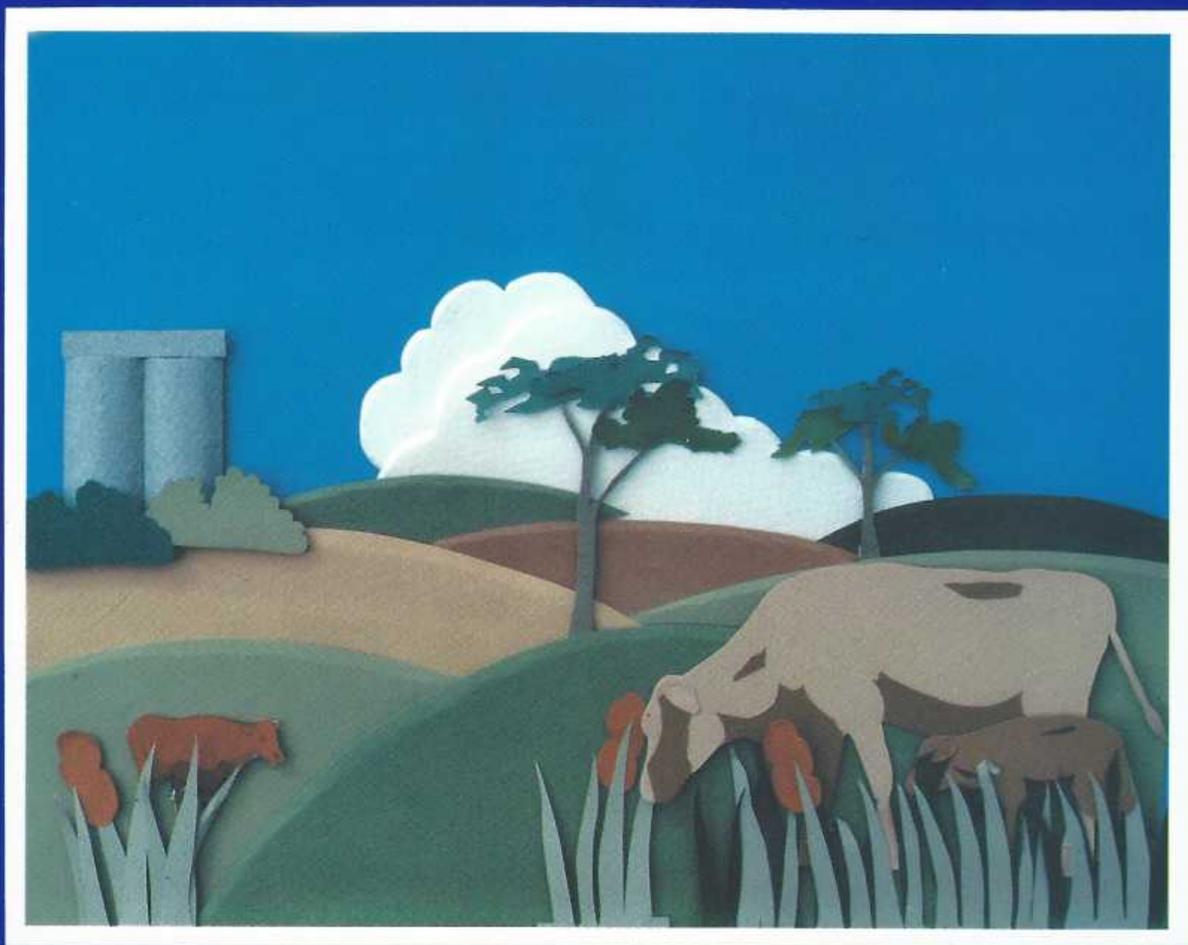


ISSN 0187 - 5779

# TERRA

*Latinoamericana*

JULIO - SEPTIEMBRE DE 2005 • VOLUMEN 23 NÚMERO 3



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

# TERRA

*Latinoamericana*

## COMITE EDITORIAL

<b>EDITOR</b>	<b>Dr. Antonio Vázquez Alarcón</b>
<b>EDITORES ADJUNTOS</b>	<b>Dra. Carmen Gutiérrez Castorena</b> <b>M.C. Jorge Alvarado López</b> <b>M.C. Joel Pineda Pineda</b>
<b>EDITORES TÉCNICOS</b>	<b>Dr. David Cristóbal Acevedo</b> <b>Dr. David Espinosa Victoria</b> <b>Dr. Manuel Sandoval Villa</b> <b>Dr. Mateo Vargas Hernández</b> <b>Dra. Carmen Gutiérrez Castorena</b> <b>Dra. Edna Álvarez Sánchez</b> <b>Dra. Ma. del Carmen González Chávez</b>
<b>EDITORES DE ESTILO</b>	<b>Ina Aalmers de Aguilar</b>
<b>EDITORA DE ESTILO EN INGLES</b>	<b>Diane Fumiko Miyoshi Udo</b>

## EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

	<b>Ina Aalmers de Aguilar</b>
	<b>Ma. de Lourdes Sánchez Arellano</b>
	<b>Angelina Ponce Soriano</b>
	<b>Vanessa Oropeza Geronimo</b>
<b>Diseño de Portada</b>	<b>Gardenia Chávez Peña</b>
<b>Administrador de página web</b>	<b>Moisés Gómez Díaz</b>

## EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

**Dr. Alejandro Velázquez Martínez**  
**Dr. Antonio Turrent Fernández**  
**Dr. Benjamín Figueroa Sandoval**  
**Dr. Carlos Ortiz Solorio**  
**Dr. Enrique Palacios Vélez**  
**Dr. Gabriel Alcántar González**  
**Dr. Javier Z. Castellanos Ramos**  
**Dr. Jesús Caballero Mellado**  
**Dr. Jorge D. Etchevers Barra**  
**Dr. Juan José Peña Cabriaes**  
**Dr. Lenom J. Cajuste**  
**Dr. Manuel Anaya Garduño**  
**Dr. Oscar L. Palacios Vélez**  
**Dr. Reggie J. Laird**  
**Dr. Roberto Núñez Escobar**  
**Dr. Ronald Ferrera Cerrato**

## EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

<b>Dr. Alberto Hernández</b>	<b>Cuba</b>
<b>Dr. Anthony Fischer</b>	<b>Australia</b>
<b>Dr. Bernardo Van Raij</b>	<b>Brasil</b>
<b>Dr. Christian Prat</b>	<b>Francia</b>
<b>Dr. Daniel Buschiazzo E.</b>	<b>Argentina</b>
<b>Dr. Donald L. Suarez</b>	<b>E.U.A.</b>
<b>Dr. Elemer Bornemisza</b>	<b>Costa Rica</b>
<b>Dr. Eric S. Jensen</b>	<b>Dinamarca</b>
<b>Dr. Fernando Santibañez Quezada</b>	<b>Chile</b>
<b>Dr. Hari Eswaran</b>	<b>E.U.A.</b>
<b>Dr. Héctor J. M. Morrás</b>	<b>Argentina</b>
<b>Dr. John T. Moraghan</b>	<b>E.U.A.</b>
<b>Dr. Jorge A. Delgado</b>	<b>E.U.A.</b>
<b>Dr. José Aguilar Ruiz</b>	<b>España</b>
<b>Dr. José M. Hernández Moreno</b>	<b>España</b>
<b>Dr. José Rodríguez</b>	<b>Chile</b>
<b>Dr. Juan F. Gallardo Lancho</b>	<b>España</b>
<b>Dr. Karl Stahr</b>	<b>Alemania</b>
<b>Dr. Rafael Villegas Delgado</b>	<b>Cuba</b>
<b>Dr. Renato Grez Z.</b>	<b>Chile</b>
<b>Dr. Walter Luzio Leighton</b>	<b>Chile</b>
<b>Dr. Winfried E. H. Blum</b>	<b>Austria</b>

# TERRA

*Latinoamericana*

**SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.**

## **MESA DIRECTIVA 2005-2007**

Presidente	<b>Dr. José Antonio Cueto Wong</b>
Vicepresidente	<b>Dr. Adalberto Benavides Mendoza</b>
Secretario General	<b>Dr. Ranferi Maldonado Torres</b>
Tesorera	<b>M.C. Langen Corlay Chee</b>
Secretaria Técnica	<b>M.C. Laura Bertha Reyes Sánchez</b>
Secretario de Relaciones Internacionales	<b>Dr. Enrique Salazar Sosa</b>
Vocales	<b>Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza</b> <b>Dra. Christina Siebe Grabach</b> <b>Dr. Ignacio Sánchez Cohen</b> <b>Dr. Rubén López Cervantes</b> <b>Dr. Rogelio Aldaco Nuncio</b>

## **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 Latinoamericana** registro en trámite.  
Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.  
Julio - Septiembre de 2005 Volumen 23 Número 3  
**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 Latinoamericana a:  
Editor de la Revista TERRA Latinoamericana. 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) 952 17 21  
**e-mail:** terra@correo.chapingo.mx

# TERRA

*Latinoamericana*

## EDITORIAL COMMITTEE

<b>EDITOR</b>	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
<b>ASSOCIATE EDITORS</b>	Dra. Carmen Gutiérrez Castorena M.C. Jorge Alvarado López M.C. Joel Pineda Pineda
<b>TECHNICAL EDITORS</b>	Dr. David Cristóbal Acevedo Dr. David Espinosa Victoria Dr. Manuel Sandoval Villa Dr. Mateo Vargas Hernández Dra. Carmen Gutiérrez Castorena Dra. Edna Alvarez Sánchez Dra. Ma. del Carmen González Chávez
<b>STYLE EDITORS</b>	Ina Aalmers de Aguilar
<b>ENGLISH EDITOR</b>	Diane Fumiko Miyoshi Udo
<hr/>	
<b>EDITORIAL STAFF</b>	Ina Aalmers de Aguilar Ma. de Lourdes Sánchez Arellano Angelina Ponce Soriano Vanessa Oropeza Geronimo
<b>Cover design</b>	Gardenia Chávez Peña
<b>Website administrator</b>	Moisés Gómez Díaz

## NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Alejandro Velázquez Martínez  
Dr. Antonio Turrent Fernández  
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval  
Dr. Carlos Ortiz Solorio  
Dr. Enrique Palacios Vélez  
Dr. Gabriel Alcántar González  
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos  
Dr. Jesús Caballero Mellado  
Dr. Jorge D. Etchevers Barra  
Dr. Juan José Peña Cabriales  
Dr. Lenom J. Cajuste  
Dr. Manuel Anaya Garduño  
Dr. Oscar L. Palacios Vélez  
Dr. Reggie J. Laird  
Dr. Roberto Núñez Escobar  
Dr. Ronald Ferrera Cerrato

## INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Alberto Hernández	Cuba
Dr. Anthony Fischer	Australia
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Christian Prat	Francia
Dr. Daniel Buschiazzo E.	Argentina
Dr. Donald L. Suarez	E.U.A.
Dr. Elemer Bornemisza	Costa Rica
Dr. Eric S. Jensen	Dinamarca
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Hari Eswaran	E.U.A.
Dr. Héctor J. M. Morrás	Argentina
Dr. John T. Moraghan	E.U.A.
Dr. Jorge A. Delgado	E.U.A.
Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. José M. Hernández Moreno	España
Dr. José Rodríguez	Chile
Dr. Juan F. Gallardo Lancho	España
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Rafael Villegas Delgado	Cuba
Dr. Renato Grez Z.	Chile
Dr. Walter Luzio Leighton	Chile
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria

# TERRA

*Latinoamericana*

## MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

### BOARD

President  
Vicepresident  
Secretary  
Treasurer  
Technical Adviser  
International Relations  
Voters

**Dr. José Antonio Cueto Wong**  
**Dr. Adalberto Benavides Mendoza**  
**Dr. Ranferi Maldonado Torres**  
**M.C. Langen Corlay Chee**  
**M.C. Laura Bertha Reyes Sánchez**  
**Dr. Enrique Salazar Sosa**  
**Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza**  
**Dra. Christina Siebe Grabach**  
**Dr. Ignacio Sánchez Cohen**  
**Dr. Rubén López Cervantes**  
**Dr. Rogelio Aldaco Nuncio**

## 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 Latinoamericana** Registration pending  
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science  
Jul - September, 2005 Volume 23 Num. 3

**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 Latinoamericana, 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 - Fax:** +52 (95) 952 17 21  
**e-mail:** terra@correo.chapingo.mx

# TERRA

*Latinoamericana*

JULIO - SEPTIEMBRE DE 2005 • VOLUMEN 23 • NUMERO 3  
JUL - SEPTEMBER, 2005 • VOLUME 23 • NUMBER 3

## DIVISION I

- 285 Análisis químico de compost y efecto de su adición sobre la producción de biomasa en zarzamora.  
Chemical analysis of compost and the effect of its addition on biomass production in blackberry.  
*J. Venegas-González, J. Lenom Cajuste, A. Trinidad-Santos, F. Gavi-Reyes y P. Sánchez-García*
- 293 Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco.  
Oil spills on soils and adaptation of tropical grass in Activo Cinco Presidentes, Tabasco.  
*Joel Zavala-Cruz, Francisco Gavi-Reyes, Randy Howard Adams-Schroeder, Ronald Ferrera-Cerrato, David J. Palma-López, Humberto Vaquera-Huerta y J.M. Domínguez-Ezquivel*

## DIVISION II

- 303 Área foliar, tasa de asimilación neta, rendimiento y densidad de población en girasol.  
Leaf area, net assimilation rate, yield and plant density in sunflower.  
*L. Aguilar-García, J. Alberto Escalante-Estrada, L. Fucikovsky-Zak, L. Tijerina-Chávez y E. Mark Engleman*
- 311 Crecimiento de la raíz del frijol con diferentes velocidades de secado del suelo.  
Root growth of bean under different soil drying rates.  
*Análí Ontiveros-Cortés, Josué Kohashi-Shibata, Petra Yáñez-Jiménez, Jorge A. Acosta-Gallegos, Enrique Martínez-Villegas y Antonio García-Esteva*
- 321 Efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre rendimiento y calidad del brócoli con riego por goteo.  
Effect of soil water tension on yield and quality of broccoli under drip irrigation.  
*Salvador Villalobos-Reyes, Javier Z. Castellanos-Ramos, Leonardo Tijerina-Chávez y Guillermo Crespo-Pichardo*

# TERRA

*Latinoamericana*

## **NOTA DE INVESTIGACION / Research Note**

- 329** Coeficientes de desarrollo del cultivo de brócoli con riego por goteo.  
Crop coefficient in broccoli under drip irrigation.  
*Salvador Villalobos-Reyes, Javier Z. Castellanos-Ramos, Leonardo Tijerina-Chávez y Guillermo Crespo-Pichardo*
- 335** Predicción del tiempo de riego en vid cv. Superior con riego por goteo usando una estación agrometeorológica automática.  
Prediction of irrigation time for grape cv. Superior under drip irrigation with the use of an automatic agrometeorological station.  
*Adán Fimbres-Fontes y Rodrigo Aguilera-Ponce*
- 341** Sustratos y frecuencias de riego para la producción de jitomate en hileras a diferente altura.  
Substrates and irrigation frequencies for the production of tomato in rows at different heights.  
*Quirino Hernández-Santiago, Felipe Sánchez-Del Castillo, Aureliano Peña-Lomelí y Domingo Montalvo-Hernández*

## **ENSAYO / Essay**

- 351** Relación hombre-naturaleza en un ciclo que perpetúa la vida: agua y galerías filtrantes en el valle de Tehuacán, México.  
Relationship man-nature in a cycle perpetuating life: water and filtering galleries in Tehuacan Valley, Mexico.  
*D. Granados-Sánchez, Miguel Á. Hernández-García y Georgina F. López-Ríos*
- 363** Historical analysis of the irrigation evolution of the Laguna Region of Mexico.  
Análisis histórico de la evolución de la irrigación de la Comarca Lagunera de México.  
*Marco A. Inzunza-Ibarra and H. Curtis Monger*

# TERRA

*Latinoamericana*

## DIVISION III

- 371** Cultivo de maíz en sistemas de labranza con barreras biofísicas en Andosoles de ladera.  
Maize crop in tillage systems with biophysical barriers in cultivated steep-slope Andosols.  
*Miguel Bravo-Espinosa, Jaime Ruiz-Vega y Víctor Volke-Haller*
- 381** Sistemas de labranza, incorporación de abono verde y recuperación de la fertilidad de un Yermosol háplico.  
Tillage systems, incorporation of green manure, and fertility recuperation in a Haplic yermosol.  
*F.A. Beltrán-Morales, J.L. García-Hernández, R.D. Valdez-Cepeda, B. Murillo-Amador, E. Troyo-Dieguez, J. Larrinaga-Mayoral, F.H. Ruiz-Espinoza, L. Fenech-Larios y F. García-Rodríguez*
- 389** Relación bases intercambiables-rendimiento de maíz en un Cambisol dístico con labranza, encalado y abono verde.  
Relationship exchangeable bases-maize yield in a Distric cambisol under tillage, liming, and green manure.  
*Rigoberto Zetina-Lezama, Antonio Trinidad-Santos, José L. Oropeza-Mota, Víctor Volke-Haller y Luis L. Landois-Palencia*
- 399** Reducción del rendimiento de maíz por la erosión del suelo en Yanhuitlán, Oaxaca, México.  
Reduction of maize yield by erosion in Yanhuitlan, Oaxaca, Mexico.  
*José Contreras-Hinojosa, Víctor Volke-Haller, José Oropeza-Mota, Carlos Rodríguez-Franco, Tomás Martínez-Saldaña y Ángel Martínez-Garza*

# TERRA

*Latinoamericana*

## NOTA DE INVESTIGACION / *Research Note*

- 409 Respuesta del papayo a la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio en un Luvisol.  
Response of papaya tree to nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization in a Luvisol.  
*J. Emilio Bueno-Jáquez, Alejandro Alonso-López, Víctor Volke-Haller, Felipe Gallardo-López, M. Miguel Ojeda-Ramírez y Raúl Mosqueda-Vázquez*

### DIVISION IV

- 417 Esquema de organización de sitios forestales recreativos desde la perspectiva de la población local.  
Framework of forest recreation sites from local perspective  
*Eliseo Cantellano-de Rosas y Carlos A. Ortiz-Solorio*

Revisores y Editores Técnicos de este número  
Reviewers and Technical Editors of this number

**427**

# ANÁLISIS QUÍMICO DE COMPOST Y EFECTO DE SU ADICIÓN SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN ZARZAMORA

Chemical Analysis of Compost and the Effect of its Addition on Biomass Production in Blackberry

J. Venegas-González<sup>1†</sup>, J. Lenom Cajuste<sup>2</sup>, A. Trinidad-Santos<sup>2</sup>, F. Gavi-Reyes<sup>2</sup> y P. Sánchez-García<sup>2</sup>

## RESUMEN

Se evaluó la composición química de compost de cachaza de caña de azúcar de diferente tiempo de humificación y su efecto sobre el rendimiento de materia seca (MS) de zarzamora (*Rubus* spp.). Las características químicas consideradas fueron pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), C, N, ácidos húmicos (AH), grupos funcionales totales y carboxílicos. En adición, el punto de carga cero ( $\Delta\text{pH}$ ), la relación C/N, y la relación de densidades ópticas ( $E_4/E_6$ ) se calcularon. En condiciones de invernadero, cinco dosis de compost (0, 1.875, 3.75, 7.5 y 15.0 g kg<sup>-1</sup> de suelo) y cinco periodos de humificación (0, 8, 12, 24 y 36 meses) se evaluaron en la producción de MS de la zarzamora. Los resultados muestran que las características químicas de los composts fueron afectadas por el periodo de humificación. El pH, el contenido de AH, grupos funcionales totales y carboxílicos y la CIC se incrementaron en forma proporcional con el tiempo durante los primeros 12 meses de humificación; los ácidos húmicos continuaron su incremento hasta 24 meses; en tanto que la relación C/N disminuyó de 45 a 12.95 y la relación  $E_4/E_6$  de 4.7 a 1.7 durante el periodo de estudio (0 a 36 meses). La producción de MS obtenida con la cachaza sin humificar fue menor (2.937 g planta<sup>-1</sup>) respecto a la obtenida con los otros tratamientos (Tukey, 0.05). El rendimiento obtenido con la dosis de compost de 3.75 g kg<sup>-1</sup> de suelo fue mayor (4.8 g planta<sup>-1</sup>) que el de las dosis restantes (DSH<sub>0.05</sub>).

**Palabras clave:** *Rubus* spp., cachaza, periodo de humificación, ácidos húmicos, grupos funcionales, CIC.

## SUMMARY

The chemical composition of a composted sugar mill by-product (SMB-P) with different humification period and its effect on dry matter yield of blackberry (*Rubus* spp.) were evaluated. The chemical characteristics concerned were pH, CEC, C, N, humic acids (HA), functional groups, including the carboxylic content of the composts. In addition, the zero point of charge ( $\Delta\text{pH}$ ), C:N ratio, and the  $E_4/E_6$  optic density ratios were calculated. In a greenhouse experiment, five doses of SMB-P (0, 1.875, 3.75, 7.5, and 15 g kg<sup>-1</sup> soil) and five humification periods (0, 8, 12, 24, and 36 months) were evaluated in the blackberry dry matter production. Results showed that the chemical properties of compost were influenced by the humification period. pH, HA content, total functional groups including the carboxylic and CEC of the SMB-P increased during the first 12 months of humification; the HA content increased until 24 months of humification, whereas the C/N ratio decreased from 45 to 12.95, and the  $E_4/E_6$  from 4.7 to 1.7 during the research period (0 to 36 months). The dry matter production obtained with the SMB-P without humification was lower (2.937 g plant<sup>-1</sup>) than that obtained with the other treatments (Tukey, 0.05). The dry matter yield obtained with the 3.75 g kg<sup>-1</sup> soil dosage was higher (4.8 g plant<sup>-1</sup>) than that obtained with the other doses (DSH<sub>0.05</sub>).

**Index words:** *Rubus* spp., sugar mill by-product, humification period, humic acid, functional groups, CEC.

## INTRODUCCIÓN

La materia orgánica es un componente del suelo cuyas funciones son de carácter físico, nutricional y biológico; los suelos agrícolas que se explotan

<sup>1</sup> Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Michoacán, Instituto Politécnico Nacional. 59510 Jiquilpan, Michoacán, México.

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

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

irracionalmente la pierden; sin embargo, la materia orgánica se puede reponer mediante la adición de composts, materiales que mejoran la estructura del suelo, a través de la interacción de las propiedades fisicoquímicas de las sustancias húmicas que contienen, y las arcillas del suelo (Barzegar *et al.*, 2002; Hamza y Anderson, 2002; Zaman *et al.*, 2002).

El compostaje de la materia orgánica es un proceso natural que se lleva a cabo por la acción de hongos y bacterias (Klamer *et al.*, 2001); estos organismos degradan moléculas hidrocarbonadas para formar materiales húmicos supramoleculares (Piccolo, 2002).

Los ácidos húmicos y fúlvicos están estructurados con grupos hidrofílicos e hidrofóbicos (Piccolo, 2002), cuyas interacciones con la parte mineral del suelo ocasionan la aglutinación de las arcillas para formar microagregados limosos (Clapp y Hayes, 1999), mejoran la aireación y la capacidad de retención de agua y parte del C en la biomasa del suelo (Piccolo, 2002).

El compostaje consta de una fase de alta degradación y una de maduración; la primera, se caracteriza por la acción de los microorganismos sobre las sustancias de menor complejidad y, la segunda, por la transformación de los componentes recalcitrantes en sustancias húmicas que mejoran la calidad del suelo (Genevini *et al.*, 2002).

La calidad de un compost se define en función de su contenido de ácidos húmicos; las normas italianas exigen como mínimo 75 g de ácidos húmicos  $\text{kg}^{-1}$  de sólidos totales (Genevini *et al.*, 2002).

El pH es un parámetro indicador del grado de humificación de la materia orgánica y, por lo tanto, de su madurez; al inicio, en general, es menor que 5.5, debido a la generación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, en tanto que al alcanzar la madurez, se eleva hasta valores alcalinos, en ocasiones hasta mayores que 7.5 (Lee *et al.*, 2002). Otro de los parámetros que con frecuencia se utiliza para estimar la madurez de un compost es la relación C/N, aunque no ha habido un acuerdo universal en el valor de ésta; por ejemplo, hay investigadores que consideran el valor de 12 como indicador de su madurez (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1992); otros lo ubican en menos de 15 (Allison, 1973); hay quienes indican que cuando el material tiene una relación C/N < 50% respecto a su valor original, el compost está maduro (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1989).

Aunque la relación C/N de un compost tiende a declinar conforme progresa el proceso de

humificación, su determinación aislada en ocasiones resulta insatisfactoria en la estimación del grado de madurez, ya que, con frecuencia, se aplican materiales nitrogenados para acelerar el proceso.

Por su contenido de sustancias húmicas, los composts tienen alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y algunos efectos específicos sobre el crecimiento de las plantas (Benedetti *et al.*, 1994; Senesi y Loffredo, 1999), debido a que la actividad de las sustancias húmicas es muy parecida a la del ácido indolacético (Nardi *et al.*, 2000).

Un compost adquiere su madurez cuando el valor de su CIC llega a ser mayor que  $67 \text{ me } 100 \text{ g}^{-1}$  y el de la relación C/N < 12 (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1992).

La CIC de un compost se relaciona estrechamente con el grado de humificación (Harada e Inoko, 1980a) y sus valores pueden emplearse para estimar su grado de madurez. La CIC de un compost se incrementa al decrecer la relación C/N; estos parámetros se relacionan a través del modelo de regresión:

$$\ln \text{CIC} = 7.02 - 1.02 \ln \text{C/N}$$

con el coeficiente de regresión  $r = -0.903$  (Harada e Inoko, 1980b); sin embargo, los reactivos para medirla en los suelos disuelven materia orgánica, y los valores obtenidos son irreales. Para evitar este problema, se aplicó la técnica siguiente: 1) saturación de la muestra de compost con  $\text{H}^+$  mediante su lavado con solución de HCl 0.05 N; 2) remoción del  $\text{H}^+$  de la solución a través de un lavado con acetato de bario 1.0 N; 3) titulación del  $\text{H}^+$  removido.

La CIC de los extractos húmicos de los productos humificados del follaje y raíces de trébol y trigo se incrementa significativamente con el tiempo de humificación; la mayor parte de los incrementos suceden durante las primeras 12 semanas; posteriormente, los valores continúan incrementándose, pero a una tasa menor; los incrementos se deben, principalmente, al cambio en el contenido de los grupos carboxílicos. Sin embargo, el valor de este parámetro en las sustancias húmicas disminuye con el aumento de la polimerización, debido al progreso de la humificación (Dubach y Mehta, 1977).

La CIC de los ácidos húmicos tiende a ser más alta al inicio de la humificación, mientras que, al avanzar el proceso, las fracciones más humificadas muestran valores más bajos de ésta [Kawaguchi y Kyuma, citados por Harada e Inoko (1975)].

El índice  $E_4/E_6$  es la relación de densidades ópticas de los ácidos húmicos (465 nm/665 nm); indica la relación inversa entre el grado de humificación y el de condensación de sus componentes alifáticos y aromáticos (Chen *et al.*, 1977). Las fracciones húmicas con mayor tamaño molecular y baja relación  $E_4/E_6$  están constituidas por componentes alifáticos, principalmente, mientras que aquéllas con menor tamaño molecular tienen mayores componentes aromáticos (Anderson y Hepburn, 1977).

La absorción de la luz de los ácidos húmicos depende directamente del grado de condensación de sus anillos aromáticos. Una baja relación  $E_4/E_6$  indica alto grado de condensación de constituyentes húmicos aromáticos; inversamente, una alta relación  $E_4/E_6$  indica bajo grado de condensación aromática (Kononova *et al.*, 1966).

Relaciones  $E_4/E_6$  bajas están asociadas con tamaños moleculares, pesos moleculares y contenido de C alto, y con contenido de O, grupos carboxílicos y acidez total bajo (Chen *et al.*, 1977).

Debido a que no existen trabajos que caractericen las variables químicas de los composts de cachaza de caña de azúcar de los ingenios azucareros en México, el objetivo del presente trabajo fue evaluar algunas características químicas de un compost de cachaza de caña de azúcar con diferentes períodos de humificación y su efecto sobre el rendimiento de zarzamora (*Rubus spp.*) variedad "Brazos" cultivada en condiciones controladas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo con suelos del área productora de zarzamora del municipio de Ziracuaretiro, Michoacán, México. El suelo es un Luvisol crómico (INEGI, 1985), su pH se midió en una suspensión suelo:agua 1:2.5, se empleó un potenciómetro con electrodos de vidrio-calomel. El N se determinó con el método kjeldahl (Bremner, 1996), el P con la técnica Bray  $P_1$ , (Bray y Kurtz, 1945), K, Ca y Mg mediante el acetato de amonio pH = 7.0 (Jackson, 1958) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis químico del suelo.

pH $H_2O$	MO	C	N	C/N	$P_{tot}$ extractable	Bray $P_1$	K	Ca	Mg
	----- % -----				mg $kg^{-1}$		----- $cmol_c kg^{-1}$ -----		
6.05	5.80	3.37	0.29	11.63	4.00		1.29	6.00	4.25

MO = materia orgánica, N = nitrógeno, P = fósforo, K = potasio, Ca = calcio, Mg = magnesio.

La cachaza se obtuvo en el ingenio de Taretan, Michoacán, México, y se sometió a un proceso de compostaje de aireación pasiva; se alcanzaron temperaturas de 75 °C en su fase termofílica las cuales se abatieron moviendo mecánicamente el material e inyectando agua hasta alcanzar 60% de su capacidad de retención. De las pilas se tomaron muestras con diferentes períodos de humificación (0, 8, 12, 24 y 36 meses). El análisis químico practicado a los composts fue pH, se midió en una suspensión compost:agua y compost:solución de KCl 1.0 N a una relación 1:15, se utilizó un potenciómetro con electrodos de vidrio-calomel. El  $\Delta pH$  se calculó con la fórmula  $pH_{(KCl)} - pH_{(H_2O)}$ . La CIC se midió con la técnica desarrollada por Harada e Inoko (1980a) (el pH de la solución desplazante se ajustó al de cada compost). La extracción de los ácidos húmicos se llevó a cabo mediante una mezcla de hidróxido de sodio 0.1 N y pirofosfato de sodio 0.1 M de acuerdo con Kononova *et al.* (1966). El contenido total de grupos funcionales se determinó por el método propuesto por Dragunova, citado por Kononova *et al.* (1966). El C se determinó con el equipo Shimadzu TOC-5050A (Shimadzu Scientific Instrument, Columbia, MD) con un automuestreador ASI 5000A total organic carbon analyzer Shimadzu. El contenido de N total se determinó mediante el método kjeldahl (Bremner, 1996). La relación  $E_4/E_6$  se obtuvo al dividir la absorbancia de los ácidos húmicos a la longitud de onda 465 nm entre la absorbancia a 665 nm (Chen *et al.*, 1977). Se usó el equipo CARY 50 Conc. UV-Visible Spectrophotometer de VARIAN.

Se condujo un experimento en invernadero para estudiar la respuesta de la zarzamora variedad Brazos a la adición de composts con diferentes tiempos de humificación (0, 8, 12, 24 y 36 meses) y diferentes dosis (0, 1.875, 3.75, 7.5, y 15 g  $kg^{-1}$  de suelo); se empleó un arreglo factorial 5 x 5; el diseño experimental fue bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental consistió de una maceta con 1 kg de suelo y una planta de zarzamora. A cada unidad experimental se agregó el compost correspondiente de acuerdo con el tratamiento. Se fertilizó con 50, 50 y 100 mg de

N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup> de suelo. El suelo, compost y fertilizante se homogeneizaron y se regó periódicamente para mantener al suelo a capacidad de campo durante el ensayo. A 90 días después del trasplante, las plantas se cortaron 2 cm arriba del cuello de la raíz; se obtuvo su peso seco (en g). Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza, la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey, 0.05 y se practicó un análisis de regresión para conocer el grado de asociación entre las variables químicas y la biomasa de las plantas; se empleó el paquete SAS, Versión 6.09 (SAS Institute, 1996).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades químicas de los composts se vieron afectados por su tiempo de humificación; al incrementarse éste, causó una variación en el pH, ΔpH, el contenido de grupos funcionales totales y carboxílicos, en los ácidos húmicos, en las relaciones E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub>, en la C/N y en la CIC (Cuadro 2).

