, K.W., W.D. Nettleton, and O.A. Chadwick. 1992. The criteria of duripans in the US soil taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. *Terra* 10: 34-45.

Goijberg, G. and A. Aguilar-Santelises. 1985. pH del suelo y necesidades de cal. pp. 17-24. *In*: A. Aguilar-Santelises, J.D. Etchevers, J.Z. Castellanos (eds.). *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación Especial 1. Chapingo, México.

Ryan, T.P. 1989. *Statistical methods for quality control*. John Wiley & Sons, New York.

Thompson, T.L. and T.A. Doerge. 1996. Nitrogen and water interactions in subsurface trickle irrigated leaf lettuce. II. Agronomic, economic, and environmental outcomes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 168-173.

Smith, P. G., and T. Jones. Title of article (abstract). *JASH* 4(3):54-59, <http://asae.frymulti.com> Aug. 9, 2000.

The list of references should be typed in double space throughout.

## PROOFS

The proofs will be sent to the authors to enable them to check correctness of the typesetting. They should be handled promptly and returned to the editorial office. No changes other than corrections should be made.

September 2003



## SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO, A.C.

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos;  
km 38.5 Carr. México -Texcoco  
Tel. y Fax: 01 595 95 2 17 21. Tel. 01 595 95 2 15 00 ext. 5237  
Correo ordinario: Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Méx.

### FORMA DE SUSCRIPCIÓN A LA REVISTA TERRA

La revista Terra es publicada trimestralmente. Todas las suscripciones son anuales e incluyen un volumen con cuatro números. El costo de la suscripción es de \$ 750.00 en el país y 80.00 Dólares americanos en el extranjero. Incluye costos de envío en ambos casos.

Enviar suscripción a:

Nombre: \_\_\_\_\_

Empresa: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Colonia: \_\_\_\_\_

Código Postal: \_\_\_\_\_

Ciudad: \_\_\_\_\_

Estado: \_\_\_\_\_

País: \_\_\_\_\_

e-mail: \_\_\_\_\_

Teléfono: \_\_\_\_\_

Fax: \_\_\_\_\_

Usted podrá depositar el monto de la suscripción en la cuenta bancaria que se describe en la parte inferior de esta forma.

**HOY ES EL MEJOR MOMENTO PARA APOYAR A LA REVISTA TERRA  
! SUSCRÍBETE ;**

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.  
Cuenta 044 657115  
Bancomer Número de Plaza 010  
Sucursal 3441 Texcoco, Estado de México.

Errata

En el índice de contenido del volumen 21-2, no se incluyó el título del artículo:

**285 NITRÓGENO DISPONIBLE Y DESARROLLO DEL BALLICO ANUAL. I. PRODUCCIÓN, CALIDAD DEL FORRAJE Y ACUMULACIÓN DE NITRATOS**

**Nitrogen Availability and Annual Ryegrass Development. I. Forage Yield, Quality, and Nitrate-N Accumulation**

**José Antonio Cueto Wong, Héctor Mario Quiroga Garza  
y Carmen Teresa Becerra Morales**