Al inicio de la humificación, el pH de la cachaza fue de 5.2 y se incrementó hasta 8.4 al transcurrir de 0 a 12 meses la humificación (mdh), para disminuir paulatinamente hasta 6 en el material con 36 meses de humificación. Al principio, probablemente, se formaron ácidos orgánicos de bajo peso molecular, como: el ácido acético, propiónico, butírico e isobutírico (Epstein *et al.*, 1976; Zucconi *et al.*, 1985); sin embargo, en los materiales con 24 y 36 mdh se ha dado el proceso de degradación de las sustancias húmicas, lo que genera una alta proporción de ácidos fenólicos y el incremento de la acidez, coincidiendo con Allison (1973).

El ΔpH de los composts indica la carga negativa de sus coloides; se presentó con mayor intensidad en los materiales con 8 y 12 mdh; esta situación probablemente sea la consecuencia de la abundancia de grupos funcionales OH, que son las fuentes de

sitios cargados negativamente a pH > 7.0 (Stevenson, 1994). Los ΔpH presentados por la cachaza sin humificar y los materiales con 24 y 36 mdh indican que es menor la intensidad de las cargas negativas, lo que implica que hay predominancia de grupos carboxílicos, pero poca disociación, la cual es dependiente del pH; es decir, la presencia de H<sup>+</sup> derivados de los ácidos orgánicos formados durante el proceso de humificación tiende a inhibir la disociación de grupos carboxílicos, y la reacción: R-COOH ↔ R-COO<sup>-</sup> + H<sup>+</sup> sucede hacia la izquierda (Rowell, 1994). El análisis de regresión para CIC *versus* tiempo de humificación dio un alto grado de ajuste con la curva de regresión; con un modelo cuadrático y coeficiente de determinación, R<sup>2</sup> = 0.7639. La CIC aumentó de 38.44 a 128.9 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> al pasar de 0 a 12 mdh y disminuyó a 56.18 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de compost a 36 mdh (Figura 1).

La reducción de la CIC, conforme avanzó el proceso de humificación de 12 a 36 meses, se debió al aumento del grado de polimerización con alta aromaticidad y menor contenido de grupos carboxílicos. Estos resultados concuerdan y corroboran los encontrados por Dubach y Mehta (1977). Esta tendencia sigue siendo consistente, incluso para el contenido de ácidos húmicos y grupos funcionales *versus* tiempo de humificación.

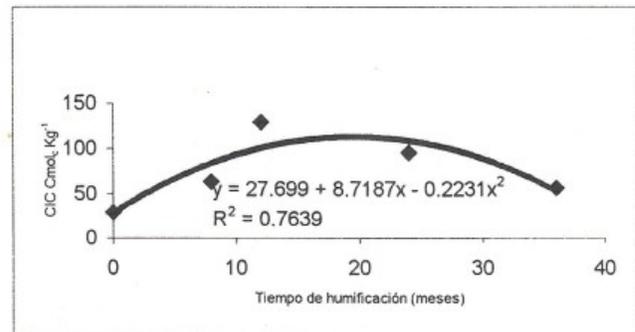


Figura 1. Variación de la CIC con el tiempo de humificación.

Cuadro 2. Análisis químico de cachaza con diferentes periodos de humificación.

Cachaza <sup>†</sup>	pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	ΔpH	Ácidos húmicos	Grupos func.	Grupos COOH	E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>	C	N	C/N	CIC
mdh				%	- -	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> - -		- - - - -	% - - - - -	- - - - -	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>
0	5.2	5.1	-0.10	4.17	20	17	4.7126	56.70	1.26	45.00	28.44
8	7.65	7.35	-0.30	8.80	500	409	3.8682	52.34	2.26	23.16	63.28
12	8.45	8.15	-0.30	11.24	664	560	2.8287	48.17	3.2	16.06	128.93
24	6.45	6.35	-0.10	12.95	481	379	2.1467	35.37	2.4	14.74	95.22
36	6.0	5.9	-0.10	8.92	438	347	1.6773	32.37	2.5	12.95	56.18

<sup>†</sup>mdh = meses de humificación.

En este trabajo pudo observarse que, conforme se incrementó el período de humificación de la cachaza, hubo un decremento en el contenido de C, en tanto que el contenido de N manifestó un comportamiento inverso; en consecuencia, la relación C/N decreció; de este modo, la cachaza presentó 56.7% de C con una relación C/N de 45, en tanto que en el compost con 36 mdh, el contenido de C fue 32.37%, y la relación C/N de 12.95. El análisis de regresión lineal para el contenido de C *versus* tiempo de humificación dio un alto grado de ajuste con una línea de regresión; con un modelo lineal y un coeficiente de regresión significativo,  $r = -0.9771$  (Figura 2).

El comportamiento de la relación  $E_4/E_6$  de los ácidos húmicos de los composts con diferentes tiempos de humificación siguió la misma tendencia, de lo cual se infiere (Kononova *et al.*, 1966; Piccolo, 2002) que, conforme avanzó ésta, hubo una condensación que originó moléculas húmicas con alta aromaticidad y tamaño molecular, pero con bajo contenido de grupos carboxílicos.

El análisis de regresión para la relación C/N *versus* tiempo de humificación dio un alto grado de ajuste con una línea cuadrática; con un modelo cuadrático y un coeficiente de regresión  $r = -0.9657$  (Figura 3).

Respecto a los resultados de biomasa obtenidos en invernadero, en la muestra de suelo sin adición de compost, la producción de materia seca fue inferior en comparación con la producida por aquéllas a las que se les adicionaron diferentes dosis de cachaza con distintos períodos de humificación; este comportamiento se explica al considerar el contenido de C y N, ya que la relación entre ellos es un indicador de la disponibilidad del N para las plantas.

En el caso de cachaza sin humificar con una relación C/N = 45, las plantas desarrolladas en

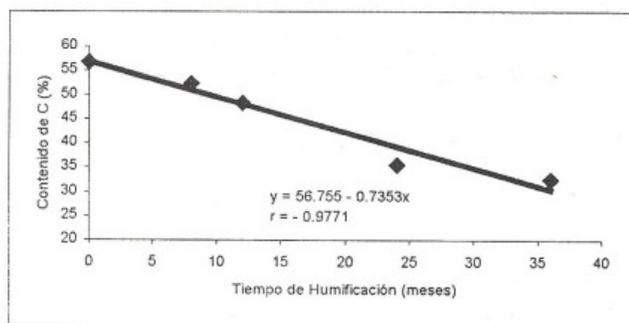


Figura 2. Relación entre el contenido de C y el tiempo de humificación.

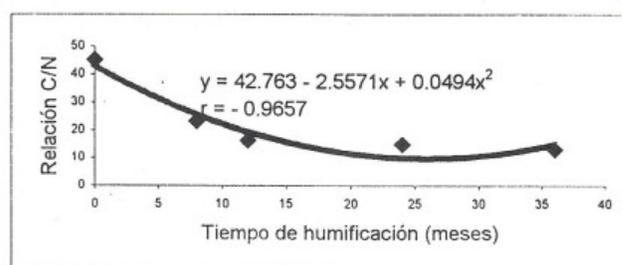


Figura 3. Variación de la relación C/N con el tiempo de humificación.

diferentes dosis de compost manifestaron síntomas de deficiencia de N debido a que las bacterias degradantes de la materia orgánica no lo encontraron en suficiente cantidad, por lo que lo tomaron del suelo afectando la nutrición de la planta; el efecto se vio más marcado en las plantas que se desarrollaron con dosis altas de cachaza.

Con la aplicación de compost al suelo, la producción de materia seca fue afectada por los distintos tiempos de humificación que influyeron en diversos grados sobre ella. Por ejemplo, ésta alcanzó un valor máximo con la dosis de compost de 1.875 y 3.750  $\text{g kg}^{-1}$  cuando el compost tuvo 12 mdh; por el contrario, las dosis de compost de 7.5 y 15.0  $\text{g kg}^{-1}$  de suelo produjeron su máximo rendimiento con la aplicación de cachaza humificada a 8, 24 y 36 meses (Cuadro 3).

El análisis de varianza indicó la diferencia altamente significativa ( $P \leq 0.01$ ) al comparar el rendimiento medio producido por la zarzamora con cachaza de diferente período de humificación, en sus diferentes dosis.

Al relacionar algunos parámetros químicos con el rendimiento de materia seca, se encontró que el análisis de regresión lineal para relación C/N *versus* producción de biomasa dio un alto grado de ajuste con la línea de regresión; con un modelo lineal y un coeficiente de regresión significativo,  $r = -0.987$  (Figura 4). En este caso, el material con 12 mdh presentó mayor CIC y mayor contenido de N que el material con 24 mdh, de ahí su mayor rendimiento de materia seca.

El análisis de regresión lineal para la CIC *versus* producción de biomasa, dio un alto grado de ajuste con la curva de regresión; con un modelo cuadrático y un coeficiente de determinación significativo,  $R^2 = 0.8019$  (Figura 5).

El análisis de regresión lineal para el contenido de grupos funcionales en los composts con los diferentes

Cuadro 3. Producción de materia seca de zarzamora.

Cachaza <sup>†</sup>	Dosis de cachaza (g kg <sup>-1</sup> de suelo)				
	0.000	1.875	3.750	7.500	15.000
mdh	g planta <sup>-1</sup>				
0	2.962 b <sup>†</sup> A <sup>‡</sup>	3.150 a B	3.465 a C	2.677 c D	2.455 d D
8	2.732 c A	3.300 c B	3.860 b C	4.220 a B	4.537 a B
12	2.927 d A	4.292 b A	4.847 a A	3.742 c C	3.785 c C
24	2.915 c A	2.835 c C	4.585 a A	4.625 a A	4.255 b B
36	2.837 c A	4.017 b A	4.317 b B	4.335 b A	5.165 a A

<sup>†</sup>mdh = meses de humificación. <sup>‡</sup>Valores con la misma letra dentro de hileras son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey,  $P \leq 0.05$ . <sup>§</sup>Valores con la misma letra dentro de columnas son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey,  $P \leq 0.05$ .

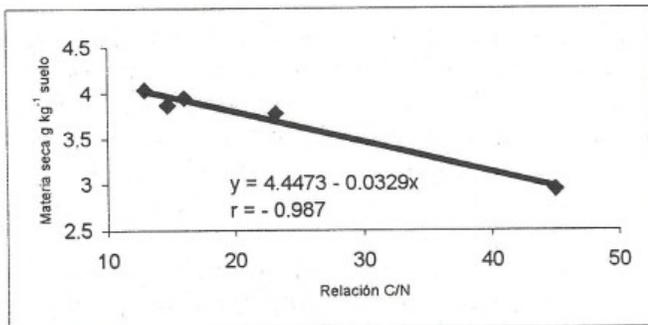


Figura 4. Comportamiento de la biomasa de zarzamora respecto a la relación C/N.

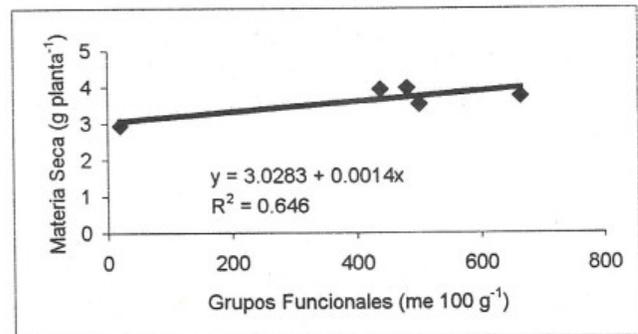


Figura 6. Comportamiento de la biomasa de zarzamora respecto a los grupos funcionales.

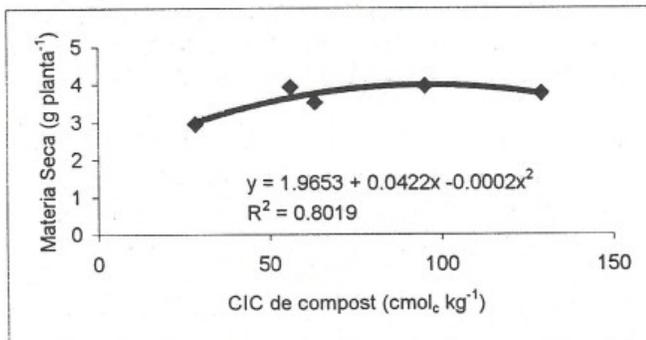


Figura 5. Comportamiento de la biomasa de zarzamora respecto a la CIC de los composts.

períodos de humificación *versus* producción de biomasa, dio un alto grado de ajuste con la línea de regresión; con un modelo lineal y un coeficiente de determinación significativo,  $R^2 = 0.646$  (Figura 6).

Esta tendencia sigue siendo consistente, incluso para los grupos carboxílicos de los ácidos húmicos contenidos en los composts con diferentes períodos de humificación.

El análisis de regresión para contenido de ácidos húmicos en los composts con diferentes grados de humificación *versus* producción de biomasa, dio un

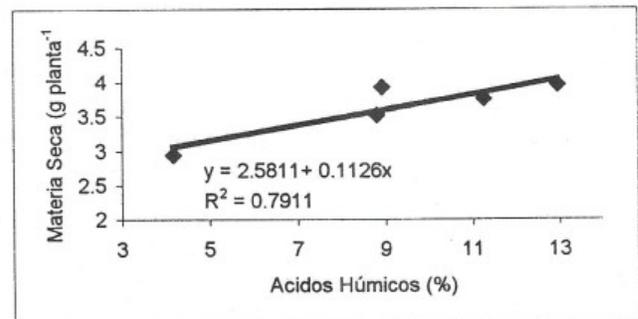


Figura 7. Comportamiento de la biomasa de zarzamora respecto al contenido de ácidos húmicos en los composts con diferentes grados de humificación.

alto grado de ajuste con la línea de regresión; con un modelo lineal y un coeficiente de determinación significativo,  $R^2 = 0.7911$  (Figura 7).

## CONCLUSIONES

- El período de humificación influyó significativamente sobre las características químicas de los composts.
- El pH, el contenido de ácidos húmicos y grupos funcionales totales y carboxílicos y la CIC,

aumentaron con el tiempo de humificación de 0 a 12 meses.

- Los ácidos húmicos continuaron incrementándose hasta 24 meses.

- Las relaciones C/N y  $E_4/E_6$  disminuyeron de 45 a 12.95 y de 4.7 a 1.7, respectivamente, durante el periodo de estudio (0 a 36 meses de humificación).

- El rendimiento de la zarzamora se vio afectado negativamente con la cachaza sin humificar; éste fue menor respecto al obtenido con cualquiera de los composts humificados.

- La dosis de  $3.75 \text{ g kg}^{-1}$  de suelo, con rendimiento de  $4.8 \text{ g planta}^{-1}$ , fue mejor respecto a las otras utilizadas, sobre la base de materia seca y tiempo de humificación requerido en el compost, para obtener este rendimiento.

### AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT, por el apoyo económico brindado para la realización del presente trabajo.

Al Ing. Saúl Salgado Soriano por su invaluable colaboración para realizar la presente investigación.

### LITERATURA CITADA

- Allison, E.F. 1973. Soil organic matter and its role in crop production. Elsevier. New York.
- Anderson, H.A. y A. Hepburn. 1977. Fractionation of humic acid by gel permeation chromatography. *J. Soil Sci.* 28: 634-644.
- Barzegar, A.R., A. Yousefi y A. Daryashenas. 2002. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant Soil* 295-301.
- Benediti, A., F. Alianello, S. Canali, G. Rossi y M.T. Dell'Abate. 1994. Effects of fertilization with humic acids on soil and plant metabolism: a multidisciplinary approach. Note II: Nitrogen dynamic and microbial turnover. pp. 233-237. *In: Senesi, N. y M.T. Miano (eds.). Humic substances in the global environment and implications on human health.* Elsevier. Bari, Italy.
- Bray, R.H. y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner, J.M. 1996. Total nitrogen. pp. 1085-1122. *In: Barteles, J.M. y J.M. Binham (eds.). Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Book Series 5. Soil Science Society of America-American Society of Agronomy. Madison, WI.*
- Chen, Y., N. Senesi y M. Schnitzer. 1977. Information provided on humic substances by  $E_4/E_6$  ratios. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 352-358.
- Clapp, C.E. y M.H.B. Hayes. 1999. Sizes and shapes of humic substances. *Soil Sci.* 164: 777-788.
- Dubach, P. y N.C. Mehta. 1977. The chemistry of soil humic substances. *Soils Fert.* 26: 293-300.
- Epstein, E., G.B. Willson, W.D. Burge, D.C. Mullen y N.K. Enkiri. 1976. A forced aeration system for composting of waste-water sludge. *J. Water Pollut. Contr. Fed.* 48: 688-694.
- Genevini, P., F. Adani, A.H.M. Veeken y B. Scaglia. 2002. Evolution of humic acid-like and core-humic acid-like during high-rate composting of pig faeces amended with wheat straw. *Soil Sci. Plant Nutr.* 48: 135-141.
- Hamza, M.A. y W.K. Anderson. 2002. Improving soil physical fertility and crop yield on a clay soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 53: 615-620.
- Harada, Y. y A. Inoko. 1975. Cation-exchange properties of soil organic matter. I. Effects of conditions for the measurement on cation-exchange capacity values of humic acid preparations. *Soil Sci. Plant Nutr.* 21: 361-369.
- Harada, Y. y A. Inoko. 1980a. The measurement of the cation exchange capacity of composts for the estimation of the degree of maturity. *Soil Sci. Plant Nutr.* 26: 127-134.
- Harada, Y. y A. Inoko. 1980b. Relationship between cation exchange capacity and degree of maturity of city refuse composts. *Soil Sci. Plant Nutr.* 26: 353-362.
- Iglesias-Jiménez, E. y V. Pérez-García. 1989. Evaluation of city refuse compost maturity: a review. *Biol. Wastes* 27: 115-142.
- Iglesias-Jiménez, E. y V. Pérez-García. 1992. Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agric. Ecosyst. Environ.* 38: 331-343.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1985. Síntesis geográfica del Estado de Michoacán. Carta estatal de suelos. Dirección General de Geografía. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F.
- Jackson, M.L. 1958. Soil chemical analysis. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- Klamer, M., A.M. Lind y W. Gams. 2001. Fungal succession during composting of *Miscanthus* straw and pig slurry. *Acta Hort.* 549: 37-45.
- Kononova, M.M., Z.T. Nowakowsky y D.C.A. Newman. 1966. Soil organic matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility. 2<sup>nd</sup> ed. Pergamon Press. New York.
- Lee, B.I., J.P. Kim y W.K. Chang. 2002. Evaluation of stability of compost prepared with Korean food wastes. *Soil Sci. Plant Nutr.* 48: 1-8.
- Nardi, S., D. Pizzeghello, F. Reniero y N. Rascio. 2000. Chemical and biochemical properties of humic substances isolated from forest soils and plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 639-645.
- Piccolo, A. 2002. The supramolecular structure of humic substances: A novel understanding of humus chemistry and implications in Soil Science. *Adv. Agron.* 75: 57-134.
- Rowell, L.D. 1994. Soil Science: methods and applications. Department of Soil Science, University of Reading. John Wiley. New York.
- SAS Institute, Inc. 1996. SAS user's guide: Statistics. Version 6.09. Cary, NC.
- Senesi, N. y E. Loffredo. 1999. The chemistry of soil organic matter. pp. 239-370. *In: Sparks, L.D. (ed.). Soil physical chemistry. 2nd edition. CRC Press. Boca Raton, FL.*
- Stevenson, F.J. 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2nd ed. Wiley. New York.

Zaman, M., H.J. Di, K. Sakamoto, S. Goto, H. Hayashi y K. Inubushi. 2002. Effects of sewage sludge compost and chemical fertilizer application on microbial biomass and N mineralization rates. *Soil Sci. Plant Nutr.* 48: 195-201.

Zucconi, F., A. Monaco, M. Forte y M. de Bertoldi. 1985. Phytotoxins during the stabilization of organic matter. pp. 73-86. *In*: Gasser, J.K.R. (ed.). *Composting of agricultural and other wastes*. Elsevier. London, UK.

# DERRAMES DE PETRÓLEO EN SUELOS Y ADAPTACIÓN DE PASTOS TROPICALES EN EL ACTIVO CINCO PRESIDENTES, TABASCO, MÉXICO

Oil Spills on Soils and Adaptation of Tropical Grass in Activo Cinco Presidentes, Tabasco, Mexico

Joel Zavala-Cruz<sup>1†</sup>, Francisco Gavi-Reyes<sup>2</sup>, Randy Howard Adams-Schroeder<sup>3</sup>,  
Ronald Ferrera-Cerrato<sup>2</sup>, David J. Palma-López<sup>1</sup>, Humberto Vaquera-Huerta<sup>4</sup> y  
J.M. Domínguez-Ezquivel<sup>5</sup>

## RESUMEN

El Activo Cinco Presidentes registra la mayor cantidad de derrames de petróleo en suelos, lo cual ocasiona daños al pastizal y a la vegetación natural, en el estado de Tabasco, México. Esta situación demanda estudiar el efecto del petróleo en el suelo y buscar tecnologías alternativas para su recuperación. Los objetivos de este estudio fueron evaluar el efecto del derrame de petróleo sobre las propiedades de cinco unidades de suelo y la producción de biomasa seca de tres pastos tropicales en suelos contaminados por dichos derrames. En los derrames, detectados en diferente unidad de suelo, se colectaron muestras de suelo inalteradas (MSI) con tubos de PVC de 20 cm de diámetro y 30 cm de altura, en cada una de las cuatro zonas detectadas visualmente, en función del color: centro, orilla, manchas y sin manchas. Bajo malla sombra se trasplantaron y cultivaron tallos de las especies: *Brachiaria humidicola* [(Rendle) Sch.], en MSI de Antrosoles y Acrisoles; *Echinochloa polystachya* [(H.B.K.) Hitchcok], en MSI de Gleysols1; y *Brachiaria mutica* [(Forksskal) Stapf], en MSI de Gleysols2 e Histrosoles. El ensayo se condujo con un diseño completamente al azar y con cuatro repeticiones. Los derrames de petróleo incrementaron el contenido de materia orgánica en el Antrosol, el Acrisol y el Gleysol1; de Na, en el Gleysol; y la acidez, en el Acrisol y el Gleysol1. El petróleo afectó, de manera negativa, los pastos, en

la fase de establecimiento y, de manera positiva, una vez que la planta estaba mejor desarrollada. Todos los pastos, nutridos adecuadamente con P y Ca, pueden contribuir a fitorremediar los suelos contaminados; sin embargo, el más promisorio es el pasto humidícola, en Antrosoles.

*Palabras clave:* contaminación por hidrocarburos, biomasa, fitorremediación, suelos tropicales.

## SUMMARY

Activo Cinco Presidentes has the highest number of oil spills on soil, causing damage to grassland and natural vegetation, in the state of Tabasco, Mexico. This makes a study of the effect of oil on the soil and the search for alternative technologies for its recovery necessary. The objectives of the study were to evaluate the effect of oil spills on the properties of five soil units, and dry biomass production of three tropical grasses in soils contaminated by these spills. From the spills, detected in different soil units, unaltered soil samples (USS) were collected with 20 cm diameter and 30 cm long PVC tubes, in each one of the four zones visually detected in function of their color: center, edge, spotted, and without spots. Under a shade awning, stems of the species *Brachiaria humidicola* [(Rendle) Sch.] were transplanted and grown in USS of Anthrosols and Acrisols, *Echinochloa polystachya* [(H.B.K.) Hitchcok] in USS of Gleysols1, *Brachiaria mutica* [(Forksskal) Stapf] in USS of Gleysols2 and Histrosoles. The practice was done under a completely random design with four replications. The HTP increased organic matter content in Anthrosols, Acrisols and Gleysols1, Na in Gleysols, and acidity in Acrisols and Gleysols1. Oil negatively affected the grasses in the establishing phase and positively once the plant was better developed. All the grasses, properly nurtured with P and Ca, can contribute to the phytoremediation of the contaminated soils,

<sup>1</sup> Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados, <sup>2</sup> Instituto de Recursos Naturales, <sup>4</sup> Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México.

<sup>†</sup> Autor responsable (joel\_zavala@yahoo.com.mx)

<sup>3</sup> División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

<sup>5</sup> Ingeniería Molecular de Nuevos Materiales, Instituto Mexicano del Petróleo.

humidícola grass being the most promising in Anthrosols.

*Index words:* contamination by hydrocarbons, biomass, phytoremediation, tropical soils.

## INTRODUCCIÓN

El Activo Cinco Presidentes (ACP) registra la mayor cantidad de derrames de petróleo de varios años, lo cual ha contaminado el suelo y reducido el desarrollo del pastizal y la vegetación natural, en el estado de Tabasco. En el suelo, la fracción de n-alcanos de bajo (C5-C9) y medio (C10-C18) peso molecular y los hidrocarburos aromáticos se volatilizan o degradan con cierta facilidad, pero los de alto peso molecular [n-alcanos C20 a C40, los aromáticos polinucleares (HAP), asfaltenos y resinas] se degradan lentamente, debido a su baja solubilidad (Cole, 1994; Rosenberg y Ron, 1996; Eweis *et al.*, 1998). Estos son los que causan mayor preocupación, ya que son los que impiden, por mayor tiempo, el desarrollo de especies vegetales.

El contenido de carbono orgánico en el suelo se incrementa debido a la oxidación de los hidrocarburos (Al-Sarawi y Massoud, 1998; Martínez y López, 2001). Las fracciones del petróleo se alojan como gotas en los poros o pueden ser sorbidas por la materia orgánica (MO) y la arcilla (Fine *et al.*, 1997), sobre todo los HAP (Mueller *et al.*, 1996).

Li *et al.* (1997) y Riser-Roberts (1998) mencionaron que el petróleo disminuye el pH del suelo y Li *et al.* (1997) y Martínez y López (2001) indicaron que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) no es afectada por el petróleo en el suelo.

Chaineau *et al.* (1996) registraron disminución en el rendimiento de maíz y trigo en suelos con 200 a 800 mg kg<sup>-1</sup> de aceite combustible y Li *et al.* (1997) concluyeron que el cultivo de cebada en suelos con 20 000 y 40 000 mg kg<sup>-1</sup> de HTP fue afectado en el rendimiento de biomasa.

En años recientes, la fitorremediación de suelos con petróleo se ha convertido en una tecnología alternativa, en virtud de su bajo costo y porque reduce el riesgo para la salud humana y el ecosistema (Cunningham *et al.*, 1996; Sicilliano y Germida, 1998). Esta tecnología consiste en el uso de plantas verdes que aceleran la pérdida de hidrocarburos en el suelo por procesos de volatilización (Hou *et al.*, 2001) y degradación rizosférica, con la participación de microorganismos estimulados por los exudados de las

raíces (Cunningham *et al.*, 1996). Las gramíneas poseen un sistema de raíces fibrosas que proveen gran área superficial para los microorganismos de la rizosfera, por lo que tienen el potencial para fitorremediar suelos contaminados con petróleo (Reilley *et al.*, 1996; Hou *et al.*, 1999; Banks *et al.*, 2000).

En el estado de Tabasco se conocen poco los efectos que el petróleo causa a los suelos y, aunque se ha observado que plantas gramíneas crecen en suelos con derrames de petróleo, se desconoce si éstas contribuyen a la fitorremediación, por lo que este trabajo tuvo como objetivos evaluar el efecto del derrame de petróleo sobre las propiedades de cinco unidades de suelo y la producción de biomasa seca de tres pastos tropicales en suelos contaminados por dichos derrames como indicador de su potencial para fitorremediar el área de explotación de hidrocarburos ACP, en el estado de Tabasco.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los suelos estudiados, de acuerdo con la clasificación WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999) corresponden a: Antrosol distri-hórtico, en la Batería 5 del campo petrolero (CP) Cinco Presidentes; Acrisol antri-férrico, en el Pozo 615 del CP Pajonal; Gleysol toxi-mólico, en la Batería 7 del CP Tucán; Gleysol mólico, en la Batería La Venta Norte, e Histosol toxi-sáprico, en el Pozo 86 del CP Blasillo. Dichos suelos, en lo sucesivo, se denominarán: AT, AC, GL1, GL2 y HS, respectivamente. La saturación de bases de los suelos GL1 y GL2 es de 50 a 79% y > 80%, respectivamente, en todas las partes entre 20 y 100 cm desde la superficie del suelo; además, el horizonte A del GL1 tiene nódulos de petróleo color negro (7.5YR 2/0), los cuales indican presencia de material acumulado por actividad humana. Los derrames de petróleo seleccionados corresponden a diferente unidad de suelo y tuvieron edades de 0.5 a 10 años. Cada derrame se zonificó arbitrariamente, en forma radial y en función del color, en: centro (C), orilla (O), manchas (M) y sin manchas (S). La selección de la zona S tuvo el propósito de hacer comparaciones entre este suelo sin contaminación aparente *versus* los suelos de las zonas visualmente contaminadas con petróleo.

Cuatro muestras de suelo inalteradas (MSI) se colectaron en cada zona de los derrames (C, O, M y S), con tubos de PVC de 20 cm de diámetro y 30 cm de altura, y se obtuvo un promedio de 12 kg de

material por cada MSI. Muestras de suelo, compuestas de cuatro submuestras, se colectaron con barrena a 0 a 30 cm de profundidad, alrededor de las MSI, para analizar las propiedades físicas, químicas y el contenido de HTP. Las muestras se colocaron en bolsas de plástico, y aquéllas para cuantificar nitrógeno mineral y HTP se colocaron en una nevera con hielo a 4 °C.

Se usaron tallos de tres meses de edad de los pastos humidícola [*Brachiaria humidicola* (Rendle) Sch.], alemán [*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchcock] y egipto [*Brachiaria mutica* (Forsk.) Stapf]. Con la combinación de las unidades de suelos (con derrames de petróleo) y los pastos, se obtuvieron 20 tratamientos que se evaluaron bajo malla sombra durante tres meses y medio, con un diseño completamente al azar, con cuatro repeticiones. Los pastos usados en este estudio, en la zona, se usan como forraje para el ganado bovino. Los tallos de pastos colectados junto a los derrames de petróleo se trasplantaron en grupos de tres, a 15 cm de profundidad, en cada una de las MSI. A cada una de éstas se aplicaron sales solubles antes del trasplante y después del primer corte de biomasa, con los siguientes nutrimentos: N (29.2 mg kg<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), P (0.97 g kg<sup>-1</sup> de NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O), K (0.79 g kg<sup>-1</sup> de KCl), Ca (0.74 g kg<sup>-1</sup> de Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O) y Mg (0.25 g kg<sup>-1</sup> de MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O). Las MSI recibieron la misma cantidad de lluvia y agua de riego en los días soleados y la humedad se mantuvo al menos a 90% de la capacidad de campo, la cual se controló por el método gravimétrico.

Los tallos y las hojas se colectaron en los dos ciclos; la raíz se obtuvo al final del segundo ciclo. La biomasa se secó en estufa a 70 °C durante 24 h y se pesó en balanza analítica. Al final del último ciclo, en cada MSI, se colectó una muestra de suelo, compuesta de tres submuestras, para cuantificar propiedades físicas y químicas del suelo y HTP.

El contenido de HTP se cuantificó por el método de EPA 9074 (EPA, 1998). Las muestras de suelo se analizaron en húmedo y los HTP se extrajeron con metanol. Éste se recuperó a través de un filtro y se mezcló con un reactivo propiedad del fabricante (Dexil). La turbidez producida por los hidrocarburos en la mezcla se midió con un analizador con espectrómetro en el rango visible. La lectura de la turbidez se comparó con el resultado de una calibración preestablecida, utilizando estándares del fabricante. El equipo tiene un grado de detección de 550 mg kg<sup>-1</sup> de HTP y se recalibró después de analizar

lotes de 30 muestras o cuando la temperatura del laboratorio varió más de 2 °C.

Las muestras de suelo para análisis físicos y químicos se secaron a la sombra. El contenido de MO se cuantificó mediante digestión húmeda por el método de Walkley-Black (León y Aguilar, 1987). El suelo se trató con una solución de dicromato de potasio, seguida de la adición de ácido sulfúrico concentrado. A la muestra, enfriada y diluida, se le adicionó ácido fosfórico y el exceso de ácido crómico se tituló con difenilamina-sulfonato de bario como indicador. Sólo en el HS, cuyo contenido de MO es superior a 10%, la MO se cuantificó por el método de combustión seca o calcinación a 375 °C en una mufla por 16 h.

La textura se determinó por el método de la pipeta (Van Reeuwijk, 1995); el nitrógeno total (NT) mediante macrokjeldahl y el nitrógeno mineral extraíble con KCl 2 N (Etchevers, 1987); el fósforo extractable P por el método Olsen (Cajuste, 1987); las bases intercambiables y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), utilizando AcONH<sub>4</sub> 1 N pH 7 como extractante (Aguilar, 1987).

Para garantizar la confiabilidad de los datos de cada propiedad, se duplicó 10% de las muestras analizadas. El laboratorio cuenta con un patrón de referencia interno, participa en el programa de calidad e intercomparación de análisis de suelo y los equipos usados se calibran con estándares específicos.

Se realizaron ANOVAS ( $\alpha \leq 0.05$ ) y la prueba de diferencia significativa honesta, DSH<sub>0.05</sub> (Steel y Torrie, 1960), para las variables HTP, hoja + tallo, raíz, pH, MO, Nt, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, P, K, Ca, Na, Mg, CIC, arena y arcilla. Se generaron modelos de regresión por el método stepwise y con este propósito se utilizó el paquete estadístico SPSS 10 para Windows 1999 (Darren y Mallery, 2000).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Contenido de Hidrocarburos en Suelos

Al inicio del experimento, de acuerdo con el Cuadro 1, en los suelos muestreados en las zonas denominadas C y O, excepto en la O del suelo GL2, el contenido de HTP varió entre 7782 y 15 324 mg kg<sup>-1</sup>. En las otras zonas muestreadas, se observaron de bajas a muy bajas ( $\leq$  límite detección 550 mg kg<sup>-1</sup>) cantidades de HTP, excepto en el GL1 y el HS, en los cuales se detectaron valores de contaminación por petróleo mayores que 1000 mg kg<sup>-1</sup>, según lo

Cuadro 1. Hidrocarburos totales del petróleo en suelos cultivados con pastos tropicales.

Suelo	Pasto	Derrame de petróleo		Distancia del derrame	Ciclo	HTP <sup>1</sup>	DSH <sub>0.05</sub> <sup>§</sup>
		Edad	Zona <sup>†</sup>				
		años		m		mg kg <sup>-1</sup>	
Antrosol	Humidícola	10	C	0	Inicio	8 569 a <sup>¶</sup>	3 801
			O	2		11 338 a	
			M	30		< 550 c	
			S	50	Final	< 550 c	
			C			1 409 c	
			O			7 708 ab	
			M			< 550 c	
Acrisol	Humidícola	3	C	0	Inicio	15 324 a	6 195
			O	3		11 686 ab	
			M	20		< 550 c	
			S	66	Final	< 550 c	
			C			10 071 ab	
			O			6 060 bc	
			M			< 550 c	
Gleysol1	Alemán	2	C	0	Inicio	14 151 b	11 360
			O	8		9 009 bc	
			M	40		8 770 bc	
			S	110	Final	6 761 bc	
			C			35 108 a	
			O			10 239 bc	
			M			6 285 bc	
Gleysol2	Egipto	0.5	C	0	Inicio	8 061 a	6 332
			O	4		571 b	
			M	8		< 550 b	
			S	60	Final	< 550 b	
			C			2 627 ab	
			O			< 550 b	
			M			< 550 b	
Histosol	Egipto	3	C	0	Inicio	7 782 b	11 283
			O	2		8 679 b	
			M	5		11 376 ab	
			S	70	Final	9 015 b	
			C			21 351 a	
			O			6 702 b	
			M			6 786 b	
			S			2 997 b	

<sup>†</sup> C = centro, O = orilla, M = manchas, S = sin manchas; <sup>1</sup> HTP = hidrocarburos totales del petróleo; <sup>§</sup> DSH = mínima diferencia significativa. <sup>¶</sup> Cantidades seguidas de letras diferentes en la misma columna y en el mismo suelo son estadísticamente diferentes de acuerdo con su DSH<sub>0.05</sub>.

propuesto por Li *et al.* (1997). El contenido de HTP, encontrado al final, indica que únicamente en la zona N del AT hubo disminución significativa, con respecto al inicio del experimento (Cuadro 1), pero las pérdidas variaron entre 23 y 100% en las zonas del derrame de los otros suelos, excepto en el C y O del GL1 y C del HS. En los suelos bien drenados (RG y

LU), la contaminación por petróleo no rebasa la orilla del derrame, pero en los suelos GL y HS, sujetos a inundación, el petróleo hidrofóbico flota y, mediante las corrientes de agua, se extiende desde el derrame hasta 70 y 110 m de distancia y se impregna en el horizonte superficial del suelo, al descender el nivel del agua.

**Efecto de los Hidrocarburos en Propiedades del Suelo**

Las propiedades determinadas a los suelos estudiados, para cada una de las zonas muestreadas en

los derrames, se muestran en el Cuadro 2. Las propiedades que indican alteraciones por el petróleo son: MO y Na, que presentan una tendencia a disminuir su contenido, al pasar de mayor a menor contenido de HTP, en los suelos AT, AC y GL1, y

**Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de suelos con derrame de petróleo.**

Suelo <sup>†</sup>	Ciclo	Zona <sup>‡</sup>	pH 2:1	Materia orgánica	Nitrógeno total	NH <sub>4</sub> <sup>§</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>¶</sup>	P <sup>#</sup>	K <sup>  </sup>	
				%						mg kg <sup>-1</sup>
AT	1	C	5.0 b <sup>††</sup>	2.3 a		39.7 a	56.7 a	3.27 abcde	0.05 a	
		O	5.0 b	1.9 ab		87.9 a	5.8 a	0.83 e	0.06 a	
		M	5.5 a	1.5 bc		18.3 a	41.4 a	1.19 cde	0.07 a	
		S	5.0 b	0.9 de		37.8 a	25.6 a	1.73 cde	0.10 a	
	2	C		0.9 de	0.05 ab	110.6 a	97.8 a	4.44 ab	0.09 a	
		O		0.9 de	0.05 ab	33.2 a	35.2 a	5.28 a	0.07 a	
		M		1.2 cd	0.06 a	31.7 a	24.3 a	3.75 abc	0.07 a	
		S		0.7 e	0.03 b	15.9 a	12.4 a	3.47 abcd	0.07 a	
		DSH 0.05		0.4	0.5	0.02	95.3	123.3	2.61	0.06
	AC	1	C	4.6 b	10.9 a		32.2 ab	6.4 bcd	2.86 a	0.10 de
O			4.6 b	6.1 b		17.7 b	13.9 abcd	3.27 a	0.16 cd	
M			4.7 a	1.5 d		17.7 b	7.1 bcd	2.65 a	0.26 ab	
S			5.2 a	1.6 d		89.7 a	17.3 abc	2.62 a	0.08 e	
2		C		6.0 bc	0.25 a	18.6 b	3.1 d	5.84 a	0.16 cd	
		O		3.4 bcd	0.14 b	4.9 b	1.7 d	1.90 a	0.19 bc	
		M		1.1 d	0.04 c	20.0 b	23.3 a	2.25 a	0.29 a	
		S		1.4d	0.06 bc	23.0 ab	21.3 ab	13.66 a	0.11 de	
		DSH 0.05		0.6	3.2	0.10	67.6	15.6	12.52	0.08
GL1		1	C	4.5 c	11.4 ab		454.9 a	91.3 a	22.39 ab	0.49 abc
	O		5.0 bc	7.8 bcd		149.8 a	36.8 a	22.18 ab	0.65 a	
	M		5.4 ab	9.3 bcd		130.6 a	60.0 a	15.70 b	0.39 bcd	
	S		5.7 a	5.1 d		104.7 a	46.3 a	21.69 ab	0.58 ab	
	2	C		14.6 a	0.33 a	8.5 a	5.7 a	23.29 a	0.28 d	
		O		11.1 abc	0.25 b	111.8 a	89.5 a	20.62 ab	0.40 bcd	
		M		8.7 bcd	0.20 b	34.9 a	28.2 a	16.30 b	0.34 cd	
		S		4.9 d	0.20 b	97.7 a	56.5 a	21.30 ab	0.37 cd	
		DSH 0.05		0.7	5.2	0.07	612.0	194.4	6.81	0.20
	GL2	1	C	5.4 a	8.2 a		343.3 a	223.6 a	10.35 ab	0.18 b
O			5.4 a	5.4 a		148.3 ab	28.7 a	9.05 ab	0.17 b	
M			5.4 a	6.3 a		138.0 b	58.7 a	5.84 b	0.16 b	
S			5.6 a	6.3 a		213.8 ab	89.3 a	11.87 a	0.16 b	
2		C		8.3 a	0.37 a	36.4 b	24.0 a	8.94 ab	0.22 b	
		O		7.8 a	0.35 a	197.5 ab	161.0 a	10.42 ab	0.17 b	
		M		5.9 a	0.27 a	84.9 b	57.7 a	10.70 ab	0.72 a	
		S		5.3 a	0.25 a	54.4 b	69.5 a	10.07 ab	0.30 b	
		DSH 0.05		0.3	4.0	0.18	200.5	380.0	5.86	0.33
HS		1	C	5.1 a	59.7 e		273.7 a	62.9 a	7.62 cd	0.72 a
	O		4.9 b	66.1 e		257.1 a	109.9 a	5.97 d	0.87 a	
	M		4.4 c	80.2 abc		305.9 a	49.7 a	9.07 cd	0.85 a	
	S		4.3 c	80.5 ab		331.4 a	107.2 a	9.95 cd	0.72 a	
	2	C		65.8 e	2.49 a	69.2 a	63.7 a	19.41 c	0.60 a	
		O		64.3 e	3.12 a	103.4 a	50.3 a	13.52 cd	0.73 a	
		M		83.1 a	4.07 a	79.9 a	17.7 a	46.76 a	1.01 a	
		S		78.6 abcd	3.85 a	101.5 a	16.2 a	45.78 ab	0.27 a	
		DSH 0.05		0.2	12.1	1.67	430.9	155.2	13.33	1.30

<sup>†</sup> AT = Antrosol, AC = Acrisol, GL1 = Gleysol, GL2 = Gleysol, HS = Histosol. <sup>‡</sup> C = centro, O = orilla, M = manchas, S = sin manchas. <sup>§</sup> NH<sub>4</sub> = amonio, <sup>¶</sup> NO<sub>3</sub> = nitrato, <sup>#</sup> P = fósforo extractable, <sup>||</sup> K = potasio intercambiable. DSH = mínima diferencia significativa. <sup>††</sup> En cada suelo, las cantidades seguidas de letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con su DSH<sub>0.05</sub>.

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de suelos con derrame de petróleo (Continuación).

Suelo <sup>†</sup>	Ciclo	Zona <sup>‡</sup>	Ca <sup>§</sup>	Mg	Na <sup>¶</sup>	CIC <sup>#</sup>	Arena	Arcilla
			cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>			%		
AT	1	C	1.58 ab	0.45 abc	0.14 a	7.6 a	91 a	0.7 a
		O	0.94 b	0.32 bc	0.08 ab	3.0 bcd	94 a	0.4 a
		M	2.59 a	0.57 ab	0.13 ab	3.8 bc	92 a	0.8 a
		S	1.54 ab	0.59 a	0.03 ab	3.9 b	94 a	0.3 a
	2	C	1.27 ab	0.34 abc	0.03 ab	3.1 bcd		
		O	1.05 b	0.31 bc	0.04 ab	2.4 bcd		
		M	2.37 ab	0.37 abc	0.01 b	3.3 bcd		
		S	1.02 b	0.30 c	0.01 b	1.7 d		
	DSH 0.05		1.46	0.27	0.13	1.8	4	1.4
AC	1	C	0.78 a	0.30 b	0.06 d	5.1 cd	79 ab	13 c
		O	1.52 a	0.70 ab	0.03 d	7.4 ab	57 c	33 ab
		M	1.30 a	0.82 a	0.05 d	7.8 a	49 d	35 a
		S	1.33 a	0.41 ab	0.08 d	4.9 cd	81 a	5 d
	2	C	0.86 a	0.45 ab	0.29 ab	3.2 d		
		O	1.13 a	0.70 ab	0.31 a	4.9 cd		
		M	1.38 a	0.70 ab	0.31 a	5.7 bc		
		S	1.02 a	0.37 b	0.25 abc	3.5 d		
	DSH 0.05		0.89	0.43	0.14	1.9	8	5.8
GL1	1	C	9.98 e	10.97 a	1.43 b	35.3 ab	1.0 a	59 a
		O	11.23 e	13.17 a	0.44 cde	33.8 abc	0.4 c	61 a
		M	12.47 e	13.99 a	0.54 cde	31.0 abc	0.3 c	58 a
		S	12.72 e	12.76 a	0.16 e	37.3 a	0.9 ab	61 a
	2	C	17.07 abcd	11.05 a	2.19 a	31.0 abc		
		O	17.27 abc	12.07 a	0.85 cd	31.4 abc		
		M	17.67 ab	12.62 a	0.93 bc	25.7 c		
		S	18.55 a	11.37 a	0.66 cde	32.3 abc		
	DSH 0.05		3.33	3.97	0.53	9.3	0.3	8
GL2	1	C	8.23 e	10.70 ab	1.22 a	31.5 ab	21 abc	49 b
		O	6.24 f	7.41 c	0.94 d	26.2 c	23 ab	53 b
		M	5.99 f	8.23 c	1.09 ab	26.8 c	29 a	49 b
		S	6.04 f	8.45 bc	1.08 bc	26.9 c	9 d	70 a
	2	C	12.88 ab	9.06 bc	0.14 e	27.7 bc		
		O	12.48 abc	7.81 c	0.13 e	26.2 c		
		M	11.33 bcd	6.99 c	0.14 e	24.0 c		
		S	13.93 a	11.94 a	0.21 e	32.9 a		
	DSH 0.05		1.79	2.44	0.14	4.1	8	8
HS	1	C	21.85 abcde	32.50 ab	7.50 abcd	66.9 a		
		O	26.70 a	32.52 a	11.07 abc	69.6 a		
		M	24.22 abc	28.77 abcdef	12.17 ab	72.2 a		
		S	26.07 ab	29.20 abcde	13.02 a	69.8 a		
	2	C	11.13 f	15.22 g	5.74 bcd	49.7 a		
		O	20.98 abcdef	30.40 abc	9.79 abcd	64.0 a		
		M	23.13 abcd	29.62 abcd	3.50 d	74.2 a		
		S	20.67 abcdef	24.90 abcdefg	3.80 d	72.2 a		
	DSH 0.05		10.50	10.92	6.58	26.3		

<sup>†</sup> AT = Antrosol, AC = Acrisol, GL1 = Gleysol, GL2 = Gleysol, HS = Histosol. <sup>‡</sup> C = centro, O = orilla, M = manchas, S = sin manchas. <sup>§</sup> Ca = calcio intercambiable, Mg = magnesio intercambiable, <sup>¶</sup> Na = sodio intercambiable, <sup>#</sup> CIC = capacidad de intercambio catiónico; DSH = mínima diferencia significativa. <sup>†</sup> En cada suelo, las cantidades seguidas de letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con su DSH<sub>0.05</sub>.

GL1 y GL2, respectivamente, en el ciclo uno; y el pH que disminuye, de acuerdo con el incremento de HTP, en los suelos AC y GL1, en el ciclo uno. En el ciclo dos, el Nt se incrementó de acuerdo con el valor de HTP, lo cual aparentemente está relacionado con la MO en los suelos RG, LU y GL1.

Al comparar cualquiera de las zonas muestreadas con derrame de petróleo con la zona S, se observó que, excepto en el GL2, el pH y la MO se modificaron, así como la CIC (excepto en el GL1 y HS) y al menos dos de los cationes determinados, debido a la cantidad de petróleo en la zona muestreada (Cuadro 2).

El mayor contenido de MO en los suelos con derrames de petróleo indica que esta propiedad retiene fracciones de HTP (Mueller *et al.*, 1996; Fine *et al.*, 1997; Al-Sarawi y Massoud, 1998). El aumento de la MO también puede ser resultado del método usado (Walkley-Black); ya que los hidrocarburos se cuantifican como carbono orgánico (Martínez y López, 2001). Las moléculas de petróleo, al reaccionar con el ácido sulfúrico concentrado y la solución diluida de dicromato de potasio (León y Aguilar, 1987), contribuyeron a sobreestimar el contenido real de MO en estos suelos.

El incremento de Na en los Gleysoles se asocia al petróleo procedente de yacimientos localizados en domos salinos. Al derramarse en el suelo, el petróleo aporta agua salada, lo cual aumenta la concentración de sales solubles como el Na (Cunningham *et al.*, 1996).

El aumento de la acidez en suelos con petróleo concuerda con lo observado por Li *et al.* (1997) y Riser-Roberts (1998) en suelos con petróleo.

#### Efecto de Hidrocarburos y Propiedades de Suelos en la Biomasa de Pastos

El rendimiento de la biomasa (tallos, hoja y raíz) de los pastos para cada unidad de suelo se presenta en el Cuadro 3. De acuerdo con la prueba de medias, se observa que la zona de derrame de petróleo tuvo efecto negativo en el rendimiento de materia seca del tallo y hoja de pasto humidícola en los suelos RG y LU, para el primer ciclo. En el segundo ciclo, las dos zonas menos contaminadas del derrame de petróleo mostraron mayor biomasa de tallo y hoja en el GL2, y tallo, hoja y raíz en el HS, con respecto a la zona C.

El análisis de regresión múltiple para las variables dependientes hoja, tallo y raíz, usando como variables independientes MO, NH<sub>4</sub>, K, Mg, CIC, NO<sub>3</sub>, P, Ca y HTP, indicó que las cinco últimas contribuyen significativamente a explicar la variabilidad de la biomasa. Los mejores modelos, con base en la R<sup>2</sup> para hoja, tallo y raíz, en dos ciclos de los pastos, se presentan en el Cuadro 4.

Estos modelos indican que los HTP afectaron adversamente el desarrollo de hoja y tallo, en el ciclo uno, y positivamente la biomasa de hoja, tallo y raíz, en el ciclo dos. El impacto negativo de los HTP coincide con el observado para las gramíneas maíz, trigo y cebada durante las etapas de emergencia y establecimiento de la planta (Chaineau *et al.*, 1996, 1997; Li *et al.*, 1997). El efecto positivo de los HTP en los pastos indica que, a 3.5 meses, las gramíneas se habían establecido mejor en el suelo con petróleo, en concordancia con Lindau y Delaune (2000) quienes concluyeron que los hidrocarburos del petróleo incrementaron la biomasa y densidad de tallos de *Spartina lancifolia*, con respecto a sitios control.

El rendimiento de biomasa seca de los pastos en la segunda cosecha fue similar o mayor, respecto a la primera, excepto el del pasto egipcio en el GL2, lo que indica que los pastos se adaptaron a los suelos contaminados con petróleo crudo. Es posible que los pastos alemán y egipcio hayan desarrollado mecanismos de adaptación a los suelos con moderadas concentraciones de petróleo, durante cuatro décadas, y en asociación con microorganismos de la rizosfera provoquen la disminución de HTP en todos los suelos, como lo observado en las zonas de mancha y orilla evaluadas en este ensayo, como ha ocurrido en sustratos fitorremediados con otras gramíneas (Reilley *et al.*, 1996; Hou *et al.*, 1999; Banks *et al.*, 2000). Por ello, dichos pastos tienen potencial en la fitorremediación de suelos con derrames de petróleo.

Los nutrientes P extractable, Ca y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> contribuyeron a explicar el desarrollo de la biomasa de los pastos durante el experimento (Cuadro 4). Se ha comprobado que la aplicación de P mejora el desarrollo de plantas y su capacidad de degradación de HAP (Sicilliano y Germida, 1998) y, además, incrementa el enraizamiento de pastos sobre suelos con petróleo en proceso de fitorremediación (Hou *et al.*, 2001).

La CIC tuvo efecto negativo sobre los pastos en el ciclo dos. Posiblemente, esta variable se asoció con el ion Na y afectó la biomasa de los pastos.

Cuadro 3. Biomasa de pastos en suelos con derrames de petróleo.

Suelo	Pasto	Ciclo	Zona del derrame <sup>†</sup>	Hoja+tallo		Raíz		Hoja+tallo+raíz	
				Peso seco	DSH <sub>0,05</sub>	Peso seco	DSH <sub>0,05</sub>	Peso seco	DSH <sub>0,05</sub>
				g		g		g	
Antrosol	Humidícola	1	C	0.21 d <sup>‡</sup>	0.67				
			O	0.30 d					
			M	0.86 abcd					
			S	0.74 abcd					
		2	C	0.85 abcd		0.66 a	1.13	1.34 d	1.04
			O	1.22 ab		1.76 a		2.98 a	
			M	1.23 a		1.62 a		2.85 ab	
			S	1.15 abc		1.38 a		2.53 abc	
Acrisol	Humidícola	1	C	0.21 d	0.77				
			O	0.35 abcd					
			M	0.42 abcd					
			S	0.97 abcd					
		2	C	1.05 a		0.73 a	0.59	1.78 a	1.15
			O	0.97 abcd		0.94 a		1.91 a	
			M	1.02 abc		0.58 a		1.60 a	
			S	1.04 ab		0.76 a		1.80 a	
Gleysol1	Aleman	1	C	1.74 ab	1.46				
			O	1.40 ab					
			M	0.86 b					
			S	2.09 ab					
		2	C	2.08 ab		5.86 a	2.35	7.93 a	2.13
			O	1.45 ab		3.31 b		4.76 b	
			M	2.23 ab		3.13 b		4.57 b	
			S	2.84 a		3.74 ab		6.58 ab	
Gleysol2	Egipto	1	C	2.02 abc	1.52				
			O	2.03 ab					
			M	2.49 a					
			S	1.57 abcd					
		2	C	0.45 d		1.37 a	1.24	1.82 a	1.76
			O	0.92 bcd		1.19 a		2.11 a	
			M	1.32 abcd		1.65 a		2.97 a	
			S	1.18 abcd		1.22 a		2.40 a	
Histosol	Egipto	1	C	0.62 d	0.61				
			O	1.01 cd					
			M	1.08 bcd					
			S	1.08 bcd					
		2	C	0.60 d		0.83 b	1.07	1.43 c	1.40
			O	1.23 bc		1.45 ab		2.68 bc	
			M	1.68 ab		2.23 a		3.92 ab	
			S	2.15 a		2.23 a		4.38 a	

<sup>†</sup> C = centro, O = orilla, M = manchas, S = sin manchas. DSH = mínima diferencia significativa. <sup>‡</sup> Cantidades seguidas de letras diferentes en la misma columna y en el mismo suelo son estadísticamente diferentes de acuerdo con su DSH<sub>0,05</sub>.

**Cuadro 4. Efecto de hidrocarburos y propiedades de suelos en la biomasa de los pastos.**

Ciclo del pasto	Modelos de regresión lineal
1	Hoja + tallo = 0.76900 + 0.05896P - 0.00005HTP + 0.00273NO <sub>3</sub> R <sup>2</sup> = 0.48 α ≤ 0.03
2	Hoja + tallo = 0.811 - 0.0333CIC + 0.03637P R <sup>2</sup> = 0.50 α ≤ 0.01
2	Raíz = 0.649 + 0.07493Ca + 0.00007HTP R <sup>2</sup> = 0.48 α ≤ 0.02
2	Tallo + hoja + raíz = 1.318 + 0.305Ca - 0.114CIC + 0.0889P + 0.00006HTP R <sup>2</sup> = 0.77 α ≤ 0.01

HTP = hidrocarburos totales del petróleo, NO<sub>3</sub> = nitratos, P = fósforo extractable, Ca = calcio intercambiable, CIC = capacidad de intercambio catiónico.

## CONCLUSIONES

- Los derrames de petróleo incrementaron el contenido de materia orgánica en los suelos Antrosol, Acrisol y Gleysoll; Na, en los Gleysoles; y la acidez, en el Acrisol y en el Gleysoll del Activo Cinco Presidentes, Tabasco.

- En la primera cosecha, el petróleo se relacionó negativamente con el rendimiento de materia seca del pasto en todos los suelos.

- En la segunda cosecha, el rendimiento de materia seca fue igual o mayor respecto a lo observado en la primera, excepto en el pasto egipto en el Gleysol2, y se relacionó positivamente con las concentraciones de P y Ca.

- Los HTP del suelo se redujeron en 48% después de cultivar por 3.5 meses los siguientes pastos: humidícola [*Brachiaria humidicola* (Rendle) Sch.], en Antrosoles y Acrisoles; alemán [*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchcock], en Gleysoles; y egipto [*Brachiaria mutica* (Forsksskal) Stapf], en Gleysoles.

- Los pastos tienen potencial en la fitorremediación por su adaptación a suelos contaminados con petróleo.

## AGRADECIMIENTOS

Al Sistema de Investigación del Golfo de México (SIGOLFO), al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco (proyecto 00-06-011-T), y al Gobierno del estado de Tabasco, a través de la Dirección de Recursos Naturales y la Comisión Interinstitucional para el Medio Ambiente y Desarrollo Social (CIMADES), por el financiamiento de esta investigación.

## LITERATURA CITADA

Adams Sh., R.H. y J. Ramírez A. 1999. Optimización del método EPA 9074 como alternativa para análisis de hidrocarburos totales de petróleo. VI Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente. Red Interamericana para la Calidad

Ambiental. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. Monterrey, Nuevo León.

Aguilar-Noh, A.G. 1987. Capacidad de intercambio catiónico. pp. 93-107. In: Aguilar-Santelises, A., J.D. Etchevers-Barra y J.Z. Castellanos-Ramos (eds.). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, estado de México.

Al-Sarawi, M. y M.S. Massoud. 1998. Preliminary assessment oil contamination levels in soils contaminated with oil lakes in the greater Burgan oil fields, Kuwait. Water, Air, Soil Pollut. 106: 493-504.

Banks, M.K., R.S. Govindaraju, A.P. Schwab y P. Kulakow. 2000. Field demonstration. pp. 1-88. In: Fiorenza, S., C.L. Oubre y C.H. Ward (eds.). Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soil. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.

Cajuste, L.J. 1987. El fósforo aprovechable en los suelos. pp. 133-142. In: Aguilar-Santelises, A., J.D. Etchevers-Barra y J.Z. Castellanos-Ramos (eds.). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, estado de México.

Chaineau, C.H., J.L. Morel y J. Oudot. 1996. Land treatment of oil-based drill cuttings in an agricultural soil. J. Environ. Qual. 25: 858-867.

Chaineau, C.H., J.L. Morel y J. Oudot. 1997. Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. J. Environ. Qual. 26: 1470-1483.

Cole, G.M. 1994. Assessment and remediation of petroleum contaminated sites. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.

Cunningham, S.D., T.A. Anderson, A.P. Schuab y F.C. Hsu. 1996. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. Adv. Agron. 56: 55-114.

Darren, G. y P. Mallery. 2000. SPSS for Windows step by step: a simple guide and reference, 10.0 update. 3rd ed. Statistical Package for Social Sciences. Chicago, IL.

EPA (Environmental Protection Agency). 1998. Method 9074. <http://www.epa.gov/sw-846/pdfs/9074.pdf> (22 febrero 2005)

Etchevers-Barra, J.D. 1987. Determinación de nitrógeno en suelos. pp. 45-83. In: Aguilar-Santelises, A., J.D. Etchevers-Barra y J.Z. Castellanos-Ramos (eds.). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, estado de México.

Eweis, J.B., S.J. Ergas, D.P.Y. Chang y E.D. Shroeder. 1998. Bioremediation principles. Series in Water Resources and Environmental Engineering. McGraw Hill. New York.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), ISRIC (Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos) y SICS (Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo). 1999. Base de referencia mundial del

- recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de Suelos 84. Roma, Italia.
- Fine, P., E.R. Graber y B. Yaron. 1997. Soil interactions with petroleum hydrocarbons: abiotic processes. *Soil Tech.* 10: 133-153.
- Hou, F.S.L., D.W.M. Leung., M.W. Milke y D.J. MacPherson. 1999. Improvement in ryegrass seed germination for diesel contaminated soils by peg treatment technology. *Environ. Tech.* 20: 413-418.
- Hou, F.S.L., M.W. Milke., D.W. Leung y D.J. MacPherson. 2001. Variations in phytoremediation performance with diesel-contaminated soil. *Environ. Tech.* 22: 215-222.
- León-Arteta, R. y A. Aguilar-Santelises. 1987. Materia orgánica. pp. 85-91. *In: Aguilar-Santelises, A., J.D. Etchevers-Barra y J.Z. Castellanos-Ramos (eds.). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.*
- Li, X., Y. Feng y N. Sawatsky. 1997. Importance of soil-water relations in assessing the endpoint of bioremediated soils: plant growth. *Plant Soil* 192: 219-226.
- Lindau, C.W. y R.D. Delaune. 2000. Vegetative response of *Sagittaria lancifolia* to burning of applied crude oil. *Water, Air, Soil Pollut.* 121: 161-172.
- Martínez M., V.E. y F. López S. 2001. Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra* 19: 9-17.
- Mueller, J.G., C.E. Cerniglia y P.H. Pritchard. 1996. Biodegradation of environments contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons. pp. 125-194. *In: Crawford, R.L. y D.L. Crawford (eds.). Bioremediation principles and applications. Biotechnology Research Series 6. Cambridge University Press. Cambridge, UK.*
- Reilley, K.A., M.K. Banks y A.P. Schwab. 1996. Organic chemicals in the environment. Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *J. Environ. Qual.* 25: 212-219.
- Riser-Roberts, E. 1998. Remediation of petroleum contaminated soils. *Biological, Physical and Chemical Processes.* Lewis Publishers. Boca Raton, FL.
- Rosenberg, E. y E.Z. Ron. 1996. Bioremediation of petroleum contamination. pp. 100-124. *In: Crawford, R.L. y D.L. Crawford (eds.). Bioremediation principles and applications. Biotechnology Research Series 6. Cambridge University Press. Cambridge, UK.*
- Sicilliano, S.D. y J.J. Germida. 1998. Mechanisms of phytoremediation: biochemical and ecological interactions between plants and bacteria. *Environ. Rev.* 6: 65-79.
- Steel, G.D. y J.H. Torrie. 1960. Principles and procedures of statistics with special reference to the biological sciences. McGraw-Hill. New York.
- Van Reeuwijk, L.P. 1995. Procedures for soil analysis. *Tech. Paper 9.* 4th ed. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.

# ÁREA FOLIAR, TASA DE ASIMILACIÓN NETA, RENDIMIENTO Y DENSIDAD DE POBLACIÓN EN GIRASOL

## Leaf Area, Net Assimilation Rate, Yield and Plant Density in Sunflower

L. Aguilar-García<sup>1</sup>, J. Alberto Escalante-Estrada<sup>1,†</sup>, L. Fucikovsky-Zak<sup>2</sup>, L. Tijerina-Chávez<sup>1</sup> y E. Mark Engleman<sup>1</sup>

### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la densidad de población sobre área foliar, índice y duración de área foliar, tasa de asimilación neta y su relación con el rendimiento en girasol (*Helianthus annuus* L.). El trabajo se realizó en condiciones de temporal. El girasol cv. Victoria se sembró el 26 de mayo de 1999, en un Fluvisol móllico (Flm), con 2 a 3% de materia orgánica y pH de 8. Los tratamientos fueron tres densidades de población D1 = 2.5 (50 x 80 cm), D2 = 5.0 (25 x 80 cm) y D3 = 7.5 (33 x 40 cm) plantas m<sup>-2</sup>. El diseño experimental fue bloques al azar, con cuatro repeticiones. Los resultados indican que al elevar la densidad de población se incrementaron altura, número de hojas m<sup>-2</sup>, área foliar, índice y duración del área foliar principalmente antes de la floración, así como, biomasa total m<sup>-2</sup>, además, la eficiencia en el uso del agua y de la radiación, en contraste con la tasa de asimilación neta la cual disminuyó. Esto sugiere que el incremento de la producción de biomasa y del rendimiento, al elevar la densidad de población, se debe, en particular, al incremento del área foliar y no necesariamente a la producción de fotosintatos por unidad de área foliar.

**Palabras clave:** *Helianthus annuus* L., biomasa, eficiencia en el uso del agua, eficiencia en el uso de la radiación.

### SUMMARY

The aim of this study was to determine the effect of plant density on leaf area, leaf index and leaf area duration, net assimilation rate and its relationship with

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, <sup>2</sup> Instituto de Fitopatología, Colegio de postgraduados, 56230 Montecillo, estado de México.

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

Recibido: Septiembre de 2003. Aceptado: Diciembre de 2004.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 303-310.

the yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.). This field trial was carried out under rainfed conditions. Sunflower cv. Victoria was sown on May 26, 1999 in a Mollic fluvisol (Flm), with 2 to 3% organic matter and pH 8. Treatments were three plant densities D1 = 2.5 (50\*80 cm), D2 = 5.0 (25\*80 cm), and D3 = 7.5 (33\*40 cm) plants m<sup>-2</sup>. The experimental design was a randomized block design, with four replications. The results indicate that the increase in plant density increases plant height, leaf number m<sup>-2</sup>, leaf area, leaf area duration and leaf area index, mainly before flowering, as well as total biomass per square meter. Moreover, the efficiency in the utilization of water and radiation increased when plant density increased from 2.5 to 7.5 plants m<sup>-2</sup>. However, the net assimilation rate decreased as plant density increased. These results suggest that biomass and yield production depend on the magnitude of the leaf area and not only on the production of the photosynthates per unit of leaf area.

**Index words:** *Helianthus annuus* L., biomass, water use efficiency, radiation use efficiency.

### INTRODUCCIÓN

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es una oleaginosa de gran importancia en el mundo, por su alto contenido de aceite en la semilla (45%). En México se produce en los estados de Baja California, Durango, Jalisco, Nayarit, Sonora y Tamaulipas, con una superficie de 120 ha y una producción total de 70 t (SAGARPA, 2000), sin embargo, existe un alto potencial productivo para esta especie, por lo que es importante realizar estudios sobre las condiciones y prácticas agrícolas más convenientes para su cultivo.

Mediante el uso de prácticas agrícolas se provee a los cultivos de las condiciones más favorables para la expresión del mayor rendimiento potencial; dentro de dichas prácticas destaca el manejo de la densidad de población. A través de esta práctica agrícola pueden incrementarse la producción de biomasa y el rendimiento de los cultivos, debido al aumento en

el área foliar, el índice de área foliar y la duración de la misma, ocasionado por el mayor número de hojas por unidad de superficie (Olalde-Gutiérrez *et al.*, 2000), ya que el tamaño y la duración del aparato fotosintético están relacionados con el rendimiento (Escalante-Estrada, 1999). Asimismo, el mayor crecimiento del dosel vegetal proporciona una mayor intercepción de luz, lo cual incrementa la fotosíntesis y producción de biomasa (Escalante-Estrada, 1999) como resultado de un mayor aprovechamiento de los recursos hídricos y nutrimentales.

En adición, el incremento en la densidad de población genera mayor sombreado, producido por el mayor número de hojas  $m^{-2}$ , lo que afecta algunos procesos fisiológicos, como: la velocidad de la fotosíntesis, respiración, fotorrespiración y transpiración. El resultado de estos procesos es la acumulación de materia seca por planta, la cual también depende de la magnitud del área foliar por unidad de superficie (IAF), duración de área foliar (DAF) y tasa de asimilación neta (TAN). (Escalante-Estrada y Kohashi-Shibata, 1982). Sin embargo, al incrementar la densidad de población aumenta el auto sombreado, lo que reduce el acceso de la luz conforme progresa el ciclo del cultivo e incrementa la senescencia de las hojas, por lo cual la TAN disminuye (Scott y Batchelor, 1979). El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la densidad de población sobre área foliar, duración de área foliar, tasa de asimilación neta y su relación con el rendimiento del girasol.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en condiciones de temporal; con dos riegos de auxilio de 12 y 15 cm de lámina: el primero, a la siembra, y, el segundo, en el momento de la emergencia; en Montecillo, México, ( $19^{\circ} 29' N$ ,  $98^{\circ} 53' O$  y 2250 m de altitud), con clima tipo BS1, el menos seco de los áridos con lluvias en verano, temperatura media anual de  $14.6^{\circ} C$  y 558.5 mm de precipitación (García, 1988). El suelo (Fluvisol mólico, Flm) es de textura arcillosa, con 2 a 3% de materia orgánica, contenido inicial de N de  $52 kg ha^{-1}$  y pH de 8 en los primeros 30 cm del perfil. La siembra de girasol cv. Victoria se realizó el 26 de mayo de 1999. Los tratamientos fueron tres densidades de población: D1 = 2.5 ( $50 \times 80 cm$ ), D2 = 5.0 ( $25 \times 80 cm$ ) y D3 = 7.5 ( $33 \times 40 cm$ ) plantas  $m^{-2}$ . El diseño experimental fue bloques al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental fue

de cuatro surcos de 7 m de largo, de los cuales como parcela útil se tomaron 5 m de los dos surcos centrales. A 36 días después de la siembra (DDS), se realizaron una escarda y un aclareo de las plantas para ajustar la densidad de población. Durante el ciclo de crecimiento del cultivo, se registraron temperaturas máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ,  $^{\circ}C$ ) y mínima ( $T_{m\acute{i}n}$ ,  $^{\circ}C$ ), precipitación (pp, mm), evaporación (Ev, mm), y humedad relativa (HR, %). La evapotranspiración del cultivo (ETc) y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) se calcularon utilizando datos proporcionados por la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, mediante las expresiones:

$$ETc = Ev * ft * kc$$

donde: Ev = evaporación del tanque tipo A, ft = coeficiente del evaporímetro (0.6); kc = coeficiente de cultivo (0.8); y

PAR = 45% de radiación global.

La acumulación de calor (UC,  $^{\circ}C d^{-1}$ ) se calculó mediante el método residual,  $UC = (T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n})/2 - t_b$ ;  $t_b$  = temperatura base de  $6^{\circ} C$  (Merrien, 1986).

## Variables Evaluadas

**Fenología.** Las etapas fenológicas, determinadas según la guía de Schneiter y Miller (1981), fueron: emergencia (fecha cuando al menos 50% de las plántulas han emergido y las primeras hojas verdaderas son menores que 4 cm de longitud, etapa Ve), aparición de capítulo (fecha cuando al menos 50% de la población presenta la yema terminal en forma de una cabezuela apinada de hojas y que vista desde arriba da la apariencia de una estrella, R1), floración (fecha cuando 50% de la población muestra en la periferia del capítulo las ligulas expuestas y turgentes e inicia la antesis, R5) y madurez fisiológica (se registró cuando las brácteas del involucre y las flores exteriores de la inflorescencia de 50% de la población muestra se tornaron amarillas y de color oscuro, R9).

**Parámetros de crecimiento.** Mediante muestreos periódicos de tres plantas por unidad experimental a 36, 56, 90 y 120 días después de la siembra (DDS), se determinaron altura, número de hojas verdes por planta, área foliar, índice de área foliar, duración del área foliar y biomasa seca por planta y por unidad de superficie, representada por la suma de la materia seca

acumulada en lámina foliar, tallo (incluyendo pecíolos) y, en su momento, capítulo. Para obtener el peso seco, se colocó el material vegetal en una estufa con circulación forzada de aire a 80 °C, por 72 h. No se incluyó al sistema radical. A la cosecha (120 DDS) se evaluó el rendimiento por planta y por m<sup>2</sup>. Para el número de hojas verdes, se contabilizó el total de hojas presentes en la planta que fueran superiores a 4 cm de longitud y que presentaran al menos 50% de su superficie de color verde. El área foliar se determinó mediante un integrador electrónico de área, modelo Li-3100 (Licor, Inc. Lincoln, NE, EE UU). El índice de área foliar (IAF) se calculó con la expresión: IAF = (área foliar por planta\*densidad de población)/unidad de superficie. La duración de área foliar (DAF) se calculó mediante la ecuación:

$$DAF = \sum[(IAF_2 + IAF_1) (T_2 - T_1)] * 0.5$$

donde: IAF<sub>1,2</sub> = índice de área foliar al inicio y final del intervalo, T<sub>1, 2</sub> = tiempo inicial y final del intervalo.

La eficiencia en el uso del agua (EUA) y de la radiación se calcularon con las expresiones:

$$EUA = (Biomasa \text{ o } rendimiento)/ETc; \text{ y } EUR = (Biomasa \text{ o } rendimiento)/PAR.$$

La tasa de asimilación neta media (TAN, g dm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) se determinó con la ecuación:

$$TAN = \frac{(w_2 - w_1) (\ln Af_2 - \ln Af_1)}{(T_2 - T_1) (AF_2 - AF_1)}$$

donde: ln = logaritmo natural, Af<sub>1, 2</sub> = área foliar al inicio y final del intervalo de tiempo, w<sub>1, 2</sub> = peso seco al inicio y final del intervalo de tiempo.

A las variables en estudio se les aplicó un análisis de varianza y a las que mostraron diferencias significativas se les realizó una prueba de comparación de medias (Tukey, 0.05), además de un análisis de correlación y regresión mediante el paquete estadístico SAS, Versión 6 (SAS Institute, 1985).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Condiciones ambientales

En la Figura 1, se observa que la temperatura presentó un descenso con el tiempo, así que durante la etapa de siembra a emergencia, las T<sub>máx</sub> y T<sub>mín</sub> fueron de 31 y 7 °C, respectivamente; de emergencia a aparición de capítulo (R1), de 28 y 9 °C, respectivamente; de aparición de capítulo a inicio de floración, de 27 y 9 °C, respectivamente; de inicio de floración a madurez fisiológica, de 25 y 6 °C, respectivamente. La precipitación y evapotranspiración estacional fueron de 394 mm y 370 mm, respectivamente. La radiación estacional fue de

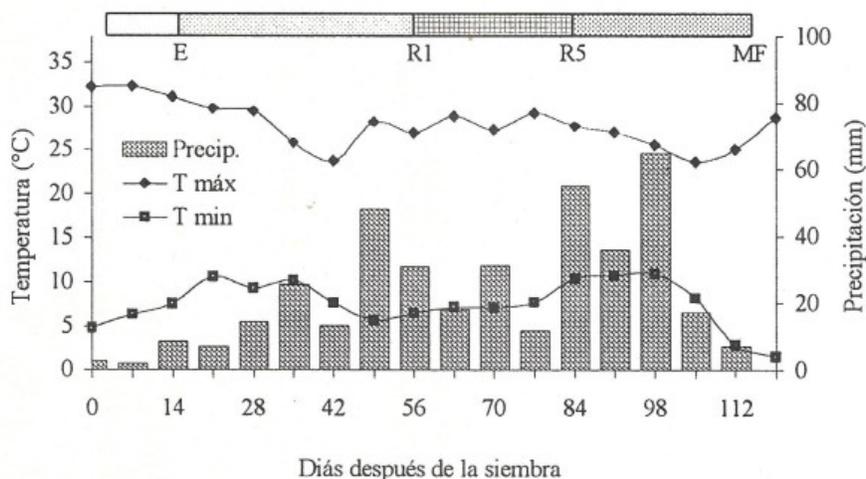


Figura 1. Temperatura máxima (T<sub>máx</sub>) y mínima (T<sub>mín</sub>) (promedio semanal) y precipitación (suma semanal) durante el ciclo de cultivo del girasol cv. Victoria, Montecillo, México. E = emergencia, R1 = aparición de capítulo, R5 = inicio de floración y MF = madurez fisiológica.

2155 MJ y la acumulación de calor del cultivo fue de 1435 °C d<sup>-1</sup>.

### Fenología

No se observaron cambios en la fenología por efecto de los tratamientos. El periodo de siembra a emergencia fue de 12 días; de emergencia a aparición de capítulo (R1) de 44 días; de aparición de capítulo a inicio de floración (R5) fue de 28 días y, finalmente, el periodo de inicio de floración a madurez fisiológica duró 33 días. De esta manera el ciclo biológico fue de 119 días (Figura 1).

### Altura de Planta

La altura de planta presentó diferencias significativas por efecto de la densidad de población a partir de 56 DDS, ésta incrementó desde las primeras etapas de desarrollo hasta alcanzar su máximo valor al final del ciclo (Figura 2). En la densidad baja (D1, 2.5 plantas m<sup>-2</sup>), la altura máxima fue de 2.04 m, mientras que para 5.0 (D2) y 7.5 (D3) plantas m<sup>-2</sup>, fue de 2.22 y 2.47 m, respectivamente. Dichos incrementos en la altura de planta se debieron a una elongación de los entrenudos, como respuesta a la competencia intraespecífica por espacio, radiación, agua y nutrientes ocasionada por el aumento en la densidad, ya que no se observaron diferencias en el número de entrenudos por planta (Rajput *et al.*, 1994).

### Número de Hojas

Este parámetro (en m<sup>2</sup>) mostró un incremento significativo por efecto de la densidad de población

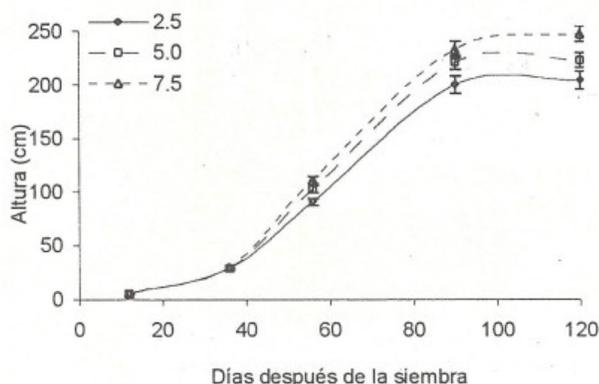


Figura 2. Dinámica de la altura de la planta de girasol cv. Victoria, en función de la densidad de población.

(Figura 3). Dichos incrementos se ajustaron a un modelo cuadrático ( $r^2 = 0.99^{**}$ , para las tres densidades). En D3, las tasas de incremento durante los estados iniciales de desarrollo fueron altas (12.8 hojas m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) y tendieron a decrecer con una tasa de 0.09 hojas m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> después de la etapa de floración. En las densidades media (D2) y baja (D1), las tendencias fueron similares, pero con menores tasas (8.2, 0.05 hojas m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, para D2 y 4.4, 0.03 hojas m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para D1, respectivamente).

El número de hojas aumentó desde 12 DDS hasta alcanzar su máximo a 56 DDS en D3 con 173 hojas m<sup>-2</sup> y 90 DDS para D1 y D2 con 65 y 130 hojas m<sup>-2</sup>, respectivamente. Con la densidad de población alta (D3) ocurrió una máxima producción de hojas por m<sup>2</sup> en un periodo más corto, después disminuyó por efecto de la senescencia, lo que se podría atribuir a la mayor competencia intraespecífica por nutrientes, espacio y radiación, generada por el mayor número de plantas por m<sup>2</sup>. Las plantas en D3 produjeron 33 y 166% más hojas por unidad de superficie (m<sup>2</sup>) que D2 y D1 a 56 DDS, como consecuencia del mayor número de plantas por m<sup>2</sup>, ya que no hubo diferencias en el número de hojas por planta entre tratamientos. Tendencias similares fueron reportadas en girasol en clima cálido por Olalde-Gutiérrez *et al.* (2000), quienes señalaron incrementos de 43 y 99% del número de hojas por m<sup>2</sup> en densidades de 7.5 y 10 plantas m<sup>-2</sup>, con respecto a 5 plantas m<sup>-2</sup> (125 hojas m<sup>-2</sup>) a 54 DDS.

### Índice de Área Foliar (IAF)

Esta variable mostró un aumento significativo por efecto de la densidad de población (Figura 4). Dichos

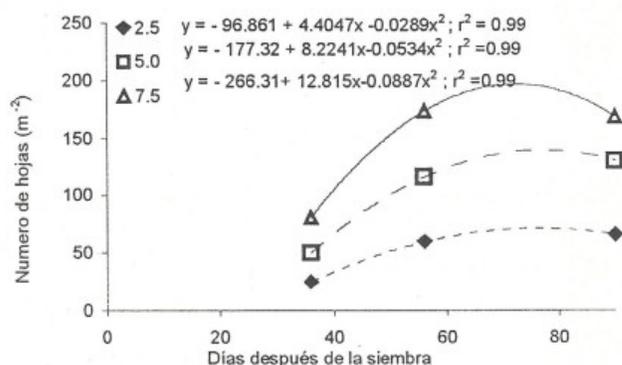


Figura 3. Número de hojas durante el desarrollo del girasol cv. Victoria, en función de la densidad de población.

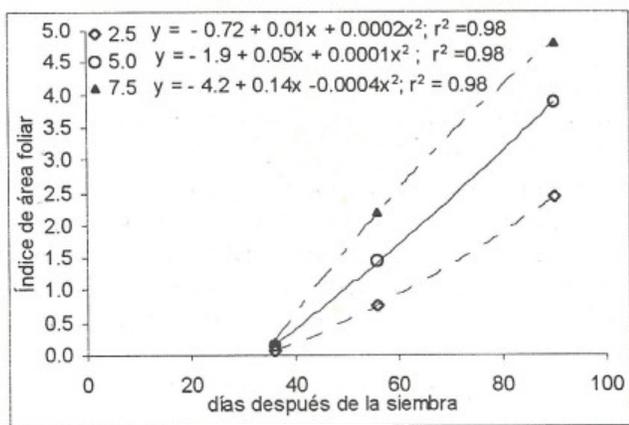


Figura 4. Índice de área foliar durante el desarrollo del girasol cv. Victoria, en función de la densidad de población.

incrementos en las tres densidades se ajustaron a un modelo cuadrático ( $r^2 = 0.98^{**}$ ). Puede apreciarse que, en D3, la tasa de incremento durante los estados iniciales de desarrollo fue alta (0.14) y tendió a decrecer en 0.0004, después de la etapa de floración. En D1 y D2, las tendencias fueron similares, pero con diferentes tasas (0.01, 0.0002 para D1 y 0.05, 0.0001 para D2), lo que puede atribuirse al incremento de la senescencia ocasionada por la mayor densidad de población.

Con densidad de población alta (D3), el índice de área foliar fue superior desde las primeras etapas de desarrollo, con respecto a D2 y D1, lo cual fue consecuencia del mayor número de hojas por  $m^2$  (Escalante-Estrada, 1999). El máximo índice de área foliar se obtuvo a 90 DDS con 2.4, 3.9 y 4.8 para D1, D2 y D3, respectivamente; posteriormente, el IAF disminuyó debido a la senescencia. Estos datos concuerdan con lo reportado por Escalante-Estrada (1999), en girasol en condiciones de humedad residual, por Vega-Muñoz *et al.* (2001) y Aguilar-García *et al.* (2002) en girasol cv. Victoria, en condiciones de temporal del altiplano.

**Duración de Área Foliar (DAF)**

La permanencia del área foliar (DAF) se amplió por efecto de la densidad de población, principalmente antes de la floración. La máxima DAF (219.8 días) se registró en las plantas con alta densidad de población, la cual fue 50.5% superior a D1 y 18.7% mayor que D2, debido al mayor desarrollo del IAF. Escalante-Estrada (1999) encontró tendencias similares en girasol en condiciones de humedad residual.

Cuadro 1. Duración del área foliar antes de floración (ADF), después de floración (DDF) y total, en girasol cv. Victoria en función de la densidad de población.

Densidad de población plantas $m^{-2}$	Duración de área foliar		
	ADF	DDF	Total
2.5	67.0 c <sup>†</sup>	42.0 b	108.9 c
5.0	108.6 b	70.1 ab	178.7 b
7.5	135.4 a	84.4 a	219.8 a

<sup>†</sup> Letras iguales en cada columna indican valores estadísticamente iguales (Tukey,  $P < 0.01$ ).

Vega-Muñoz *et al.* (2001) y Aguilar-García *et al.* (2002) encontraron respuestas similares en girasol cv. Victoria en condiciones de temporal. (Cuadro 1). La mayor DAF en densidad de población alta se refleja en un incremento en la producción de biomasa, debido a la mayor radiación interceptada por el dosel vegetal.

**Producción de Biomasa**

Durante el desarrollo del cultivo, la producción de biomasa por  $m^2$  mostró un incremento significativo debido al aumento en la densidad de población (Figura 5). Dichos incrementos en las tres densidades se ajustaron a un modelo cuadrático ( $r^2 = 0.96^{**}$  para D1 y  $r^2 = 0.98^{**}$  para D2 y D3, respectivamente). Así, la biomasa total por  $m^2$  a la cosecha, fue de 907.4 (D1), 1395.9 (D2) y 1923.7 (D3)  $g\ m^{-2}$ . En la Figura 6, se observa que la producción de biomasa a la cosecha mostró una relación lineal alta ( $r^2 = 0.98^{**}$ ), con el IAF máximo. De esta manera, la ecuación  $B = -145.9 + 420.4IAF$  indica que, dentro del intervalo de 2.4 a 4.8 de IAF, para cada unidad

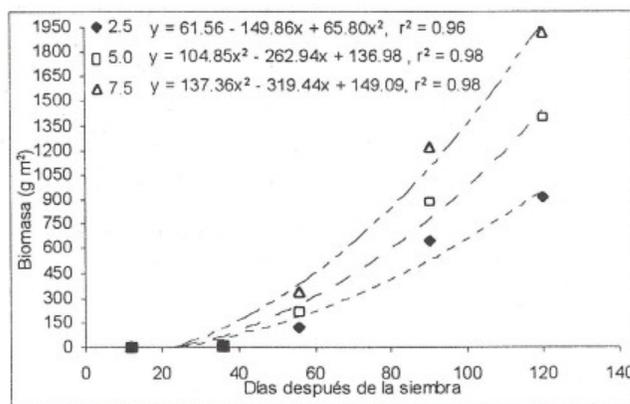


Figura 5. Dinámica de la producción de biomasa en girasol cv. Victoria, en función de la densidad de población.

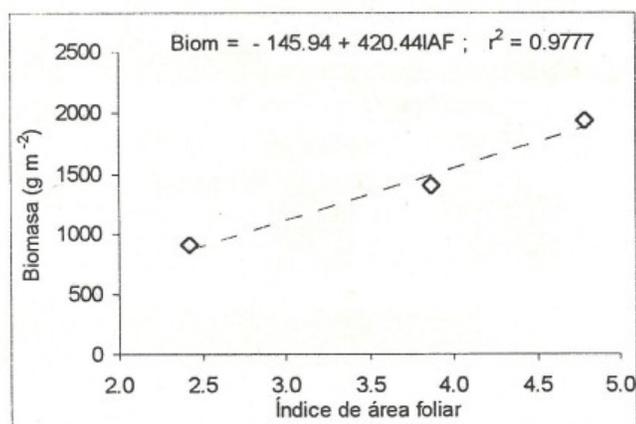


Figura 6. Relación entre la biomasa ( $\text{g m}^{-2}$ ) a la cosecha e índice de área foliar máximo (90 DDS) en girasol cv. Victoria, en función de la densidad de población.

que el IAF se incrementa, la producción de biomasa aumenta en  $420.4 \text{ g m}^{-2}$ . Lo anterior puede atribuirse a una mayor fotosíntesis, debida al crecimiento del dosel vegetal que proporciona mayor intercepción de luz y mayor aprovechamiento de los recursos hídricos y nutrimentales (Escalante-Estrada, 1999). Respuestas similares a la densidad de población observaron Escalante-Estrada (1999), en girasol en condiciones de humedad residual, Vega-Muñoz *et al.* (2001) y Aguilar-García *et al.* (2002) en girasol cv. Victoria en condiciones de temporal.

#### Eficiencia en el Uso del Agua para la Producción de Biomasa (EUAb)

La eficiencia en el uso del agua (EUA) para la producción de biomasa se elevó al aumentar la densidad de población (Cuadro 2). Así, D3 mostró mayor EUA en la producción de biomasa ( $5.2 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ) que D1 y D2 ( $2.5$  y  $3.8 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ , respectivamente). Estos valores fueron cercanos a los reportados por Vega-Muñoz *et al.* (2001), en girasol cv. Victoria en condiciones de temporal. En

la Figura 7, se muestra la relación entre la producción de biomasa ( $\text{g m}^{-2}$ ) y la evapotranspiración del cultivo evaluada durante el ciclo de desarrollo del girasol (36 a 120 DDS), la cual se ajusta a un modelo lineal ( $r^2 = 0.98^{**}$  para D1 y  $r^2 = 0.99^{**}$  para D2 y D3, respectivamente). Para cada densidad de población se observan curvas diferentes, lo que indica que, por cada  $\text{mm m}^{-2}$  de agua evapotranspirada, el girasol, en densidad alta ( $7.5 \text{ plantas m}^{-2}$ ), produce  $7.99 \text{ g}$  de materia seca, mientras que las densidades baja y media ( $2.5$  y  $5 \text{ plantas m}^{-2}$ ) producen  $3.92$  y  $5.86 \text{ g}$ , respectivamente, lo cual puede atribuirse a una mayor eficiencia en el uso del agua (Cuadro 2).

#### Eficiencia en el Uso del Agua para la Producción de Semilla (EUAs)

La eficiencia en el uso del agua para la producción de semilla (EUAs) también se elevó al aumentar la densidad de población (Cuadro 2). Así, D3 mostró mayor eficiencia en el uso del agua en la producción de semilla ( $0.9 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ) que D1 y D2 ( $0.5$  y  $0.7 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ , respectivamente). Estos valores fueron cercanos a los reportados por Vega-Muñoz *et al.* (2001), en girasol cv. Victoria, en condiciones de temporal. El incremento de la eficiencia en el uso del agua al aumentar la densidad de población está relacionado con una mayor y temprana cobertura del dosel vegetal, lo que disminuye la pérdida de agua del suelo por evaporación.

#### Eficiencia en el Uso de la Radiación para la Producción de Biomasa (EURb)

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) para la producción de biomasa fue mayor al aumentar la densidad de población (Cuadro 2). Así, la densidad de  $7.5 \text{ plantas m}^{-2}$  mostró una EUR mayor ( $2.0 \text{ g m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ ) que la densidad de  $2.5$  y  $5.0 \text{ plantas m}^{-2}$  ( $0.9$  y  $1.4 \text{ g m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ , respectivamente). En la Figura 8, se presenta la relación entre la radiación

Cuadro 2. Eficiencia en el uso del agua (EUA) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) en la producción de biomasa total (Biom.) y rendimiento de semilla (Rend.) en girasol cv. Victoria, en función de la densidad de población.

Densidad de población	Biom.	Rend.	EUA		EUR	
			Biom.	Rend.	Biom.	Rend.
plantas $\text{m}^{-2}$	----- $\text{g m}^{-2}$ -----	-----	----- $\text{g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ -----	-----	----- $\text{g MJ}^{-1}$ -----	-----
2.5	907.4 c <sup>†</sup>	176.8 c	2.5 c	0.5 c	0.9 c	0.18 c
5.0	1395.9 b	261.7 b	3.8 b	0.7 b	1.4 b	0.27 b
7.5	1923.7 a	342.9 a	5.2 a	0.9 a	2.0 a	0.35 a

<sup>†</sup> Letras iguales en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $P < 0.001$ ).

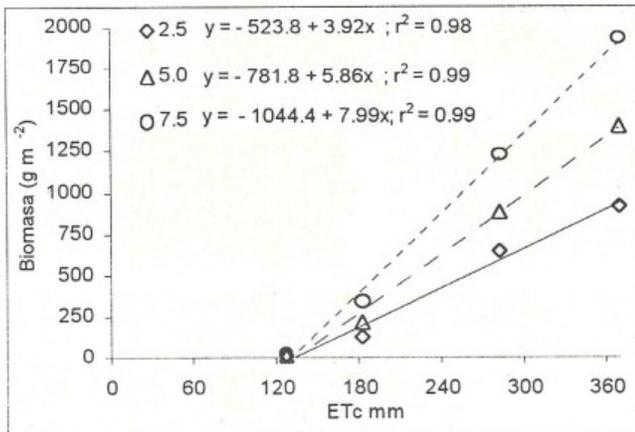


Figura 7. Relación entre la biomasa y evapotranspiración en girasol cv. Victoria en función de la densidad de población.

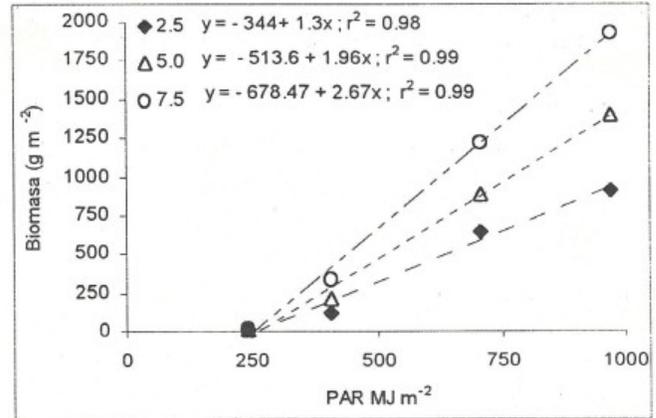


Figura 8. Relación entre la biomasa y radiación fotosintéticamente activa en girasol cv. Victoria en función de la densidad de población.

fotosintéticamente activa (PAR, MJ m<sup>-2</sup>) y la producción de biomasa (g m<sup>-2</sup>) durante el desarrollo del cultivo (36 a 120 DDS), la cual se ajusta a un modelo lineal (r<sup>2</sup> = 0.98\*\* para D1 y r<sup>2</sup> = 0.99\*\* para D2 y D3). Se aprecia que, por cada MJ m<sup>-2</sup> de PAR, el girasol produce, en D3, 2.67 g de materia seca, mientras que, en D1 y D2 (2.5 y 5 plantas m<sup>-2</sup>), produce 1.3 y 1.96 g, respectivamente. Zaffaroni y Schneiter (1989) reportaron datos similares. El incremento en la eficiencia en el uso de la radiación está relacionado con una mayor cobertura vegetal ocasionada por el mayor número de hojas por m<sup>2</sup> generado por el incremento en la densidad de población.

**Eficiencia en el Uso de la Radiación para la Producción de Semilla (EURs)**

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) para la producción de semilla fue mayor al aumentar la densidad de población (Cuadro 2). Así, la densidad de 7.5 plantas m<sup>-2</sup> mostró una EURs mayor (0.35 g m<sup>-2</sup> MJ<sup>-1</sup>) que las densidades de 2.5 y 5.0 plantas m<sup>-2</sup> (0.18 y 0.27 g m<sup>-2</sup> MJ<sup>-1</sup>, respectivamente). Esto sugiere que, por cada MJ m<sup>-2</sup> de PAR, el girasol produce en D3 mayor rendimiento de semilla que en D2 y D1.

**Tasa de Asimilación Neta Media (TAN)**

La tasa de asimilación neta media (TAN) mostró cambios debido al incremento en la densidad de población (Cuadro 3). La TAN más alta se registró entre 12 y 36 DDS con 18.9, 19.0 y 25.8 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,

para 2.5, 5.0 y 7.5 plantas m<sup>-2</sup>, respectivamente. La TAN más baja encontrada en D2 y D3 fue compensada con la mayor área foliar en estas densidades, lo cual se reflejó en la producción de biomasa más alta. La TAN disminuyó conforme avanzó el crecimiento, de tal forma que de 57 a 90 DDS se encontró la más baja, independiente de la densidad de población (Cuadro 3). La disminución de la TAN puede atribuirse al autosombreado, generado por el mayor tamaño del dosel vegetal al incrementar la densidad de población y al aumento de la senescencia de las hojas (Scott y Batchelor, 1979; Escalante-Estrada y Kohashi-Shibata, 1982).

**Relación entre el Rendimiento y sus Componentes**

En este estudio, se encontró una correlación alta entre rendimiento de semilla (g m<sup>-2</sup>) y densidad de población, biomasa, duración del área foliar antes y después de floración, así como duración de área foliar total (Cuadro 4). La densidad de población (DP, plantas m<sup>-2</sup>) y la biomasa (B, g m<sup>-2</sup>) mostraron

Cuadro 3. Tasa de asimilación neta (TAN) en girasol cv. Victoria, en función de la densidad de población.

Densidad de población	TAN		
	12 a 36 DDS	37 a 56 DDS	57 a 90 DDS
plantas m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>		
2.5	25.8 a <sup>1</sup>	22.2 a	10.70 a
5.0	19.0 b	18.1 b	8.06 b
7.5	18.9 b	18.7 b	7.83 b

<sup>1</sup> Letras iguales en cada columna indican valores estadísticamente iguales (Tukey, P < 0.01).

Cuadro 4. Ecuaciones de regresión entre rendimiento de semilla y densidad de población (DP), biomasa (B), duración de área foliar antes (DAFa), después de floración (DAFd) y total (DAFt).

Rendimiento de semilla (g m <sup>-2</sup> )	Ecuación	Coefficiente de determinación	Significancia
Densidad de población (plantas m <sup>-2</sup> )	Y = 119.95+26.9(D)	r <sup>2</sup> = 0.87	**
Biomasa (g m <sup>-2</sup> )	Y = 87.8+0.11(B)	r <sup>2</sup> = 0.75	**
DAFa	Y = 95.6+1.53(DAFa)	r <sup>2</sup> = 0.61	*
DAFd	Y = 112.69+2.15(DAFd)	r <sup>2</sup> = 0.58	*
DAFt	Y = 90.86+0.96(DAFt)	r <sup>2</sup> = 0.64	*

\*, \*\*, significativos con una P < 0.05 y 0.01.

una relación lineal estrecha con el rendimiento de semilla, mediante el siguiente modelo:

$$Y = 119.95+26.9(DP), r^2 = 0.87; \text{ y } Y = 87.8+0.11(B), r^2 = 0.75.$$

En resumen, se puede indicar que el incremento en la producción de biomasa y en el rendimiento, al aumentar la densidad de población, es producto de una mayor área foliar y duración de la misma, generada por un mayor número de hojas m<sup>-2</sup> y, en consecuencia, por una mayor eficiencia en el uso del agua y de la radiación. Por otra parte, la TAN más baja en la densidad de población alta sugiere que dichos incrementos en la producción de biomasa y rendimiento pueden estar relacionados con una mayor magnitud del área foliar y su duración, independientemente de la velocidad de producción de fotosintatos por unidad de área foliar.

### CONCLUSIONES

- El aumento en la densidad de población de 2.5 a 7.5 plantas m<sup>-2</sup> incrementó altura de planta, número de hojas por m<sup>2</sup>, área foliar y duración de la misma, producción de biomasa y rendimiento.
- El aumento en la densidad de población disminuyó la TAN, lo que sugiere que el incremento en biomasa y rendimiento, no sólo está definido por la tasa de producción de materia seca por unidad de área foliar, sino también por la magnitud de la misma.
- El rendimiento mostró una relación alta con biomasa y duración de área foliar antes de la floración, las cuales están determinadas por los cambios en densidad de población.

### LITERATURA CITADA

- Aguilar-García, L., J.A. Escalante-Estrada, M.T. Rodríguez-González y L. Fucikovsky-Zak. 2002. Materia seca, rendimiento y corriente geofitoeléctrica en girasol. *Terra* 20: 277-284.
- Escalante-Estrada, J.A. 1999. Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra* 17: 149-157.
- Escalante-Estrada, J.A. y J. Kohashi-Shibata. 1982. Efecto del sombreado artificial sobre algunos parámetros del crecimiento en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agrociencia* 48: 29-38.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ª ed. Offset Larrios. México, D.F.
- Merrien, A. 1986. Cahier technique tournesol. Physiologie. Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitain (CETIOM). Paris, France.
- Olalde-Gutiérrez, V.M., J.A. Escalante-Estrada, P. Sánchez-García, L. Tijerina-Chávez, A.A. Mastache-Lagunas y E. Carreño-Román. 2000. Crecimiento y distribución de biomasa en girasol en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido. *Terra* 18: 313-323.
- Rajput, A.L., D.P. Singh y S.P. Singh. 1994. Effect of spacing and method of nitrogen application on quality and seed yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Indian J. Agron.* 39: 493-495.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2000. Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. México, D.F.
- SAS Institute, Inc. 1985. SAS/STAT guide for personal computers. Version 6. Cary, NC.
- Schneider, A.A. y J.F. Miller. 1981. Description of sunflower growth stages. *Crop Sci.* 21: 901-903.
- Scott, H.D. y J.T. Batchelor. 1979. Dry weight and leaf area production rates of irrigated soybeans. *Agron. J.* 71: 776-782.
- Vega-Muñoz, R., J.A. Escalante-Estrada, P. Sánchez-García, C. Ramírez-Ayala y E. Cuenca-Adame. 2001. Asignación de biomasa y rendimiento de girasol con relación al nitrógeno y densidad de población. *Terra* 19: 75-81.
- Zaffaroni, E. y A.A. Schneider. 1989. Water use efficiency and light interception of semidwarf and standard height sunflower hybrids grown in different row arrangements. *Agron. J.* 81: 831-836.

# CRECIMIENTO DE LA RAÍZ DEL FRIJOL CON DIFERENTES VELOCIDADES DE SECADO DEL SUELO

## Root Growth of Bean under Different Soil Drying Rates

Anali Ontiveros-Cortés<sup>1†</sup>, Josué Kohashi-Shibata<sup>1</sup>, Petra Yáñez-Jiménez<sup>1</sup>,  
Jorge A. Acosta-Gallegos<sup>2</sup>, Enrique Martínez-Villegas<sup>1</sup> y Antonio García-Esteva<sup>1</sup>

### RESUMEN

La raíz es el órgano de la planta que primero percibe el impacto del déficit hídrico en el suelo. Dicho déficit depende, entre otros factores, de la velocidad de secado del suelo. Una rápida tasa de elongación de la raíz es importante para el establecimiento de la planta. En frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) se estudió el efecto de tres velocidades de secado del suelo: testigo regado (T), secado lento (SL) y secado rápido (SR), en la dinámica de crecimiento de la raíz y en la biomasa de la misma y del vástago. Se emplearon dos variedades tipo III: Bayo Madero (BM), susceptible, y Pinto Villa (PV), resistente a la sequía. El diseño experimental fue un factorial 2 x 3 completamente al azar con ocho repeticiones. Las plántulas se desarrollaron en una cámara de ambiente controlado y en rizotrones con arena, los cuales permitían dar seguimiento a la elongación diaria de la raíz. En SL, la variedad PV disminuyó significativamente la elongación de la raíz principal y del conjunto de raíces secundarias+adventicias. En SR, se inhibió significativamente la longitud de raíces de diferente categoría, así como la emisión de raíces terciarias en ambas variedades. El área foliar y peso seco de raíz y de hoja fueron severamente inhibidas en ambas variedades por el SR y, en menor grado, por el SL. En SR, primero se dio una desaceleración de la tasa de elongación de las raíces hasta que se detuvo por completo conforme progresó el déficit hídrico y estos eventos se reflejaron en el vástago como una menor acumulación de biomasa.

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

<sup>†</sup> Autor responsable ([anaoc9@hotmail.com](mailto:anaoc9@hotmail.com))

<sup>2</sup> Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apdo. Postal 112, 38000 Celaya, Guanajuato, México.

Recibido: Noviembre de 2003. Aceptado: Febrero de 2005.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 311-320.

La relación raíz/vástago aumentó o disminuyó de acuerdo con la velocidad de secado y la variedad de frijol.

**Palabras clave:** *Phaseolus vulgaris* L., rizotrófon, sistema radical, raíces laterales, déficit hídrico.

### SUMMARY

The root is the first plant organ to perceive the impact of soil water deficit. This deficit depends on, among other factors, the drying rate of the soil. A rapid root elongation rate is important for the establishment of the plant. The present work studies the effect of three soil drying rates: well-watered control (T), slow drying rate (SL) and fast drying rate (SR), on the root growth dynamics, its dry weight and the dry weight of the shoot. Two type-III bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties were employed: Bayo Madero (BM) susceptible and Pinto Villa (PV) resistant to drought. The experimental design was a completely randomized 2 x 3 factorial with eight replications. The seedlings were grown in controlled-environment chambers, in sand-filled rhizotrons, which allowed follow-up on daily root elongation. Under SL, the PV variety showed a significant decrease in main root elongation as well as in population of secondary+adventitious roots. Under SR, the length of the roots of different categories and the rate of emission of tertiary roots were also inhibited in both varieties. Leaf area and root and leaf dry weight of both varieties were also severely inhibited under SR and to less extent under SL. At the beginning of the SR treatment, deceleration of the elongation rate of roots was observed. Eventually, as the soil water deficit progressed elongation was arrested. These events were reflected on a lower shoot biomass. The root/shoot ratio increased or decreased according to the drying rate of the soil and the bean variety.

**Index words:** *Phaseolus vulgaris* L., rhizotron, root system, lateral roots.

## INTRODUCCIÓN

La raíz es uno de los órganos más importantes de la planta (Levitt, 1972; Parsons, 1979); su crecimiento y ramificación son cruciales para la absorción de agua y nutrimentos. Una rápida elongación de la raíz es importante para el establecimiento de la planta y su desarrollo está estrechamente relacionado con el vástago. En general, el déficit hídrico del suelo causa inhibición del crecimiento de la raíz (Al-Karaki *et al.*, 1995; Lazcano-Ferrat y Lovatt, 1999); sin embargo, un déficit hídrico moderado estimula su crecimiento (Sharp y Davies, 1979; Jupp y Newman, 1987). La eficiencia del sistema radical en la absorción de agua y minerales depende de su longitud, extensión, densidad, ramificación, permeabilidad, conductancia hidráulica, y de la profundidad de penetración (Kramer, 1983; Kramer y Boyer 1995). El crecimiento del vástago, y en especial el de las hojas, es más sensible al déficit hídrico que el de la raíz (Westgate y Boyer, 1985).

El déficit hídrico puede estimular la iniciación de raíces laterales en algunas especies. Jupp y Newman (1987) encontraron en *Lolium perenne* que un bajo potencial de agua en el suelo promovió la iniciación de raíces laterales y mayor elongación de las mismas. Sharp y Davies (1979) y Stasovski y Peterson (1991) encontraron respuestas similares en maíz (*Zea mays* L.).

El efecto del déficit hídrico en una determinada especie se relaciona con los factores: intensidad, duración, etapa fenológica en la cual incide, el preacondicionamiento de la planta y la velocidad con la cual se alcanza una cierta intensidad de dicho déficit (Begg y Turner, 1976; Hsiao *et al.*, 1976). Este último factor se relaciona con la velocidad de secado del suelo y es importante porque puede determinar el tipo de respuesta fisiológica de la planta (Cornic *et al.*, 1987; Saccardy *et al.*, 1996; Babu *et al.*, 1999). En diversos trabajos se ha estudiado el efecto de la velocidad de secado sobre algunas variables fisiológicas, mediante el uso de recipientes de diferente capacidad (Ismail *et al.*, 1994; Ray y Sinclair, 1998; Sirin y Sevgican, 1999). Hay pocos estudios sobre el efecto en el crecimiento de la raíz de frijol en diferentes condiciones de humedad del suelo (Nuñez, 1991). El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de diferentes velocidades de secado del suelo sobre la dinámica del crecimiento de la raíz de plántulas de dos cultivares de frijol contrastantes en su resistencia a la sequía. La hipótesis

fue que la velocidad del secado afecta diferencialmente dicha dinámica. El crecimiento de la raíz principal es ortotrópico y su rápida elongación es importante para el establecimiento y la sobrevivencia de la plántula. La longitud y expansión del sistema radical contribuyen a la exploración del volumen del suelo y a su actividad de absorción de agua y sales minerales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en Montecillo, estado de México (19° 30' N, 98° 51' O, 2250 msnm) en una cámara de ambiente controlado (CEL 511-38, Warren Sherer) con 12 h luz/25 °C y 12 h oscuridad/20 °C, y una densidad de flujo fotónico fotosintético de 670  $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , usando una combinación de lámparas de luz incandescente, fluorescente y de sodio. El diseño empleado fue un factorial 2 x 3 completamente al azar con ocho repeticiones. Los tratamientos consistieron en la combinación de dos variedades contrastantes de frijol de hábito de crecimiento indeterminado tipo III: Bayo Madero (BM), susceptible (Acosta, 1982) y Pinto Villa (PV), resistente a la sequía (Acosta *et al.*, 1993) y tres velocidades de secado: testigo regado (T), secado lento (SL) y secado rápido (SR). Se utilizaron rizotrones de madera impermeabilizados con parafina, de las dimensiones: 30 cm de largo, 14.5 cm de ancho, 2.5 cm de grosor en la parte superior que estaba descubierta y 1.5 cm en la parte inferior. Los rizotrones tenían ambas paredes cubiertas con sendos vidrios. Los destinados para el SR tenían, además, debajo del vidrio de una de las paredes (pared posterior) una malla tipo "mosquitero", la cual evitaba la salida del suelo y propiciaba un secado rápido al retirar el vidrio. Se registró el peso individual de los rizotrones y después cada uno de éstos se llenó con 1.150 kg de suelo arenoso previamente secado a 105 °C. El suelo se regó a saturación y se dejó drenar durante 48 h, al cabo de las cuales se pesó nuevamente el sistema experimental (rizotrón+suelo+agua) considerándolo como peso a capacidad de campo. Posteriormente, en cada rizotrón se sembró a 1 cm de profundidad una semilla adosada a una de las paredes (pared anterior) quedando la parte superior del rizotrón expuesta a la pérdida de agua por evaporación. Los rizotrones se colocaron dentro de una cámara de ambiente controlado con inclinación del vidrio anterior a 60 grados con respecto a la horizontal, para lograr que el sistema radical creciera

adosado al vidrio. Se cuantificó la pérdida de agua mediante el pesado diario, lo cual permitió calcular el contenido de humedad del suelo. El T se mantuvo aproximadamente a capacidad de campo y cada tercer día se agregó el agua perdida por evapotranspiración. Excepto en el testigo, dos días después de la emergencia de la radícula se suspendió el riego y se aplicaron diariamente los tratamientos de velocidad de secado como sigue: en el SL, la pérdida de agua fue sólo por la parte superior expuesta del rizotrópico; en SR, durante el periodo iluminado se retiró diariamente el vidrio posterior durante 5 h, para permitir una rápida evaporación por la pared lateral cubierta por la malla. A partir de la suspensión del riego, en todos los tratamientos, se marcó la elongación diaria de las raíces con diferentes colores sobre el vidrio anterior, obteniéndose un esquema del sistema radical. Esta operación se suspendió el día en que las hojas simples de las plántulas con SR se doblaron en sus bordes y ya no se rehidrataron al inicio del periodo iluminado, condición de la planta considerada como marchitez permanente (Knight, 1965; Mohr y Schopfer, 1995). De esta manera, la planta sirvió como un "biosensor" de la capacidad de abastecimiento de agua y, por lo tanto, de la condición integrada de la humedad del suelo. En ese momento, se quitó el vidrio anterior y se observó qué proporción del sistema radical estaba adosada al vidrio. Posteriormente, en todos los tratamientos, la raíz se separó del suelo y se realizó el muestreo destructivo de las plántulas. Éstas estaban en la etapa V2, la cual "inicia cuando las hojas simples están desplegadas, la primera hoja compuesta inicia su crecimiento y los cotiledones pierden su forma arqueándose y arrugándose" (CIAT, 1982). Se separó la raíz del vástago y éste, a su vez, en sus partes (tallo, cotiledones, lámina, peciolo y raquis). Se determinó el área foliar en un medidor electrónico de área (LI-3100, LI-COR) y todo el material se llevó a peso seco constante en una estufa de circulación forzada de aire a 80 °C. Estos datos se analizaron con el programa Statistical Analysis System (SAS Institute, 2001) y la prueba de Tukey para la comparación de medias, y se determinó la relación raíz/vástago. Por otro lado, los esquemas del sistema radical (Figura 1) se pasaron a acetatos, de los cuales se obtuvo información de la tasa de emisión y del número de raíces. Debido a que no fue posible determinar a simple vista el límite entre raíz y tallo, no se hizo una discriminación de las raíces secundarias y las adventicias, sino se consideraron en su conjunto como secundarias+adventicias. Con una regla flexible se midió la elongación diaria de cada

raíz y con los datos se determinó la tasa de elongación de la raíz principal, del conjunto de raíces secundarias+adventicias y terciarias y de una secundaria+adventicia **individual** emitida al siguiente día de aplicados los tratamientos. Se determinó también la longitud la raíz principal y secundarias+adventicias.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las condiciones experimentales fueron las esperadas para que los resultados obtenidos puedan ser confiables; es decir, el contenido de humedad en el testigo (T) se mantuvo con pequeñas variaciones durante el experimento. En el secado lento (SL), la humedad del suelo se perdió gradualmente, hasta que al quinto día alcanzó un valor de 12.6%. En el secado rápido (SR), la pérdida fue también gradual pero a una tasa mayor de manera que al segundo día se alcanzó un valor de 13.1% (Figura 2). Una tendencia similar, pero en la planta, consignaron Cornic *et al.* (1987) en frijol desarrollado en macetas, en el que se registró un decremento del potencial hídrico de la hoja de -0.3 a -1.3 MPa en ocho días en secado lento, cubriendo las macetas para evitar la evaporación del agua del suelo. Estos mismos valores los obtuvieron en cuatro días en secado rápido, con las macetas descubiertas en la parte superior.

### Sistema Radical

Un sistema radical puede ser concebido como una población de meristemos con amplia variación en su duración y actividad (Fitter, 1996). El crecimiento de dicho sistema es el resultante de la "sumatoria" de las raíces individuales que lo conforman. Al quitar el vidrio anterior se observó que la totalidad del sistema radical creció adosado a éste y que estaba formado de raíces de varias categorías: principal, secundarias+adventicias y terciarias (estas últimas excepto en SR) (Figura 1), así como los pelos radicales. Las raíces de cada categoría difirieron en edad ontogénica lo cual podría determinar una respuesta diferencial a la absorción de agua como lo indicaron, en plántulas de *Pinus taeda* L., MacFall *et al.* (1991).

### Efecto de la Velocidad de Secado en la Raíz

**Tasa de elongación de la raíz principal.** No se presentaron diferencias estadísticas entre variedades

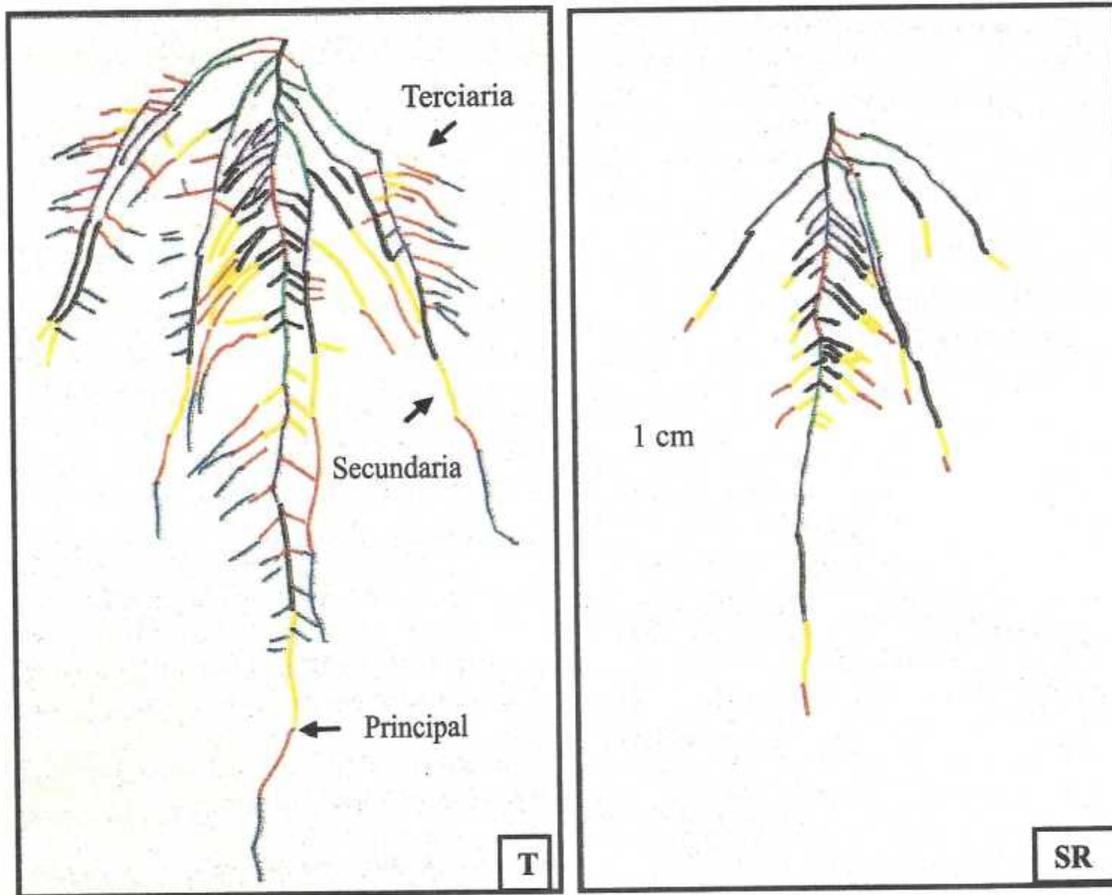


Figura 1. Diagrama del sistema radical con las diferentes categorías de raíz de la variedad BM en testigo (T) y secado rápido (SR) obtenido al final del experimento. Nótese la falta de raíces terciarias en SR.

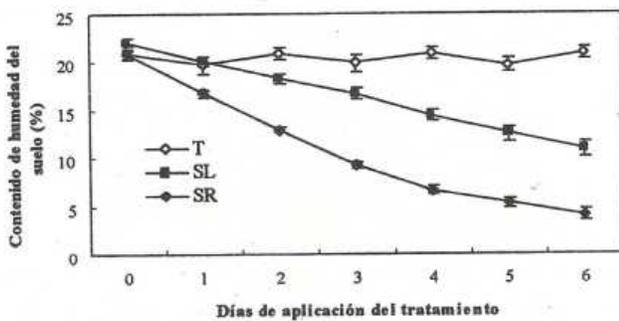


Figura 2. Contenido de humedad del suelo (en porcentaje) con base en su peso seco durante el experimento, en tres velocidades de secado del suelo. T = testigo regado, SL = secado lento, SR = secado rápido. Los valores son promedio de ocho repeticiones y las líneas verticales indican  $\pm$  el error estándar.

con las diferentes velocidades de secado del suelo, incluyendo al T con riego. Dentro de variedades, la tasa de elongación disminuyó significativamente con

respecto al T, sólo en SR al cuarto día y en BM y en PV al tercer día de iniciados los tratamientos (Figura 3). Una mayor tasa de elongación es importante para que el sistema radical alcance una rápida penetración y explore los estratos más profundos del suelo, favoreciendo el establecimiento de la plántula. Esta respuesta propiciará el escape a la sequía mediante el incremento de absorción de agua (Kaspar *et al.*, 1984).

**Tasa de emisión de raíces secundarias+adventicias.** En la tasa de emisión de raíces (número por planta por día) no se encontraron diferencias estadísticas entre variedades, en ningún tratamiento de secado del suelo. Por otra parte, en SR, las dos variedades presentaron diferencias estadísticas con respecto al T, al cuarto día de aplicación del tratamiento (Figura 3). La inhibición de la tasa de emisión de raíces debido al estrés hídrico, en especial en PV que es tolerante a la sequía, podría ser una estrategia que le permite a la planta

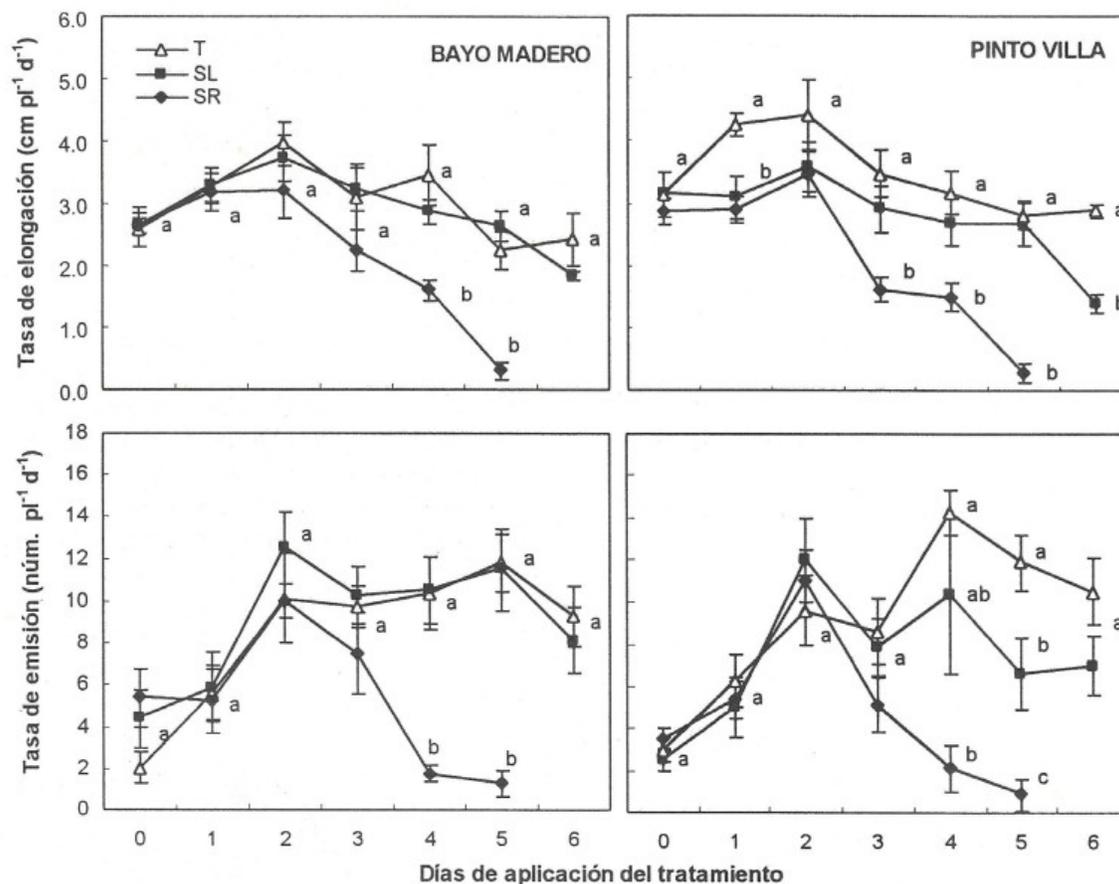


Figura 3. Tasa de elongación de la raíz principal y tasa de emisión de raíces secundarias+adventicias emitidas por día de dos variedades de frijol, en tres velocidades de secado del suelo. T = testigo regado, SL = secado lento, SR = secado rápido, pl = planta, d = día. Los valores son promedio de ocho repeticiones y las líneas verticales indican  $\pm$  el error estándar. En cada día letras diferentes representan diferencias significativas a  $P \leq 0.05$  de acuerdo con la comparación de medias de Tukey.

economizar fotosintatos durante la sequía, los cuales podrían ser utilizados para la formación de nuevas raíces cuando se reanude el riego. Al respecto, Vartanian (1996) indicó que en *Brassica napus* ocurre una rizogénesis como respuesta a un estrés progresivo de sequía, permaneciendo las raíces así originadas en un estado quiescente y reanudando su crecimiento rápidamente después de un riego; esto es, por lo tanto, otra estrategia de tolerancia a la sequía que favorece una recuperación posterior al estrés.

**Número de raíces secundarias+adventicias.** El T de PV presentó mayor número de raíces que el de BM. El menor número de raíces se observó en SR en las dos variedades, presentando diferencias estadísticas con respecto a SL y al T (Cuadro 1). En SL, la variedad PV disminuyó en 18% el número de raíces con respecto a su T, lo cual podría haber contribuido a

retardar el secado del suelo. La tasa de emisión, como era de esperarse, se reflejó directamente en el número de raíces. El establecimiento y/o la sobrevivencia de la plántula con diferentes tasas de secado del suelo podría estar relacionado al número de raíces y a su longitud. Creelman *et al.* (1990), en plántulas de soya (*Glycine max* [L.] Merr.), reportaron que a bajos potenciales de agua, el crecimiento de la raíz se afectó ligeramente en contraste con el del hipocótilo. Esto puede depender de la variedad, como se observó en el presente trabajo para la longitud de raíces secundarias+adventicias de SL en BM (Cuadro 1).

**Tasa de elongación de las raíces secundarias+adventicias.** En esta variable, como en el caso de la raíz principal, no se detectaron diferencias estadísticas entre variedades, en ninguna de las velocidades de secado. En ambas variedades,

Cuadro 1. Longitud y número de raíces de las diferentes categorías en cada tratamiento al final del experimento.

Variedad <sup>†</sup>	Velocidad de secado <sup>‡</sup>	Longitud de raíces por planta			Número de raíces por planta	
		Principal	Secundarias+adventicias	Terciarias	Secundarias+adventicias	Terciarias
----- cm -----						
BM	T	24.07 a <sup>§</sup>	162.61 a	23.93 a	57.88 a	23.88 a
	SL	23.50 a	199.70 a	18.85 a	58.13 a	25.75 a
	SR	17.75 c	61.59 c	SD	25.75 b	SD
PV	T	28.07 a	190.64 a	14.26 a	60.88 a	19.75 a
	SL	22.90 b	141.54 b	15.95 a	50.25 a	16.63 a
	SR	17.01 c	54.81 c	SD	26.13 b	SD

<sup>†</sup>BM = Bayo Madero, PV = Pinto Villa. <sup>‡</sup>T = testigo regado, SL = secado lento, SR = secado rápido, SD = sin datos. Los valores promedio de ocho repeticiones. <sup>§</sup> En cada columna letras diferentes representan diferencias significativas a  $P \leq 0.05$  de acuerdo con la comparación de medias de Tukey.

desde la aplicación de los tratamientos, el SR presentó significativamente menor tasa de elongación a partir del tercer día con respecto al T, mientras que en SL sólo en la variedad PV ocurrió la misma respuesta a partir del quinto día (Figura 4A).

Por otro lado, la tasa de elongación de una raíz **individual** secundaria+adventicia tuvo un comportamiento similar al de la raíz principal. Dicha tasa disminuyó significativamente en SR en las dos variedades, a partir del tercer día de la aplicación de

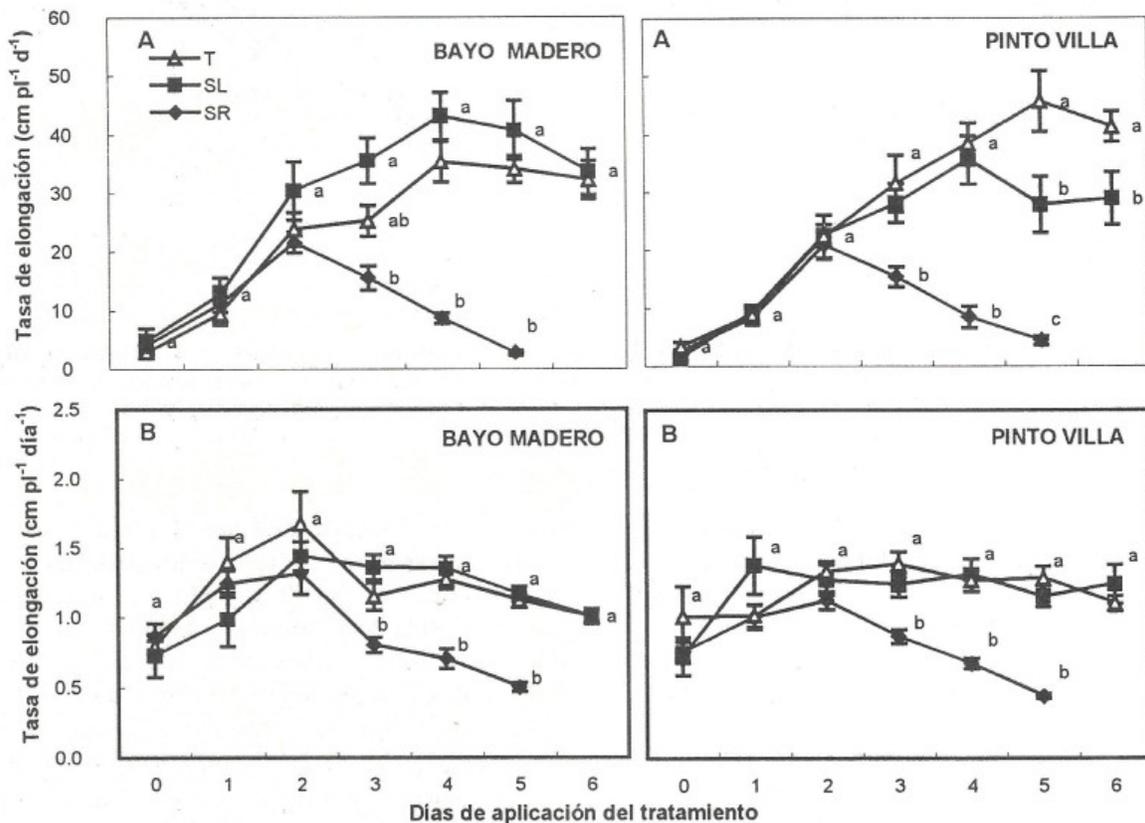


Figura 4. Tasa de elongación del conjunto de raíces secundarias+adventicias por planta (A) y tasa de elongación de raíz *individual* secundaria+adventicia (B) de dos variedades de frijol, en tres velocidades de secado del suelo. T = testigo regado, SL = secado lento, SR = secado rápido, pl = planta, d = día. Los valores son promedio de ocho repeticiones y las líneas verticales indican  $\pm$  el error estándar. En cada día letras diferentes representan diferencias significativas a  $P \leq 0.05$  de acuerdo con la comparación de medias de Tukey.

los tratamientos, hasta llegar a ser mínima al quinto día. En cambio, el comportamiento de SL fue similar al T en las dos variedades (Figura 4B). La tasa de elongación de una raíz individual secundaria+adventicia de PV en SL fue muy diferente de la del conjunto de las raíces de esta categoría, debido a que en dicho conjunto está implicado, además, el número de raíces. Lo anterior indica que mientras éstas continúan elongándose, la tasa de emisión de nuevas raíces disminuye, dando como resultado una menor longitud del conjunto (Cuadro 1). Zhang y Davies (1989) sugirieron que las raíces secundarias son menos efectivas para mantener la turgencia de los ápices de la raíz durante la sequía del suelo.

**Raíces terciarias.** Las raíces terciarias aparecieron a partir del cuarto día después de iniciados los tratamientos. Dichas raíces no se presentaron en SR (Figura 1; Cuadro 1), sino que se observaron sólo en SL y en el T, sin diferencias estadísticas en el número de raíces entre estos tratamientos ni entre variedades. Estos resultados podrían deberse a la breve duración del experimento. Como en el caso de las raíces secundarias, Zhang y Davies (1989) señalaron que las terciarias son menos efectivas para mantener la turgencia durante la sequía del suelo.

**Longitud del sistema radical.** Entre variedades, el T con riego no presentó diferencias estadísticas en ninguna de las categorías de raíz. Sin embargo, para la longitud de la raíz principal, Kuruvadi *et al.* (1988) reportaron diferencias altamente significativas en plántulas de 20 genotipos de frijol con riego. En el presente trabajo, la longitud de la raíz principal y la de las raíces secundarias+adventicias de BM en SR fue menor estadísticamente con respecto al T, mientras que, en PV, hubo diferencias estadísticas tanto en SR, como en SL respecto a su T. En los tratamientos donde ocurrieron raíces terciarias no hubo diferencias estadísticas en su longitud (Cuadro 1). Este comportamiento muestra que PV en estado de plántula tiende a inhibir el crecimiento de la raíz aún con un secado lento del suelo. La resistencia a la sequía podría incrementarse con la disminución en el tamaño del sistema radical, como lo indicó Passioura (1983). Balestrini y Vartanian (1983) consignaron, en *Brassica napus*, que aquellas raíces inducidas por la sequía provenientes de la raíz principal eran más largas que las que se desarrollaron de las laterales (secundarias).

### Efecto de la Velocidad de Secado del Suelo en el Vástago

**Área foliar.** El déficit hídrico inhibió el crecimiento de la hoja, con lo cual el área foliar se redujo. En SR, sólo se desarrollaron las hojas simples, mientras que, en SL y T, se desarrolló, además, la primera compuesta, aunque ésta era todavía pequeña. A diferencia del crecimiento de la raíz, el área foliar fue estadísticamente diferente en SL y SR con respecto al T, en las dos variedades. El área foliar fue significativamente diferente en las tres velocidades de secado del suelo, en ambas variedades. Por efecto del SL, el área foliar se redujo con respecto al T, sólo en 20% en BM y 25% en PV. En cambio, en SR, la reducción fue cerca de 90% en BM y 84% en PV.

**Peso seco de la planta y sus órganos.** El peso seco de la planta entera fue menor en SR en comparación con su T en ambas variedades (Figura 5a). En general, el peso seco de la planta entera y sus partes fue mayor en BM, tanto en las dos velocidades de secado, como en el testigo, ya que esta variedad presenta mayor porte que PV. El peso seco del tallo fue estadísticamente diferente entre variedades en las dos velocidades de secado y testigo (Figura 5c). En cotiledones, debido a que las reservas eran originalmente de 0.28 g en BM y 0.24 en PV, el menor crecimiento en SR se debió a que dichas reservas se utilizaron aproximadamente en 70% en las dos variedades. Por lo tanto, en SR al final del experimento se tuvo el mayor peso seco de cotiledones en las dos variedades y éste fue estadísticamente diferente al de SL y al T; en estos dos últimos, el peso seco de los cotiledones fue similar, ya que las reservas se utilizaron en 90% (Figura 5d). En lámina, peciolo y raquis, el peso seco fue severamente reducido por el SR en las dos variedades, sin presentar diferencias estadísticas entre ellas, pero sí con respecto a SL y T (Figuras 5e y 5f). El peso seco de lámina se redujo con respecto al T en BM por efecto del SR en 66%, en contraste con el 59% en PV. En forma similar, en peciolo y raquis estas reducciones fueron de 63% para BM y 57% para PV. La velocidad de SL redujo el peso seco de lámina, peciolo y raquis en menor grado que el SR; sin embargo, sólo PV fue estadísticamente diferente a su T, con una reducción del peso seco de lámina de alrededor de 13% y de 14% para peciolo y raquis, mientras que, en BM, fue de 11 y 13%, respectivamente.

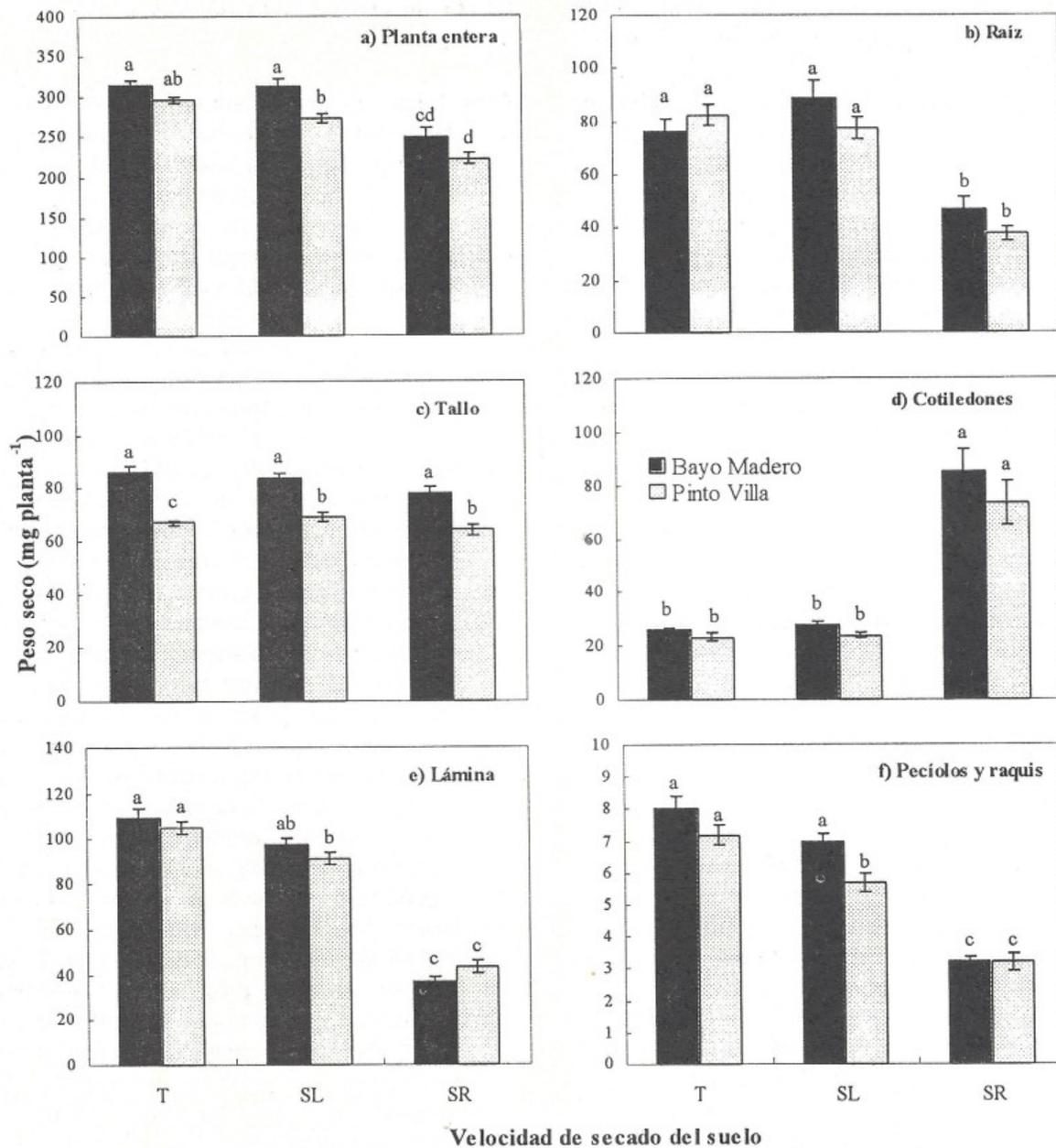


Figura 5. Peso seco de cada órgano de la planta de dos variedades de frijol, en tres velocidades de secado del suelo. T = testigo regado, SL = secado lento, SR = secado rápido. Los valores son promedio de ocho repeticiones y las líneas verticales indican  $\pm$  el error estándar. La misma letra no representa diferencias significativas a  $P \leq 0.05$  de acuerdo con la comparación de medias de Tukey.

**Relación raíz/vástago (R/V).** Ocurrieron cambios estadísticamente significativos en la relación R/V por efecto de la velocidad de secado, en relación con el T. En SL en la variedad BM, la relación aumentó de 0.32 en T a 0.40 en SL, pero, en SR, disminuyó significativamente de 0.32 a 0.23. En la variedad PV disminuyó de 0.39 en T a 0.21 en SR. No hubo diferencias significativas por efecto del SL.

El aumento de R/V, consignado en el presente trabajo en BM, está de acuerdo con los resultados reportados por White e Izquierdo (1991) en frijol, y por Galván-Tovar *et al.* (2003) en la misma variedad y etapa (V2), así como en las etapas de primera hoja compuesta (V3) y tercera compuesta (V4). Estos resultados (de aumento) se podrían explicar porque, según Sharp y Davies (1979), la disponibilidad limitada de agua

ocasiona la disminución del crecimiento del vástago en mayor grado que el de la raíz, lo cual puede atribuirse a que la hoja es más sensible al déficit hídrico que la raíz. Así, Westgate y Boyer (1985) encontraron, en maíz, que las hojas cesaron su crecimiento a potenciales más altos que el de las raíces.

### CONCLUSIONES

- La dinámica del crecimiento de la raíz fue afectada por la velocidad de secado del suelo y se reflejó en el vástago en la acumulación de biomasa.
- En estado de plántula, la variedad PV resistente a la sequía respondió con mayor celeridad que BM susceptible a la sequía, inhibiendo su crecimiento y, por lo tanto, la longitud de la raíz principal y de las raíces secundarias+adventicias.
- La velocidad de secado lento del suelo permitió que cada categoría de raíz manifestara una respuesta en forma diferencial, al efecto del déficit hídrico al que se expusieron.
- Con el secado rápido del suelo primero ocurrió una desaceleración de la tasa de crecimiento de todo el sistema radical, hasta que se detuvo por completo conforme progresó el déficit hídrico.
- En el secado rápido no ocurrió la emisión de raíces terciarias y se inhibió el crecimiento de la raíz principal y de las secundarias+adventicias. Esto se reflejó en el vástago como una menor acumulación de biomasa.
- De acuerdo con la velocidad de secado, la relación R/V puede aumentar o disminuir.

### LITERATURA CITADA

- Acosta G., J.A. 1982. Bayo Madero y Bayo Los Llanos, nuevas variedades de frijol para el Norte Centro de México. Folleto Técnico 1. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Campo Agrícola Experimental Valle del Guadiana. Durango, México.
- Acosta G., J.A., I. Sánchez V., R. Ochoa M., A. Pajarito R. y F. Ibarra P. 1993. Pinto Villa, nueva variedad de frijol de temporal para el estado de Durango. Folleto Técnico 3 Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, México.
- Al-Karaki, G.N., B.R. Clark y V.C. Sullivan. 1995. Effects of phosphorus and water stress levels on growth and phosphorus uptake of bean and sorghum cultivars. *J. Plant Nutr.* 18: 563-578.
- Babu, R.Ch., M.S. Pathan, A. Blum y H.T. Nguyen. 1999. Comparison of measurement methods of osmotic adjustment in rice cultivars. *Crop Sci.* 39: 150-158.
- Balestrini, S. y N. Vartanian. 1983. Rhizogenic activity during water stress-induced senescence in *Brassica napus* var. oleifera. *Physiol. Plant* 21: 269-277.
- Begg, J.E. y C.N. Turner. 1976. Crop water deficits. *Adv. Agron.* 28: 161-217.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1982. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común. Cali, Colombia.
- Cornic, G., I. Papageorgiou y G. Louason. 1987. Effect of a rapid and a slow drought cycle followed by rehydration on stomatal and non-stomatal components of leaf photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* L. *J. Plant Physiol.* 126: 309-318.
- Creelman, R.A., H.S. Mason, R.J. Bensen, J.S. Boyer y J.E. Mullet. 1990. Water deficit and abscisic acid cause differential inhibition of shoot versus root growth in soybean seedlings. *Plant Physiol.* 92: 205-214.
- Fitter, A. 1996. Characteristics and functions of root systems. pp. 1-20. *In: Waisel, Y., A. Eshel y U. Kafkafi (eds.). Plant roots. The hidden half.* Marcel Dekker. New York.
- Galván-Tovar, M., J. Kohashi-Shibata, A. García-Esteva, P. Yáñez-Jiménez, E. Martínez-Villegas y L. Ruiz-Posadas. 2003. Déficit hídrico en planta, acumulación de biomasa y área foliar en tres etapas vegetativas en frijol común. *Agric. Téc. en México* 29: 101-111.
- Hsiao, T.C., E. Acevedo, E. Fereres y D.W. Henderson. 1976. Water stress, growth, and osmotic adjustment. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B* 273: 479-500.
- Ismail, A.M., A.E. Hall y E.A. Bray. 1994. Drought and pot size effects on transpiration efficiency and carbon isotope discrimination of cowpea accessions and hybrids. *Aust. J. Plant Physiol.* 21: 23-35.
- Jupp, A.P. y E.I. Newman. 1987. Morphological and anatomical effects of severe drought on the roots of *Lolium perenne* L. *New Phytol.* 105: 393-402.
- Kaspar, T.C., H.M. Taylor y R.M. Shibles. 1984. Taproot-elongation rates of soybean cultivars in the glasshouse and their relation to field rooting depth. *Crop Sci.* 24: 916-920.
- Knight, R.O. 1965. The plant in relation to water. Heinemann Educational Books. London, UK.
- Kramer, P.J. 1983. Water relations of plants. Academic Press. New York.
- Kramer, P.J. y J.S. Boyer. 1995. Water relations of plants and soils. Academic Press. San Diego, CA.
- Kuruvadi, S., F.F. Hernández-Rodríguez y F. Galván-Castillo. 1988. Diferencias varietales para características de plántula de frijol en dos medios de siembra. *Rev. Fitotec. Mex.* 11: 133-141.
- Lazcano-Ferrat, I. y C.J. Lovatt. 1999. Relationship between relative water content, nitrogen pools and growth of *Phaseolus vulgaris* L. and *P. acutifolius* A. Gray during water deficit. *Crop Sci.* 39: 467-475.
- Levitt, J. 1972. Responses of plants to environmental stresses. Academic Press. New York.
- MacFall, J.S., G.A. Johnson y P.J. Kramer. 1991. Comparative water uptake by roots of different ages in seedling of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *New Phytol.* 119: 551-560.
- Mohr, H. y P. Schopfer. 1995. Plant physiology. Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- Núñez-Barrios, A. 1991. Morfología de la raíz y parte aérea de plántulas de frijol bajo diferentes condiciones de humedad. pp. 33-40. *In: Phaseolus. Publicación Especial 8. Collaborative Research Support Program-Instituto Nacional*

- de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Michigan State University. Durango, Durango, México.
- Parsons, L.R. 1979. Breeding for drought resistance: what plant characteristics impart resistance? Hort. Sci. 14: 590-593.
- Passioura, J.B. 1983. Root and drought resistance, Agric. Water Manage. 7: 265-280.
- Ray, J.D. y T.R. Sinclair. 1998. The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress. J. Exp. Bot. 49: 1381-1386.
- Saccardy, K., G. Cornic, J. Brulfert y A. Reyss. 1996. Effect of drought stress on net CO<sub>2</sub> uptake by *Zea* leaves. Planta 199: 589-595.
- SAS Institute, Inc. 2001. The SAS system release 8.2 for Windows. Cary, NC.
- Sharp, R.E. y W.J. Davies. 1979. Solute regulation and growth by roots and shoots of water-stressed maize plants. Planta 147: 43-49.
- Sirin, U. y A. Sevigan. 1999. The effect of pot size and growing media on growth of tomato in soilless culture. Acta Hort. (ISHS) 491: 343-347.
- Stasovski, E. y C.A. Peterson. 1991. The effects of drought and subsequent rehydration on the structure and vitality of *Zea mays* seedling roots. Can. J. Bot. 69: 1170-1178.
- Vartanian, N. 1996. The drought rhizogenesis. pp. 471-482. In: Waisel, Y., A. Eshel y U. Kafkafi (eds.). Plant roots. The hidden half. Marcel Dekker. New York.
- Westgate, M.E. y J.S. Boyer. 1985. Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem and silk growth at low water potentials in maize. Planta 164: 540-549.
- White, J.W. y J. Izquierdo 1991. Physiology of yield potential and stress tolerance. pp. 287-382. In: Van Schoonhoven, A. y O. Voysest (eds.). Common beans: research for crop improvement. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia.
- Zhang, J. y W.J. Davies. 1989. Abscisic acid produced in dehydrating roots may enable the plant to measure the water stress status of the soil. Plant Cell Environ. 12: 73-81.

# EFECTO DE LA TENSIÓN DE HUMEDAD EN EL SUELO SOBRE RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL BRÓCOLI CON RIEGO POR GOTEO

## Effect of Soil Water Tension on Yield and Quality of Broccoli under Drip Irrigation

Salvador Villalobos-Reyes<sup>1</sup>, Javier Z. Castellanos<sup>1†</sup>, Leonardo Tijerina-Chávez<sup>2</sup> y Guillermo Crespo-Pichardo<sup>2</sup>

### RESUMEN

El propósito del presente estudio fue definir las tensiones de humedad del suelo para maximizar el rendimiento y la calidad del florete en brócoli, cultivar Patriot. El experimento se estableció en un Vertisol. La plantación se estableció a doble hilera en surcos separados a 1 m, la distancia entre hileras fue de 25 cm y 30 cm entre plantas, con una densidad de población de 66 000 plantas ha<sup>-1</sup>. Se evaluaron seis tratamientos en bloques al azar con cuatro repeticiones: 1) acolchado plástico a 28 kPa, 2) seco a 45 kPa, 3) semiseco a 36 kPa, 4) medio a 28 kPa, 5) semihúmedo a 20 kPa, 6) húmedo a 12 kPa de tensión de humedad en el suelo. El cultivo presentó un consumo de agua de 24.5, 27.3, 31.0, 35.8, 40.0 y 45.7 cm de lámina en los tratamientos de acolchado, seco, semiseco, medio, semihúmedo y húmedo, respectivamente. Los mayores valores de grosor de tallo, altura de planta, cobertura de área foliar, número de tallos secundarios y acumulación de biomasa se presentaron en el tratamiento húmedo. El máximo rendimiento comercial se obtuvo en el tratamiento semihúmedo con la aplicación del riego a 20 kPa de tensión. El vigoroso crecimiento vegetativo en el tratamiento húmedo no favoreció el desarrollo del florete y el rendimiento disminuyó con relación al tratamiento semihúmedo.

*Palabras clave:* consumo de agua, eficiencia uso del agua, tallo hueco.

<sup>1</sup>Unidad de Horticultura Intensiva, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apdo Postal 112, 38010 Celaya, Guanajuato, México

<sup>†</sup>Autor responsable (casteja100@hotmail.com)

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

Recibido: Junio de 2002. Aceptado: Marzo de 2005.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 321-328.

### SUMMARY

The objective of this study was to determine the best soil water tension to maximize commercial yield and quality of broccoli, cultivar Patriot. This research was done in a Vertisol. The plants were established in double rows, 1 m wide. Distance between plant lines was 25 cm and between plants 30 cm. There were six treatments in a randomized block design with four replicates: 1) plastic mulch at 28 kPa, 2) dry, at 45 kPa, 3) semi-dry, at 36 kPa, 4) medium, at 28 kPa, 5) semi-moist, at 20 kPa, 6) moist, at 12 kPa moisture tension in the soil. Water consumptions of 24.5, 27.3, 31.0, 35.8, 40.0, and 45.7 cm were measured in the above treatments. The high values of stem thickness, plant height, coverage of leaf area, number of secondary stems, and biomass accumulation occurred in the moist treatment. The maximum commercial yield was obtained with the semi-moist treatment when 20 kPa tension was applied. The vigorous vegetative growth in the moist treatment did not favor floret size or yield, since these parameters were lower than those of the semi-moist treatment.

*Index words:* water consumption, water use efficiency, hollow stem.

### INTRODUCCIÓN

En el estado de Guanajuato, México la agricultura consume alrededor de 78% de agua del subsuelo y los acuíferos están sufriendo abatimientos del orden de 1.5 a 6 m año<sup>-1</sup>. Esta situación eleva el costo del bombeo de agua y, sobre todo, reduce su disponibilidad.

El brócoli es un cultivo de creciente importancia y prácticamente toda la producción de 30 000 ha de la región del Bajío que se dedican a su producción, se destina al mercado de exportación. Uno de los problemas que enfrenta el cultivo es su alta demanda de agua para poder conseguir alto potencial de rendimiento.

El tensiómetro ha mostrado ser un instrumento confiable para el control de la humedad en el suelo en los sistemas de riego localizados (Van der Gulik, 1999). Uno de los primeros trabajos para evaluar el efecto de la tensión de humedad del suelo en el cultivo del brócoli fue reportado por Maurer (1976) en Canadá, quien realizó un estudio en macetas en invernadero para probar diferentes grados de abatimiento de la humedad aprovechable en el suelo (12, 40 y 68%), equivalentes a tensiones promedio de 20, 30 y 50 kPa. Este autor encontró que el someter a las plantas de brócoli a 50 kPa durante todo el ciclo, redujo el rendimiento en 37% respecto al óptimo de 20 kPa.

En California, en un suelo areno-limoso, Letey *et al.* (1983) estudiaron la interacción de diferentes dosis de nitrógeno (90, 180 y 270 kg ha<sup>-1</sup>) con dos tratamientos de riego. El primer tratamiento de riego consistió en regar a 20 kPa de tensión de humedad en el suelo y el segundo tratamiento consistió en aplicar 30% más de agua que la aplicada al primer tratamiento. El mejor rendimiento de 10 t ha<sup>-1</sup> se alcanzó en el tratamiento de riego a 20 kPa.

Prácticamente no hay ningún reporte realizado en suelos arcillosos como los Vertisoles de Guanajuato para el cultivo de brócoli.

El objetivo de este trabajo fue definir la tensión de humedad del suelo a lo largo del ciclo para conseguir el máximo rendimiento y mejor calidad de florete de brócoli con el sistema de riego por goteo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en un Vertisol (FAO, 1974) en Celaya, Guanajuato, México (20° 32' N; 100° 49' O) con 42, 34, 24% y 42, 32, 26% de arcilla, limo y arena, en los estratos de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm, respectivamente. El clima es de tipo BS<sub>1</sub> hw (w) (e), seco con lluvias en verano (García, 1980). El 8 de enero de 2000 se trasplantó brócoli, cultivar Patriot, con dos hojas bien definidas en surcos separados a cada metro; sobre cada surco se colocaron dos hileras de plantas separadas a 25 cm y 30 cm entre plantas. Se estudiaron seis tratamientos: 1) acolchado plástico a 28 kPa, 2) seco a 45 kPa, 3) semisecho a 36 kPa, 4) medio a 28 kPa, 5) semihúmedo a 20 kPa, 6) húmedo a 12 kPa de tensión de humedad en el suelo como límite inferior. El límite superior de tensión de 5 kPa fue igual para todos los tratamientos. En el acolchado se usó plástico bicolor, blanco arriba y negro abajo, calibre 125 galgas de 80 cm de ancho.

Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones distribuidas en bloques al azar. La unidad experimental correspondió a una parcela de 4 x 12 m (cuatro surcos de 12 m de largo), sobre cada surco se tendió cinta de goteo con goteros a cada 30 cm con capacidad de 1 L h<sup>-1</sup>. La fertilización se realizó cada semana a través del agua de riego siguiendo las recomendaciones propuestas por Castellanos *et al.* (2001) para el brócoli en esta región de México. El control de plagas se realizó mediante el uso de agroquímicos según el programa elaborado por Bujanos-Muñiz y Marín (1996). La humedad en el suelo se controló a través de tensiómetros. En dos parcelas de cada tratamiento se instalaron tensiómetros (Marca: Irrrometer, Riverside, California) separados a 12.5 cm de la línea de goteo, entre dos plantas y a 15, 30 y 45 cm de profundidad en el suelo.

Antes de comenzar el experimento, se determinó la curva característica de retención de humedad del suelo en condiciones de campo empleando tensiómetros (Figura 1), la curva se generó para la profundidad homogénea de 0 a 30 cm debido a que en esta zona se localiza más de 80% de las raíces (Nieuwhof, 1969). A diario, a las 8:00 h y a las 13:00 h, se registraron los datos de tensión de humedad en el suelo. La media de la tensión en las profundidades de 15 y 30 cm tenía que alcanzar la tensión límite que se propuso para cada tratamiento para aplicar el riego. En cada riego, se repuso la humedad en un volumen de suelo de 40 cm de diámetro de mojado a través de cada gotero de 1 L h<sup>-1</sup> de gasto. El cálculo del volumen de riego de reposición se realizó mediante la expresión:

$$V = [\pi \cdot d^3 \cdot (0.44 - x')] / 4,$$

donde: V es el volumen (mL) de riego de reposición para el estrato x, d es el diámetro (cm) de mojado, y x' es el contenido volumétrico de humedad correspondiente a la lectura del tensiómetro a la profundidad x.

El volumen de riego fue necesario para alcanzar nuevamente el contenido volumétrico de agua de 0.44 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> que corresponde a 5 kPa de tensión. Todos los tratamientos se regaron siempre considerando como límite superior de tensión de humedad a 5 kPa y, como límite inferior, la tensión que se propuso para cada tratamiento.

El trasplante se realizó en húmedo después de un riego de 12 h. Cuando terminó el trasplante, inmediatamente se aplicó otro riego de 66 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para

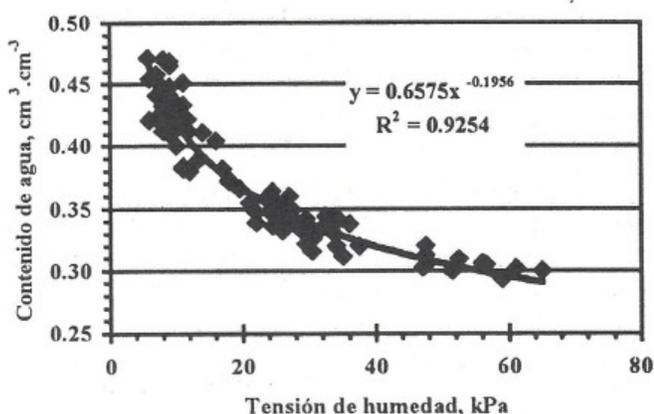


Figura 1. Curva de retención de humedad del suelo del lote experimental.

garantizar el contacto del suelo con la raíz. Después de este riego, cada tercer día se aplicaron tres riegos ligeros de  $24 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  a todos los tratamientos para lograr el establecimiento del cultivo y evitar la formación de costras. Estos riegos son necesarios y prácticamente se realizan para la mayoría de los cultivos de trasplante en sistemas de goteo debido a que es una etapa muy delicada en que la mayoría de las plantas desarrollan nuevas raíces adventicias. Durante los siguientes 10 días [20 días después del trasplante (DDT)], los riegos se aplicaron empleando sólo el tensiómetro localizado a 15 cm de profundidad, mientras que los tensiómetros localizados a mayores profundidades no registraron cambios en las lecturas de tensión de humedad. Durante el resto del ciclo, se consideraron las lecturas de los tensiómetros de 15 y 30 cm de profundidad. El tensiómetro de 45 cm se empleó como indicador del movimiento de agua en el perfil del suelo.

Se realizaron muestreos de biomasa total en las cuatro repeticiones de todos los tratamientos a 0, 20, 47, 67, 89 DDT. El muestreo consistió en cortar toda la parte aérea de las plantas en una superficie de  $1 \text{ m}^2$ , la muestra fresca se secó en una estufa con ventilación forzada a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta alcanzar peso constante. También se tomaron en cinco plantas en las cuatro repeticiones de los seis tratamientos, datos de diámetro de tallo, altura de la planta, cobertura de área foliar y número de tallos laterales.

La cosecha comenzó a 88 DDT, cuando la superficie del florete tenía similar tamaño de granos, granos cerrados y el mismo tono de coloración. El rendimiento se evaluó en una superficie de  $4 \text{ m}^2$  en las cuatro repeticiones de los seis tratamientos.

La clasificación de la cosecha se realizó con base en el criterio de las maquiladoras de la región Bajío, como: Grado 1, Grado 2 y desecho. Se consideró Grado 1 aquel florete con grano cerrado, color brillante y homogéneo, y desarrollo uniforme de la superficie del florete. El Grado 2 fue aquel florete con menos de cuatro tallos secundarios con flores secas, desarrollo anormal leve de granos y color uniforme, y la presencia de algún daño mecánico leve. En el desperdicio entraron todos los floretes no considerados en los dos grados anteriores. El problema de tallo hueco no se consideró como factor limitativo de calidad para fines de proceso.

Los datos de biomasa, fenología y rendimiento se sometieron al análisis de varianza, usando el procedimiento GLM del programa estadístico SAS, Versión 5 (SAS Institute, 1985). La separación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey a 5% de significancia; las relaciones de asociación entre las variables se realizaron con procedimientos de regresión lineal simple usando el mismo programa SAS (SAS Institute, 1985).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Tensiones de Humedad en el Suelo en el Transcurso del Ciclo de Crecimiento

Durante los primeros 10 días después del trasplante (DDT), los tensiómetros localizados a 15 cm de profundidad marcaron lecturas de 1.5 a 3 kPa; estos valores se derivan de la misma variabilidad de la sensibilidad de la cápsula de los tensiómetros, ya que a esta fecha aún no se establecían los tratamientos de riego. En el transcurso de este período, se aplicaron el riego de sello con  $66 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y tres riegos ligeros de  $24 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  cada tercer día para favorecer el rápido anclaje y evitar la formación de costras.

Cuando se cumplieron 20 DDT, en los tratamientos semihúmedo y húmedo, se alcanzó el contenido de humedad objetivo y fue posible comenzar con el tratamiento respectivo (Figura 2). En las parcelas de los tratamientos medio y acolchado, se alcanzó el contenido de humedad objetivo hasta 30 días; en el tratamiento semiseco, se consiguió hasta 40 días; y en el tratamiento seco, fue hasta 50 días. El retraso para alcanzar el contenido de humedad objetivo en los tratamientos seco y semiseco se debió a una lluvia de 3.8 mm que ocurrió el 2 de febrero de 2000, aunado a la frecuencia de riegos en los primeros

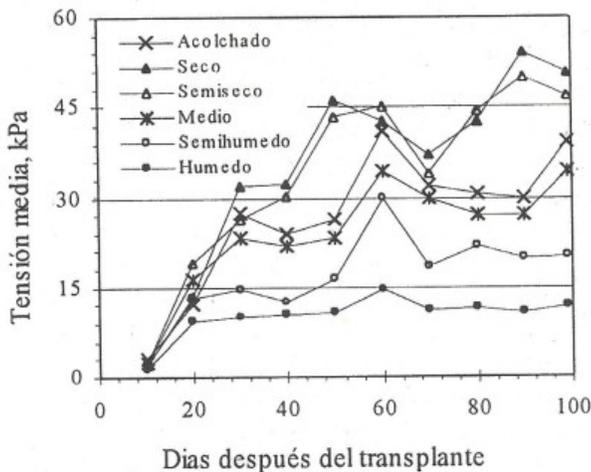


Figura 2. Tensiones de humedad promedio durante el desarrollo de brócoli.

10 días para favorecer el establecimiento y anclaje de la planta, a la alta capacidad del suelo para almacenar humedad, a las condiciones propias del invierno que propician baja evaporación y transpiración.

A 50 DDT, cuando el cultivo tenía la máxima tasa de crecimiento, los tensiómetros se dispararon del intervalo de las tensiones de manejo, por lo que la estrategia de leer las tensiones en la mañana para definir los riegos no fue suficiente y hubo la necesidad de leer los tensiómetros en las tardes para manejar la humedad en el intervalo de tensiones en estudio. Esto propició algunas veces la aplicación hasta de dos

riegos durante el día en los tratamientos húmedo y semihúmedo.

### Consumo de Agua

El consumo de agua por el cultivo de brócoli al inicio del ciclo es relativamente bajo (Figura 3). A 35 DDT, la diferencia en el consumo de agua no supera 3 cm de lámina entre los tratamientos húmedo y seco. Incluso, a 45 DDT, justamente a la mitad del ciclo vegetativo, tan sólo se habían consumido 12.5 y 8 cm de lámina de agua en los tratamientos húmedo y seco, respectivamente, lo cual representa menos de 30% del total de agua consumida por las plantas en estos tratamientos durante todo el ciclo. Cuando aparece el florete, a 65 DDT, es notoria que la diferencia en la cantidad de agua aplicada entre los tratamientos y el consumo va de 11 a 20 cm de lámina en los tratamientos seco y húmedo, respectivamente. Para esta fecha, ya se había cumplido más de 70% del tiempo que dura el ciclo, y sólo se había consumido 45% del total de agua. Es sorprendente la cantidad de agua que demanda el cultivo durante la etapa de desarrollo del florete, que comprende desde la apertura del botón (65 DDT) hasta el momento de la cosecha (88 DDT). Cuando inicia la cosecha del florete, las tasas de crecimiento y desarrollo no declinan. Entonces, no es conveniente reducir el riego

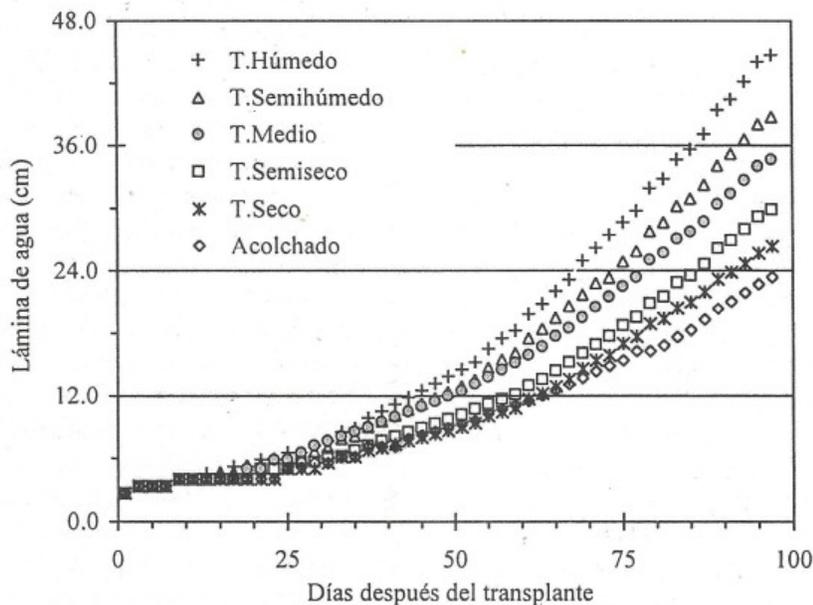


Figura 3. Consumo de agua acumulado de brócoli cv. Patriot en el invierno de 2000.

durante esta etapa de desarrollo, pues, además de reducir el tamaño del florete, pueden provocarse trastornos en la tasa de crecimiento que favorecería la aparición de frutos deformes que pueden afectar el rendimiento y la calidad de la cosecha.

**Desarrollo del Cultivo**

El crecimiento de la planta en altura fue reducido y prácticamente sin diferencia entre tratamientos durante los primeros 42 DDT (Figura 4). En el periodo de 42 a 70 DDT, el crecimiento se comportó de forma lineal; las plantas con mayor disponibilidad de humedad siempre conservaron mayor altura que el resto de las plantas manejadas a menores tensiones de humedad. En los últimos 25 días hasta la cosecha, la altura de las plantas casi se duplicó; este cambio en la tasa de crecimiento ocurrió aproximadamente a 70 días, cuando el follaje de algunos tratamientos alcanzó a cubrir totalmente el suelo y las hojas comenzaron a intercalarse entre ellas, estableciéndose una competencia por luz, lo cual provocó mayor crecimiento en altura.

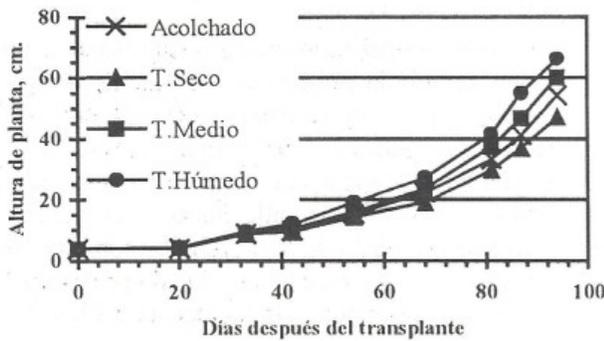


Figura 4. Altura de crecimiento de brócoli.

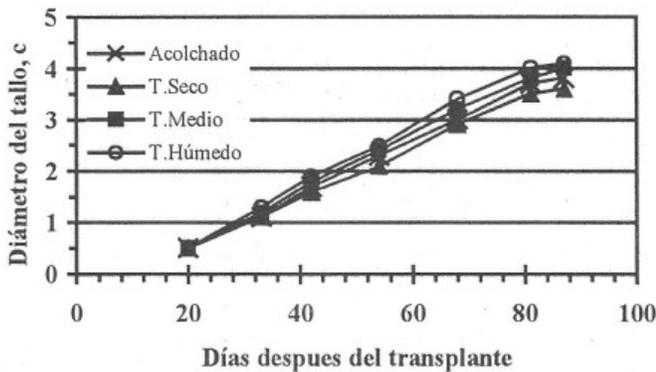


Figura 5. Crecimiento del tallo de brócoli.

El diámetro del tallo tuvo similar tendencia de desarrollo en todos los tratamientos durante todo el ciclo del cultivo (Figura 5). En el periodo de 33 a 81 DDT, el crecimiento fue constante de aproximadamente 0.5 mm d<sup>-1</sup> en todos los tratamientos. Cuando faltaban ocho días para la cosecha, la tasa de desarrollo del tallo se redujo a 0.25 mm d<sup>-1</sup>. El desarrollo del tallo indica que el intervalo de humedad a que se manejó el riego no fue suficiente para propiciar cambios en el desarrollo de este órgano.

La cobertura foliar mostró una tendencia sigmoïdal a través del tiempo para todos los tratamientos (Figura 6). Comenzó a variar después de 42 DDT, siendo mayor cuando hubo mayor disponibilidad de humedad. Se alcanzó una diferencia máxima de 30% entre los tratamientos húmedo y seco a 68 DDT, cuando los tratamientos medio y húmedo habían cubierto casi la totalidad del suelo. Esta diferencia se redujo de forma gradual después de 68 DDT y hasta el final del ciclo, sin embargo, los tratamientos seco y con acolchado no lograron la cobertura total del suelo ni en el momento de la cosecha.

La acumulación de biomasa (Figura 7) resultó baja durante los primeros 20 DDT y prácticamente puede considerarse como el periodo de adaptación de la planta procedente del vivero a las condiciones del suelo, incluso, algunas veces, la planta llega a perder peso debido a la pérdida de los cotiledones. También, se ha observado que algunas plantas llegan a perder casi la totalidad de las raíces adventicias desarrolladas en el semillero y generan nuevas raíces adventicias en el suelo. En los siguientes 27 días (20 a 47 DDT), la acumulación de biomasa mostró un notorio ascenso, pero no hubo diferencia entre los tratamientos, lo cual está relacionado con el retraso del establecimiento de

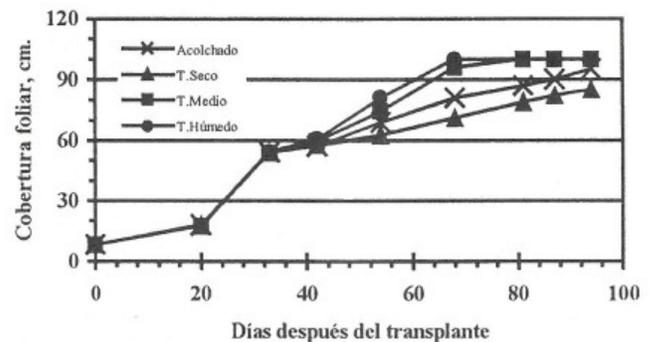


Figura 6. Crecimiento foliar de brócoli.

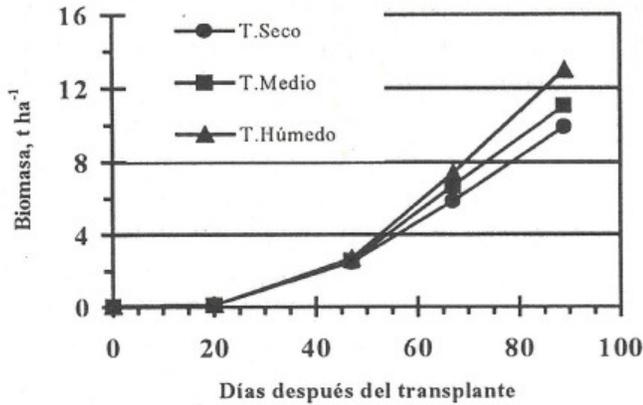


Figura 7. Acumulación de biomasa de brócoli.

los tratamientos que, a su vez, depende de la alta capacidad del suelo para almacenar humedad.

Después de 47 DDT, la acumulación promedio de biomasa presentó un notorio ascenso de 90 a más de 200 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. Después de esta fecha hasta el final del ciclo, se acumula más de 80% de la biomasa total en todos los tratamientos; dentro de este periodo aparece y se desarrolla completamente el florete. Por lo tanto, es fundamental tener precaución en el manejo de los programas de fertilización y riego en este periodo. Al final del ciclo, fue notoria la respuesta del cultivo a las tensiones de humedad, a menor tensión de humedad hubo mayor ganancia de biomasa; pero, en el caso del rendimiento, no se consiguió la misma tendencia, dado que el mejor rendimiento se alcanzó en el tratamiento semihúmedo. Entonces, no necesariamente mayor producción de biomasa y crecimiento vegetativo garantizan mayor rendimiento del florete en el cultivo del brócoli.

### Rendimiento, Calidad y Eficiencia de Uso del Agua

Las plantas que crecieron en el tratamiento de acolchado, semihúmedo y húmedo produjeron el mayor número de tallos laterales por planta, después los tratamientos medio y semiseco y, por último, el tratamiento seco (Cuadro 1). Los tratamientos seco, semiseco y medio no fueron estadísticamente diferentes entre ellos, pero sí fueron diferentes de los tratamientos de acolchado y húmedo. El tratamiento semihúmedo tuvo un valor intermedio y fue similar a todos los tratamientos.

El tratamiento húmedo produjo la mayor cantidad de tallos laterales, lo cual no correspondió al número de floretes cosechados. Aunque no fue significativo, el tratamiento semihúmedo tuvo mayor número de floretes cosechados que el tratamiento húmedo. Cutcliffe *et al.* (1968) mencionaron que los tallos laterales pueden llegar a producir hasta 50% del rendimiento total de florete cuando se llevan hasta la cosecha, situación indeseable en una agricultura intensiva. El diámetro del florete fue similar en todos los tratamientos, pero es importante mencionar que los valores expuestos son obtenidos de todos los floretes cosechados, incluyendo los floretes principales y laterales (Cuadro 1).

El fenómeno del tallo hueco puede llegar a ser un problema cuando la producción se destina al mercado en fresco, porque en la zona hueca del tallo ocurre oxidación y adquiere un color pardo que no es agradable a la vista. El tratamiento seco produjo sólo 5% de floretes con tallo hueco y el tratamiento húmedo produjo hasta 40% de floretes con tallo hueco (Cuadro 1). Esto indica que la disponibilidad de humedad está asociada a la incidencia del fenómeno

Cuadro 1. Algunos parámetros de fenología y de calidad de la cosecha del brócoli.

Tratamiento	Tallos axilares por planta	Floretes cosechados ha <sup>-1</sup>	Diámetro promedio <sup>†</sup>	Tallo hueco	Deformes
			cm	----- % -----	
Acolchado (28 kPa)	2.87 c	70 000 a	15.40	29 ab	12
Seco (45 kPa)	2.00 a	67 500 a	14.60	5 a	8
Semiseco (36 kPa)	2.12 ab	67 500 a	15.30	22 ab	10
Medio (28 kPa)	2.13 ab	75 000 ab	16.60	23 ab	14
Semihúmedo (20 kPa)	2.75 bc	90 000 b	15.40	39 b	17
Húmedo (12 kPa)	3.05 c	85 000 ab	15.40	40 b	16
DMS (0.05)*	0.65	17 987	NS	29.08	NS

\* Prueba de Tukey, diferencia mínima significativa a 5% de significancia. <sup>†</sup> Incluye floretes principales y laterales o axilares.

de tallo hueco, mayor disponibilidad de agua eleva la velocidad de desarrollo del tallo al final del ciclo, lo que propicia mayor incidencia de este fenómeno. Afortunadamente, este problema no es tan importante en los casos de florete para proceso. En otros trabajos se ha encontrado que el tallo hueco también está asociado a la sensibilidad varietal, a la fertilización con nitrógeno y a la deficiencia del micronutriente boro (Hipp, 1974; Shelp *et al.*, 1992), incluso, se ha encontrado relación con las densidades de población (Cutcliffe, 1972). En el cultivo de coliflor, planta de la misma familia, se ha encontrado que aplicaciones elevadas de boro y magnesio pueden reducir significativamente la incidencia del tallo hueco, pero no se mejora el rendimiento (Batal *et al.*, 1997).

El desarrollo de floretes deformes varió de 8 hasta 16% en los tratamientos seco y húmedo, respectivamente, pero estadísticamente estos valores no son diferentes (Cuadro 1). Este fenómeno está más asociado a las temperaturas superiores a 30 °C que provocan alteraciones en el desarrollo de los pedúnculos (Fujime y Okuda, 1996).

El rendimiento para proceso no fue estadísticamente diferente entre los tratamientos medio, semihúmedo y húmedo con 29.0, 31.7 y 30.4 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Pero, estos tratamientos sí fueron diferentes de los tratamientos seco y el acolchado que alcanzaron rendimientos de 20.8 y 22.3 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Cuadro 2). Aunque no fue significativo, el tratamiento húmedo sufrió un descenso en el rendimiento de florete para proceso de 1.3 t ha<sup>-1</sup> con respecto al tratamiento semihúmedo. Los resultados indican que se obtiene el mismo rendimiento con el riego a 28, 20 y 12 kPa de tensión de humedad en el suelo. Estos resultados tienen similitud con lo reportado por Letey *et al.* (1983) que

la tensión de 20 kPa es la óptima para el riego en el brócoli, pero difieren con los resultados de Doerge y Thompson (1997) quienes alcanzaron el rendimiento de 11.5 t ha<sup>-1</sup> con 17 cm de lámina de riego a 10 kPa de tensión.

El tratamiento de acolchado se pretendió manejar a la misma tensión que el tratamiento medio, pero tuvo un descenso en el rendimiento de 6.7 t ha<sup>-1</sup> con respecto a ese tratamiento; por lo que, el intervalo de tensiones a que se sometió el brócoli con acolchado no respondió positivamente y faltan elementos, como la temperatura del suelo, para explicar la reducción del rendimiento.

La mayor eficiencia de uso del agua se consiguió con el acolchado, seguido del tratamiento semiseco (Cuadro 2). La más baja eficiencia se obtuvo con el tratamiento húmedo. Los valores de eficiencia de uso del agua fueron altos comparados con los que reportaron Doerge y Thompson (1997) y Beverly *et al.* (1986).

## CONCLUSIONES

- El aplicación del riego a 12, 20 y 28 kPa de tensión media de humedad en el estrato de 0 a 30 cm del suelo produce rendimientos similares, por lo tanto, es recomendable usar el riego a 28 kPa de tensión media. Además, existe el ahorro de 8 cm de lámina de agua entre el riego a 28 kPa con respecto a 12 kPa.
- Con el riego a tensiones medias superiores a 36 kPa se consigue la reducción de la incidencia del fenómeno del tallo hueco, pero también se reduce el rendimiento hasta más de 20% con respecto al tratamiento semihúmedo que produjo mayor rendimiento.

Cuadro 2. Rendimiento del brócoli y eficiencia de uso del agua.

Tratamiento	Rendimiento			Eficiencia de uso de agua kg. florete comercial m <sup>-3</sup>
	Proceso <sup>†</sup>	Desecho <sup>‡</sup> t ha <sup>-1</sup>	Total	
Acolchado (28 kPa) <sup>†</sup>	22.3 ab	12.0	34.3 ab	9.1 d
Seco (45 kPa)	20.8 a	7.7	28.5 a	7.6 b
Semiseco (36 kPa)	25.7 bc	9.7	35.4 bc	8.3 c
Medio (28 kPa)	29.0 cd	11.3	40.3 bcd	8.1 c
Semihúmedo (20 kPa)	31.7 d	11.5	43.0 d	7.9 bc
Húmedo (12 kPa)	30.4 d	10.6	41.0 cd	6.6 a
DMS (0.05)**	3.59	NS	6.56	0.41

<sup>†</sup> El valor encerrado en paréntesis corresponde a la media de las tensiones de humedad de 15 y 30 cm de profundidad en el suelo. <sup>‡</sup> El rendimiento para proceso incluye el Grado 1 y 2, que se refiere en materiales y métodos. <sup>§</sup> El desecho es el desperdicio que se hace referencia en materiales y métodos.

\*\* Prueba de Tukey, diferencia mínima significativa a 5% de significancia.

- Las tensiones medias del suelo de 12 a 45 kPa probadas en este experimento no propiciaron el desarrollo de floretes deformes.
- La mayor eficiencia de uso del agua se consigue con el uso del acolchado, seguido del tratamiento semiseco, medio, semihúmedo, seco y húmedo.
- El vigoroso crecimiento vegetativo y la aparición de un mayor número de tallos secundarios promovido por la alta disponibilidad de agua en el tratamiento húmedo no favorecen el desarrollo del florete y el rendimiento decae en comparación con el tratamiento semihúmedo.

### LITERATURA CITADA

- Batal, K.M., D.M. Granberry y B.G. Mullinix Jr. 1997. Nitrogen, magnesium, and boron applications affect cauliflower yield, curd mass, and hollow stem disorder. *HortScience* 32: 75-78.
- Beverly, R.B., W.M. Jarrell y J. Letey Jr. 1986. A nitrogen and water response surface for sprinkler-irrigated broccoli. *Agron. J.* 78: 91-94.
- Bujanos-Muñiz, R. y A. Marín-Jaramillo. 1996. Plagas de los cultivos de crucíferas en el Bajío, México. Publicación Especial 2. Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Celaya. Guanajuato, México.
- Castellanos, J.Z., S. Villalobos, J.A. Delgado, A. Sosa, P. Vargas, I. Lazcano, M.E. Álvarez y S.A. Enríquez. 2001. Use of best management practices to increase nitrogen use efficiency and protect environmental quality in Central Mexico. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 1265-1292.
- Cutcliffe, J.A. 1972. Effects of plant spacing and nitrogen on incidence of hollow stem in broccoli. *Can. J. Plant Sci.* 52: 833-834.
- Cutcliffe, J.A., D.C. Munro y D.C. MacKay. 1968. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, and manure on terminal, lateral, and total yields and maturity of broccoli. *Can. J. Plant Sci.* 48: 439-446.
- Fujime, Y. y N. Okuda. 1996. The physiology of flowering in Brassicas, especially about cauliflower and broccoli. *Acta Hort. (ISHS)* 407: 247-254.
- García, E. 1980. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Hipp, B.W. 1974. Influence of nitrogen and maturity rate on hollow stem of broccoli. *HortScience* 9: 68-69.
- Letey, J., W.M. Jarrell, N. Valoras y R. Beverly. 1983. Fertilizer application and irrigation management of broccoli production and fertilizer use efficiency. *Agron. J.* 75: 502-507.
- Maurer, A.R. 1976. Response of broccoli to five soil water regimes. *Can. J. Plant Sci.* 56: 953-959.
- Nieuwhof, M. 1969. Cole crops: botany, cultivation, and utilization. Institute of Horticultural Plant Breeding. Wageningen, The Netherlands.
- SAS Institute Inc. 1985. User's guide: basics. Version 5. Cary, NC.
- Shelp, B.J., R. Penner y Z. Zhu. 1992. Broccoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) cultivar response to boron deficiency. *Can. J. Plant Sci.* 72: 883-888.
- Van der Gulik, T.W. 1999. British Columbia Trickle Irrigation Manual. British Columbia Ministry of Agriculture and Food. Irrigation Association of British Columbia. Abbotsford, British Columbia. Canada.

# COEFICIENTES DE DESARROLLO DEL CULTIVO DE BRÓCOLI CON RIEGO POR GOTEO

## Crop Coefficient in Broccoli under Drip Irrigation

Salvador Villalobos-Reyes<sup>1</sup>, Javier Z. Castellanos-Ramos<sup>1†</sup>, Leonardo Tijerina-Chávez<sup>2</sup> y Guillermo Crespo-Pichardo<sup>2</sup>

### RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue determinar los coeficientes de desarrollo del cultivo de brócoli en condiciones de riego por goteo para la región central de México. El estudio se realizó en un Vertisol. El 8 de enero de 2000 se trasplantó brócoli cultivar Patriot a doble hilera en surcos separados a 1 m, con una distancia entre hileras de 25 cm y de 30 cm entre plantas. Se tuvieron seis tratamientos de tensión de humedad del suelo en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones: 1) Acolchado plástico a 28 kPa, 2) Seco a 45 kPa, 3) Semiseco a 36 kPa, 4) Medio a 28 kPa, 5) Semihúmedo a 20 kPa y 6) Húmedo a 12 kPa de tensión de humedad del suelo. Los coeficientes de desarrollo del cultivo asociados al máximo rendimiento fueron de 0.25, 0.38, 0.68, 0.84, y 0.77 para 20, 45, 60, 88 y 98 días después del trasplante, respectivamente.

*Palabras clave:* tensión de humedad del suelo, evapotranspiración.

### SUMMARY

The goal of this study was to determine the crop coefficient of broccoli under drip irrigation conditions for the central region of Mexico. This study was carried out in the Bajío Experimental Station, in Celaya, Guanajuato, on a Vertisol. A Patriot broccoli cultivar was transplanted on January 8, 2000, in double rows, 1 m apart. Distance between plant lines was 25 cm, and 30 cm were left between plants. There were six treatments in a randomized block design with

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 112, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

<sup>†</sup> Autor responsable (casteja100@hotmail.com)

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

Recibido: Junio de 2002. Aceptado: Octubre de 2004.  
Publicado como nota de investigación en  
*Terra Latinoamericana* 23: 329-333.

four replicates: 1) plastic mulch at 28 kPa, 2) dry at 45 kPa, 3) semi-dry at 36 kPa, 4) medium at 28 kPa, 5) semi-moist at 20 kPa, and, 6) moist at 12 kPa water tension in the soil. Crop coefficients associated to the highest yield were 0.25, 0.38, 0.68, 0.84, and 0.77 for 20, 45, 60, 88, and 98 days after transplant, respectively.

*Index words:* soil water tension, evapotranspiration.

### INTRODUCCIÓN

Los trabajos realizados en otros países para definir la demanda de agua del brócoli reportan porcentajes de evaporación (Beverly *et al.*, 1986; Sánchez *et al.*, 1996), tensiones de humedad (Maurer, 1976; Letey *et al.*, 1983) y el uso de los coeficientes de desarrollo del cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1990; Grattan *et al.*, 1998). Sin embargo, estos estudios se han realizado en ambientes totalmente diferentes a las condiciones de Guanajuato y con varios genotipos. Las metodologías, ampliamente aceptadas para estimar el requerimiento de agua de los cultivos, se han conciliado en dos conceptos muy conocidos, el término coeficiente de desarrollo del cultivo (Kc) y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), siendo la evapotranspiración del cultivo (ET) el producto de ambas:  $ET = Kc \cdot ET_o$ .

Los coeficientes de desarrollo del cultivo (Kc) definen la influencia del cultivo sobre la evapotranspiración. Los valores de Kc sólo se obtienen a través de la experimentación (Hanson *et al.*, 1997; Van der Gulik, 1999), ya que el crecimiento de la planta está influenciado por las condiciones cambiantes del clima, por las condiciones físicas y químicas en el suelo, por el manejo agronómico, por el sistema de riego y por la capacidad genética del cultivo.

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) puede estimarse mediante diversos métodos. Éstos pueden ser directos o a través de fórmulas matemáticas (Doorenbos y Pruitt, 1990). La precisión de los métodos depende de la calibración previa, aunque se reconoce ampliamente la bondad de los modelos

costosos por el requerimiento de equipo, de información y por el manejo de la misma (Allen, 1986; Tijerina-Chávez, 1992). Los Kc reportados para el cultivo del brócoli en California (USA) por Grattan *et al.* (1998), en Italia por Rubino y De Palma (1989) y los valores reportados por Doorenbos y Pruitt (1990) se calcularon con datos de ET<sub>0</sub> obtenidos de diferentes métodos. Esto repercute en diferencias de hasta 50% en los valores de los coeficientes de desarrollo del cultivo, aunado a ello, todos los estudios arriba reportados se realizaron para el sistema de riego por gravedad y prácticamente no hay reportes para sistemas de riego por goteo (Figura 1).

El objetivo del presente estudio fue determinar los coeficientes de desarrollo del cultivo de brócoli para la región central de México con el fin de aportar elementos para el cálculo de la evapotranspiración en condiciones de riego por goteo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en Celaya, Guanajuato, México, (20° 32' N; 100° 49' O) en un suelo *Isothermal dic pelluster* con 42, 34 y 24% de arcilla, limo y arena en el estrato de 0 a 30 cm. El clima es de tipo BS<sub>1</sub> hw (w) (e), seco con lluvias en verano (García, 1980). El 8 de enero de 2000, se trasplantó brócoli cultivar Patriot con dos hojas bien

diferenciadas en surcos de 1 m de separación, sobre cada surco se colocaron dos hileras de plantas separadas a 25 cm, y las plantas separadas a 30 cm. El control de los riegos se realizó a través de tensiómetros, localizados a 15, 30 y 45 cm de profundidad en el suelo, situados entre dos plantas, entre dos goteros y a 15 cm de la cintilla. Se manejaron cinco tensiones de humedad en el suelo para propiciar diferentes consumos de agua del cultivo y un acolchado plástico para cuantificar el ahorro de agua a través de esta práctica; por lo que los tratamientos estudiados fueron: 1) Acolchado plástico a 28 kPa, 2) Seco a 45 kPa, 3) Semiseco a 36 kPa, 4) Medio a 28 kPa, 5) Semihúmedo a 20 kPa, 6) Húmedo a 12 kPa de tensión de humedad en el suelo, en un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental consistió de una parcela de 4 x 12 m. Sobre cada surco se tendió una cinta de goteo con separación de goteros de 30 cm y con gasto de 1 L h<sup>-1</sup> por gotero. En el acolchado se usó plástico bicolor, blanco arriba y negro abajo, calibre 125 galgas de 80 cm de ancho. Los riegos se aplicaron cuando la media aritmética de las tensiones a 15 y 30 cm de profundidad alcanzaron el límite de tensión que se propuso para cada tratamiento. El tensiómetro localizado a 45 cm se usó para tener referencia sobre el movimiento del agua a mayores profundidades, y fue útil para precisar las láminas de riego y prevenir

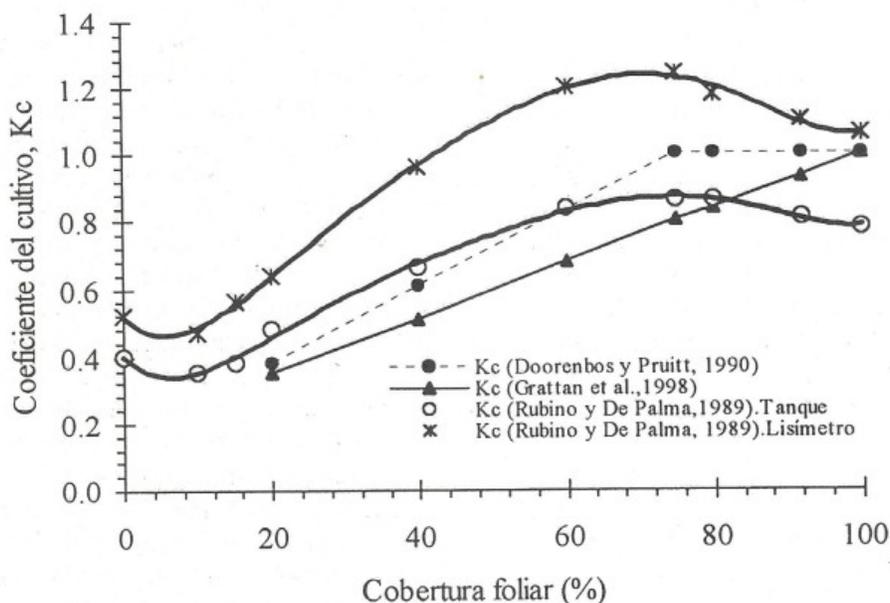


Figura 1. Coeficientes de desarrollo del cultivo (Kc) de brócoli propuestos por Rubino y De Palma (1989), Doorenbos y Pruitt (1990) y Grattan *et al.* (1998).

el drenaje por riego excesivo. Las láminas de riego a reponer en cada riego se calcularon con base en una curva que relaciona la tensión con el contenido volumétrico de humedad en el suelo, el procedimiento consistió en calcular el volumen de agua a reponer hasta regresar a un contenido de agua de  $0.44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  en un bulbo de mojado de 40 cm de ancho y largo, y 30 cm de profundidad. Cuando la lectura del tensiómetro marcaba el límite que se propuso para cada tratamiento, ya se tenía calculado el volumen de agua a reponer en cada caso.

Durante todo el ciclo, se cuantificó el volumen de riego a través de un medidor volumétrico instalado en el cabezal de riego, simultáneamente se le corroboró a través de la lectura de los manómetros en el cabezal y con base en la duración del riego. Cada semana se respaldaron los datos de clima registrados cada 15 min en una estación agrometeorológica marca Davis. La fertilización se realizó cada semana a través del agua de riego siguiendo las recomendaciones propuestas por Castellanos *et al.* (2001) para el brócoli en esta región de México. El control de plagas se realizó mediante el uso de agroquímicos según el programa elaborado por Bujanos-Muñiz y Marín (1996). La cosecha comenzó a 88 días después del transplante (DDT), cuando la superficie del florete tenía granos cerrados de tamaño y color uniforme. El rendimiento se evaluó en una superficie de  $4 \text{ m}^2$  en las cuatro repeticiones de los seis tratamientos. Los coeficientes de desarrollo del cultivo (Kc) se calcularon con base en la Ecuación 1.

$$Kc = ET_o / ETc \quad (1)$$

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se obtuvo a través del modelo de Penman-Monteith (Allen, 1986) y el cultivo de referencia fue el pasto. La evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) fue la lámina de riego aplicada a cada tratamiento.

Durante todo el ciclo del cultivo se apreció la relación entre la radiación y la evaporación (Figura 2), incluso, durante el período complementario del año, la relación entre ambas variables es estrecha, por lo que el modelo de Penman-Monteith puede ser confiable para estimar la evapotranspiración de referencia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los coeficientes de desarrollo del cultivo de brócoli a 10 días después del transplante (DDT) fueron de 0.17 en los tratamientos seco, semisecho,

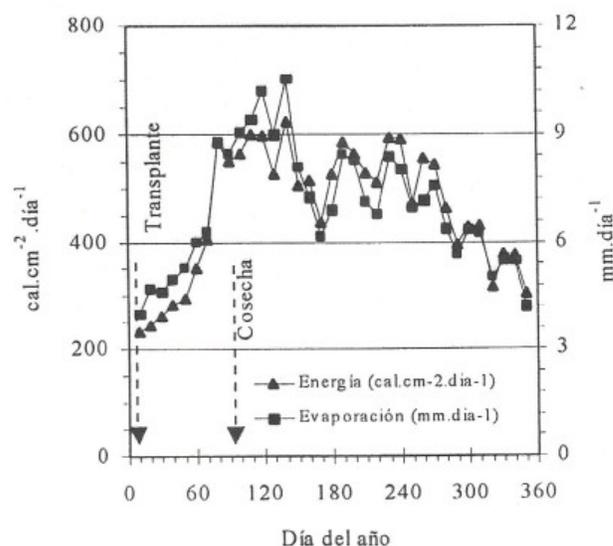


Figura 2. Radiación y evaporación durante el año 2000.

medio y el acolchado, y de 0.24 en los tratamientos semihúmedo y húmedo. En los tratamientos seco, semisecho, medio y el acolchado, los coeficientes de desarrollo del cultivo ascienden a 0.20 después de 20 DDT, mientras que, en los tratamientos semihúmedo y húmedo, los valores fueron de 0.25 y 0.28, respectivamente (Figura 3). En el período de 30 a 50 DDT existe un incremento gradual en los valores de los coeficientes de desarrollo del cultivo. En este período se desarrolla más de 60% del follaje en el tratamiento seco y 70% en el tratamiento húmedo; esta diferencia en el desarrollo foliar también se aprecia en los valores del coeficiente de desarrollo del cultivo que varían de 0.30 a 0.48 en los tratamientos seco y húmedo, respectivamente.

Después de 50 DDT, los valores del coeficiente de desarrollo del cultivo se incrementan notoriamente, esto indica el incremento de la tasa de consumo de agua en los tratamientos. Los valores del coeficiente de desarrollo del cultivo siempre permanecen en ascenso hasta el momento de la cosecha, la declinación que se aprecia en los últimos 10 días del ciclo se debe a la reducción del consumo de agua del cultivo cuando se elimina el florete durante la cosecha.

En Italia, Rubino y De Palma (1989) calcularon los coeficientes de desarrollo del cultivo a partir de la evaporación del tanque tipo "A" y del lisímetro de pesada. Estos autores encontraron que existe diferencia entre ambos métodos, por lo que no es posible comparar los valores de los coeficientes de

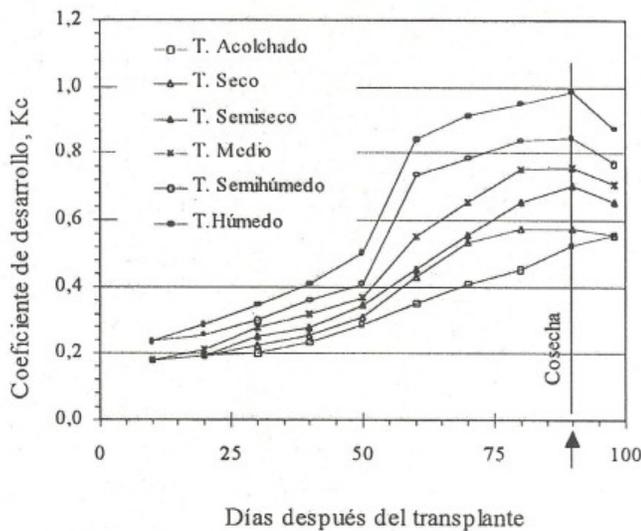


Figura 3. Coeficientes de desarrollo del cultivo de brócoli cv. Patriot plantado en Invierno del 2000.

desarrollo del cultivo cuando la evapotranspiración de referencia se calcula con métodos diferentes; pero sí es posible comparar la tendencia que muestran en el transcurso del ciclo. Según los datos de Rubino y De Palma (1989), a 60 DDT, cuando el cultivo alcanza 70% de cobertura, los valores del coeficiente de desarrollo del cultivo comienzan a decrecer (Figura 1). Esta tendencia indica la reducción del consumo de agua del cultivo, lo cual difiere con los resultados del presente trabajo que a 60 DDT sigue en ascenso. La tendencia de los coeficientes de desarrollo, mostrada por Rubino y De Palma (1989), está influenciada por el descenso de la radiación y la temperatura que ocurren durante el ciclo del cultivo que inicia en agosto con 25 °C y termina en noviembre con 18 °C.

Los coeficientes de desarrollo del cultivo obtenidos en el tratamiento húmedo en los primeros 40 DDT tienen similitud con los valores que reportaron Grattan *et al.* (1998) en California. En el período de 40 a 60 DDT, los valores que reportaron Grattan *et al.* (1998) tienen una tendencia lineal, mientras que los valores calculados en el tratamiento húmedo de este estudio muestran un comportamiento sigmoidal. La tendencia lineal que experimentan los coeficientes de desarrollo del brócoli en California, está influenciado por el régimen constante de radiación y temperatura que se presenta en el período de junio a septiembre cuando se desarrolló el experimento. En este estudio, precisamente a 50 DDT ocurre el incremento de la temperatura media de

15 a 17 °C y la radiación permanece en ascenso (Figura 2), lo cual tiene efecto sobre el comportamiento de los coeficientes de desarrollo del cultivo durante el ciclo agrícola.

Los datos de Doorenbos y Pruitt (1990) tienen un comportamiento lineal desde el inicio del ciclo hasta cuando el cultivo cubre 78% de sombreado en el suelo. Los valores son más altos que los reportados por Grattan *et al.* (1998). En el período de 30 a 60 DDT, los valores de Doorenbos y Pruitt (1990) llegaron a ser hasta 50% mayores que los valores obtenidos en el tratamiento húmedo del presente estudio.

En el tratamiento de acolchado, se apreciaron los valores de Kc más bajos que en el resto de los tratamientos (Figura 3), esto se debe a que la evaporación se reduce prácticamente a cero y casi la totalidad del agua consumida se destina al proceso de transpiración del cultivo.

## CONCLUSIONES

En los primeros 20 días después del trasplante (DDT), el coeficiente de desarrollo del cultivo asociado al máximo rendimiento y basado en el modelo de Penman-Montheith se ubica en 0.25. En pleno desarrollo vegetativo a mediados de ciclo (45 DDT), el Kc se ubicó en 0.38. A 60 DDT, el Kc resultante es de 0.68. En el momento de la cosecha, a 88 DDT, el coeficiente de desarrollo del cultivo asciende a 0.84 y al final de la cosecha éste se reduce a 0.77.

## LITERATURA CITADA

- Allen, R.G. 1986. A Penman for all seasons. *J. Irrig. and Drain. Eng.*, Amer. Soc. Civil Eng. 112(4): 348-368.
- Beverly, R.B., W.M. Jarrell y J. Letey Jr. 1986. A nitrogen and water response surface for sprinkler-irrigated broccoli. *Agron. J.* 78: 91-94.
- Bujanos-Muñiz, R. y A. Marín-Jaramillo. 1996. Plagas de los cultivos de crucíferas en el Bajío, México. Publicación Especial 2. 2ª ed. Campo Experimental Bajío. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Celaya, Guanajuato, México.
- Castellanos, J.Z., S. Villalobos, J.A. Delgado, J.J. Muñoz-Ramos, A. Sosa, P. Vargas, I. Lazcano, M.E. Álvarez y S.A. Enriquez. 2001. Use of best management practices to increase nitrogen use efficiency and protect environmental quality in Central Mexico. *Comm. Soil Plant Anal.* 32(7-8): 1265-1292.
- Doorenbos, J. y W.O. Pruitt. 1990. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO de Riego y Drenaje 24. Roma, Italia.
- FAO-UNESCO (Food and Agriculture Organization). 1974. Soil Map of the World. Volume 1, Legend. Paris, France.

- García, E. 1980. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 2a edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F..
- Grattan, S.R., W. Bowers, A. Dong, R.L. Snyder, J.J. Carroll y W. George. 1998. New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops. *California Agric.* 52: 16-21.
- Hanson, B., L. Schwankl, S. Grattan y T. Prichard. 1997. Drip irrigation for row crops. Publication 3376. Division of Agriculture and Natural Resources, University of California. Davis, CA.
- Letey, J., W.M. Jarrell, N. Valoras y R. Beverly. 1983. Fertilizer application and irrigation management of broccoli production and fertilizer use efficiency. *Agron. J.* 75: 502-507.
- Maurer, A.R. 1976. Response of broccoli to five soil water regimes. *Can. J. Plant Sci.* 56: 953-959.
- Rubino, P. y E. De Palma. 1989. Determinazione dei fabbisogni idrici del cavolo broccolo (*Brassica oleracea* L. var. italica Pleck) con lisimetro a pesata. *Rivista Irrigazione e drenaggio* 36(4): IV/5-IV/8.
- Sánchez, C.A., R.L. Roth, B.R. Gardner y H. Ayer. 1996. Economic responses of broccoli and cauliflower to water and nitrogen in the desert. *HortScience* 31: 201-205.
- SAS Institute Inc. 1985. SAS/Stat guide for personal computers. Version 6. Cary, NC.
- Tijerina-Chávez, L. 1992. Uso eficiente del agua en unidades de riego para el desarrollo rural. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Van der Gulik, T.W. 1999. B.C. Trickle Irrigation Manual. British Columbia Ministry of Agriculture and Food. Irrigation Association of British Columbia. Columbia, Canada.

# PREDICCIÓN DEL TIEMPO DE RIEGO EN VID CV. SUPERIOR CON RIEGO POR GOTEO USANDO UNA ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA AUTOMÁTICA

Prediction of Irrigation Time for Grape Cv. Superior under Drip Irrigation with the Use of an Automatic Agrometeorological Station

Adán Fimbres-Fontes<sup>1†</sup> y Rodrigo Aguilera-Ponce<sup>1</sup>

## RESUMEN

El cultivo más importante en la región de Caborca, Sonora es la vid porque ocupa una extensión de 10 762 ha. El principal problema en la región de Caborca es la escasez de agua; el abatimiento del acuífero en el nivel estático es de 0.82 m año<sup>-1</sup>. En años recientes, el riego por goteo ha sido la forma de regar a los viñedos; en la región se cuenta con 10 estaciones agrometeorológicas automáticas. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue predecir el tiempo de riego en vid cv. Superior con riego por goteo, usando la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), calculada por el método de Penman-Monteith directamente por una estación agrometeorológica automática ADCON. Esta investigación se realizó de 2000 a 2002 en el Campo Experimental Caborca. Los tres tratamientos fueron 100, 125, y 150% de ET<sub>o</sub>; el diseño experimental fue un completamente al azar con cuatro repeticiones. Las variables que se midieron fueron: lámina de agua aplicada, rendimiento, racimos por planta, peso promedio de 10 bayas, longitud de cañas, número de yemas latentes (entrenudos) por caña, y peso de poda. El análisis de los resultados indicó que no es posible el uso de la evapotranspiración de referencia a 100% de la estación agrometeorológica automática para el caso de vid variedad Superior, ya que esto ocasiona decremento en el peso promedio de 10 bayas, en la longitud de cañas y en el rendimiento. La mayor eficiencia en el uso del agua se logró con 125% ET<sub>o</sub>. Sin embargo, para predecir el tiempo de riego, se recomienda considerar 150% ET<sub>o</sub> y utilizar los coeficientes (K<sub>c</sub>) que se aplicaron en este estudio.

*Palabras clave:* evapotranspiración de referencia, viñedo.

## SUMMARY

The most important crop in the region of Caborca, Sonora, Mexico, is grape, occupying an area of 10 762 ha. The main problem in the region of Caborca is water; the average water depletion of the static level of the aquifer is 0.82 m yr<sup>-1</sup>. In recent years, drip irrigation has been used to irrigate the vineyards; in the region there are 10 automatic agrometeorological stations. Therefore, the objective of this research was to predict the irrigation time for cv. Superior grape under drip irrigation, using the Penman-Monteith method, calculated directly by an automatic agrometeorological station ADCON as reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>). This research was done from 2000 to 2002 in the Experimental Station in Caborca. The three treatments were 100, 125, and 150% ET<sub>o</sub>; the experimental design was completely randomized with four replicates. The variables were water depth applied, yield, clusters per plant, average weight of 10 berries, cane length, number of latent buds per cane and pruning weight. The analysis of the results indicated that the use of 100% ET<sub>o</sub> obtained by the automatic agrometeorological station is not possible in the case of cv. Superior grape, because there was a decrease in the average weight of 10 berries, cane length, and yield. The highest water use efficiency was obtained with 125% ET<sub>o</sub>. However, to predict the irrigation time, the use of 150% ET<sub>o</sub> is recommended, as well as the coefficient values (K<sub>c</sub>) applied in this study.

*Index words:* reference evapotranspiration, grapes.

## INTRODUCCIÓN

La región agrícola de Caborca, Sonora, es uno de los lugares de la República Mexicana donde hay un fuerte abatimiento del manto acuífero que, en

<sup>1</sup> Campo Experimental Caborca, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apdo. Postal 125, Caborca, Sonora, México.

<sup>†</sup> Autor responsable (ifimbres@prodigv.net.mx)

promedio, es de  $0.82 \text{ m año}^{-1}$ . Dicho abatimiento acumulado durante 25 años ha sido mayor que 20 m. El exceso de extracción ha provocado sobreexplotación del acuífero, por ello, con el fin de obtener mayor utilidad por cada metro cúbico de agua utilizado, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos inició, desde 1983, un programa de reducción en las extracciones y el cambio de padrón de cultivos hacia la zona (SARH, 1983). La Asociación de Usuarios del Distrito de Riego (ASUDIR) ha continuado con la misma política en cuanto a ahorro de agua e introducción de cultivos más redituables. Con respecto al cultivo de la vid, en la literatura se reportan algunas investigaciones con relación al régimen de humedad del suelo, riego por goteo y calendarización del riego a partir de la información recabada por las estaciones agrometeorológicas automáticas.

Carbonneau y Casteron (1979) concluyeron que el número de inflorescencias disminuye, si la humedad del suelo se mantiene cercana a 100% de la humedad aprovechable. Por otro lado, Lavee (1987) indicó que un alto contenido de humedad en el suelo provoca un mayor desarrollo vegetativo y éste se relaciona con el incremento de giberelinas endógenas que provoca necrosis en las yemas florales.

Fimbres *et al.* (2000) indicaron que la planta de vid es seriamente afectada en la reducción de las yemas florales cuando se le aplica exceso de agua, es decir, láminas de 205 y 235 cm. Cuando esto sucede hay un incremento en el crecimiento de las cañas, lo cual, finalmente, trae como consecuencia reducción en el rendimiento de uva.

Godoy (1985), trabajando con el cv. Carignane, indicó que el potencial matricial del agua en el suelo ( $\psi_m$ ) no debe descender de  $-0.2$  ó  $-0.3$  MPa desde el inicio de brotación al máximo crecimiento del brote y de  $-0.5$  MPa desde el inicio de crecimiento del fruto a la maduración del mismo.

Fimbres y Lagarda (1985) concluyeron que en postcosecha sólo se requiere de la conservación del follaje para que madure la madera y permita acumular reservas para la futura cosecha.

Williams (1991) indicó que, a menor cantidad de agua aplicada en postcosecha, se tiene una temprana brotación en la primavera del próximo año.

Godoy *et al.* (2002), trabajando con el cv. Carignane, concluyeron que aplicar una deficiencia de agua ( $-0.9$  MPa) después de cosecha provoca mayor y temprana brotación.

Ojeda *et al.* (1999) indicaron que los adelantos tecnológicos recientes en sensores y controles han promovido mejores sistemas para monitorear, en forma más precisa y casi continua, el tiempo atmosférico y la evapotranspiración. Esto ha propiciado el resurgimiento de ecuaciones más precisas, como las ecuaciones tipo Penman, para estimar el requerimiento hídrico de los cultivos.

El cultivo de la vid es uno de los más importantes en la región, tanto en superficie (10 762 ha), como en derrama económica; por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue predecir el tiempo de riego en el cultivo de vid cv. Superior con riego por goteo, usando la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), calculada con el método de Penman-Monteith directamente por una estación agrometeorológica automática ADCON.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) calculada por el método de Penman-Monteith se realizó durante 2000, 2001 y 2002 en el Campo Experimental de la región de Caborca (CECAB), Sonora, México ubicado en el km 22 de la carretera Caborca-Desemboque, cuyas coordenadas son  $112^{\circ} 21' 28''$  O y  $30^{\circ} 42' 55''$  N, a una altitud de 200 m. Las temperaturas máximas se presentan de junio a septiembre y, en este período, se pudieron registrar frecuentemente temperaturas mayores que  $40^{\circ}\text{C}$ . La evaporación promedio registrada en la región oscila de 2400 a 2700 mm (INIFAP, 1985). El suelo en el cual se realizó el experimento es de textura migajón arenoso para las profundidades de 30 a 60 y de 60 a 90 cm, la capacidad de campo es de 10.50 y 12%, y el punto de marchitez permanente de 5.36 y 6%, respectivamente. Las plantas de vid cv. Superior no se prepararon para exportación (mercado nacional). Cuando se inició el experimento la edad de las plantas fue de tres años. El trabajo se inició con la formación del bulbo de mojado y la aplicación de 200 L de agua planta<sup>-1</sup>, ya que la mayoría de las raíces de vid, en el caso de la región de Caborca, profundizan de 110 y 150 cm para plantas de nueve y 10 años, respectivamente. Se fertilizó únicamente con  $70 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Se probaron tres tratamientos con cuatro repeticiones: 100, 125 y 150% ET<sub>o</sub> calculada con el método de Penman-Monteith y datos de una estación agrometeorológica automática, marca ADCON. Los coeficientes de desarrollo de

cultivo  $K_c$  que se aplicaron durante el ciclo fenológico de la vid fueron: 0.30 de yemas hinchadas a inicio de brotación, 0.525 de desarrollo del brote a formación del grano, 0.8 de formación de grano a cosecha, 0.525 las siguientes cuatro semanas y 0.30 en postcosecha.

El equipo de riego presurizado usado en el experimento constaba de la fuente de abastecimiento (pila), motor de 25 HP, presión de salida de 200 kPa y en las líneas regantes de 100 kPa. Se utilizaron dos tipos de goteros, rex netafim de  $4 \text{ L h}^{-1}$  para manguera de 12 mm y goteros de inserción netafim de  $2 \text{ y } 4 \text{ L h}^{-1}$  para poder manejar diferente gasto en el control de una sola válvula. La forma de compensar variaciones a lo largo de las laterales fue manteniendo la presión constante y dividiendo la parcela experimental en cuatro secciones con un largo de línea regante de 26 m (Figura 1). El espaciamiento entre goteros fue de 100 cm. Los laterales se localizaron a 4 m de separación y a un lado de la planta. El bulbo de mojado fue de 100 cm de ancho y se usó una barrena tipo Vehimeyer para la toma de muestras en húmedo al inicio de brotación sólo (no se analizó estadísticamente). Los riegos se aplicaron cada tercer día durante el invierno y otoño, en el resto del tiempo

fueron a diario con excepción de fines de semana (no riego) de acuerdo con la evapotranspiración de referencia de la estación el Delirio, ubicada en el Bizani a 10 km del campo experimental; este dato llegaba vía radio a un receptor que se encontraba en el CECAB, éste, a su vez, estaba conectado a una computadora, en la cual se procesaban los datos obtenidos automáticamente. Para determinar el tiempo de riego, se usó la misma ecuación que indicó Mendoza (2003):

$$T = K_c \cdot E_{To} \cdot A \cdot Q^{-1} \cdot 1000$$

Donde:  $K_c$  = el coeficiente de cultivo,  $E_{To}$  (m),  $A$  = área ( $\text{m}^2$ ),  $Q$  = gasto del gotero ( $\text{L h}^{-1}$ ) y  $T$  = tiempo (h). Durante junio se midieron los grados Brix para determinar el momento de cosecha de uva (no se analizó estadísticamente). Las variables que se evaluaron durante el transcurso del experimento fueron: lámina de agua aplicada (L), rendimiento, racimos por planta, peso de 10 bayas, longitud de cañas, número de entrenudos por caña y peso de la poda. Cabe señalar que las 10 bayas que se pesaron se tomaron de la parte media del racimo.

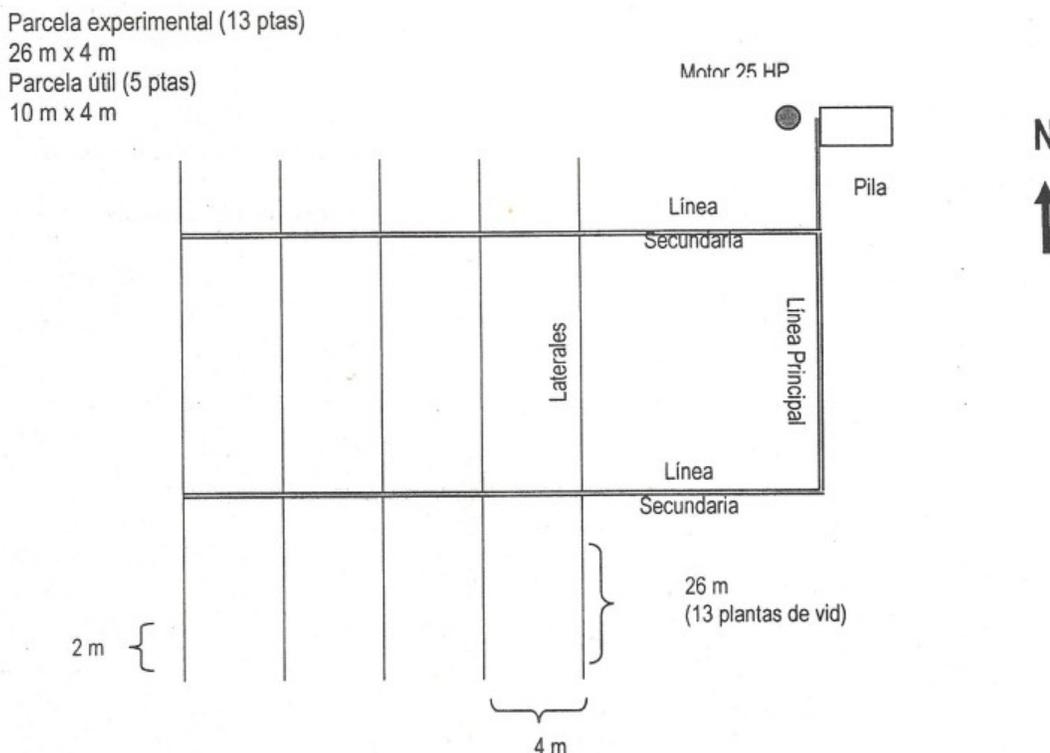


Figura 1. Croquis del lote experimental y componentes del sistema de riego para vid cv. Superior.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1, se muestran las láminas de riego totales para cada uno de los tratamientos obtenidos durante todo el ciclo de la vid cv. Superior.

Cabe señalar que las láminas de agua ( $L = Kc \cdot ETo$ ) fueron datos indirectos al calcular el tiempo de riego para la aplicación de los tratamientos por lo que no se les analizó estadísticamente. Puede observarse que la diferencia en láminas de agua entre el tratamiento de 100% y el de 150% de  $ETo$  va de acuerdo con los tratamientos estudiados.

En 2000 y 2001, no se encontraron diferencias ( $P > .05$ ) para la variable rendimiento. Sin embargo, en 2002, sí se encontró diferencia significativa entre tratamientos, en los cuales 125 y 150% fueron estadísticamente iguales, no así 100%  $ETo$  que fue el de menor rendimiento con  $7.22 \text{ t ha}^{-1}$  (Cuadro 2). En cuanto a eficiencia en el uso del agua y calculada sólo para 2002, sobresale 125%  $ETo$  con  $1.69 \text{ kg m}^{-3}$ .

**Cuadro 1. Riego por goteo y lámina total de agua para vid cv. Superior.**

Tratamiento	Lámina de agua		
	2000	2001	2002
% $ETo$ <sup>†</sup>	cm		
100	61	48	65
125	77	60	82
150	92	72	98

<sup>†</sup>  $ETo$  = evapotranspiración de referencia.

**Cuadro 2. Rendimiento para vid cv. Superior.**

Tratamiento	Rendimiento			Eficiencia 2002
	2000	2001	2002	
% $ETo$ <sup>†</sup>	t ha <sup>-1</sup>			kg m <sup>-3</sup>
100	3.95 a <sup>‡</sup>	7.18 a	7.22 b	1.11
125	5.84 a	12.31 a	13.84 a	1.69
150	4.86 a	11.81 a	13.73 a	1.40

<sup>†</sup>  $ETo$  = evapotranspiración de referencia. <sup>‡</sup> Las medias con igual letra no tienen diferencia. Tukey,  $P > .05$ .

**Cuadro 3. Número de racimos por planta para vid cv. Superior.**

Tratamiento	Racimos por planta		
	2000	2001	2002
% $ETo$			
100	16 a <sup>‡</sup>	19 a	25 b
125	22 a	29 a	39 a
150	16 a	29 a	42 a

<sup>†</sup>  $ETo$  = evapotranspiración de referencia. <sup>‡</sup> Las medias con igual letra no tienen diferencia. Tukey,  $P > .05$ .

En el Cuadro 3, se muestra que no hubo diferencia significativa ( $P > .05$ ) en la variable racimos por planta para 2000 y 2001. Sin embargo, en 2002, sí se encontró diferencia, siendo el tratamiento de 100%  $ETo$  el de menor cantidad de racimos por planta. Los otros dos tratamientos (125 y 150%  $ETo$ ) fueron estadísticamente iguales pero con el mayor número de racimos y, debido a esto, se obtuvo el mayor rendimiento para los mismos, como se mostró en el Cuadro 2.

Con base en el análisis de varianza se encontró diferencia ( $P < .05$ ) en la variable peso de 10 bayas para 2001 y 2002; sólo el tratamiento de 150%  $ETo$  para el año 2001 tuvo mayor peso. En 2002, por tratamiento, 125%  $ETo$  y 150% fueron los de mayor peso pero estadísticamente iguales. El tratamiento de 100%  $ETo$  fue el de menor peso en los tres años, sólo que, en 2000, no hubo diferencia significativa entre tratamientos ( $P > .05$ ) como se observa en el Cuadro 4.

En el Cuadro 5, se muestran los resultados de longitud de cañas y se observa que sólo hubo diferencia significativa ( $P > .05$ ) en 2001 y 2002; el tratamiento de menor longitud fue el de 100%  $ETo$  y los tratamientos de 125 y 150%  $ETo$  fueron los de mayor longitud de cañas y estadísticamente iguales.

Con respecto a la variable entrenudos por caña, en 2000 no se encontraron diferencias ( $P > .05$ ) entre los tratamientos estudiados. Sin embargo, en 2001 y 2002, sí se encontraron diferencias ( $P < .05$ ), cuando

**Cuadro 4. Peso de 10 bayas para vid cv. Superior.**

Tratamiento	Peso de 10 bayas		
	2000	2001	2002
% $ETo$ <sup>†</sup>	g		
100	30.27 a <sup>‡</sup>	37.06 b	23.21 b
125	34.57 a	37.58 b	33.93 a
150	31.92 a	43.67 a	38.23 a

<sup>†</sup>  $ETo$  = evapotranspiración de referencia. <sup>‡</sup> Las medias con igual letra no tienen diferencia. Tukey,  $P > .05$ .

**Cuadro 5. Longitud de cañas para vid cv. Superior.**

Tratamiento	Longitud de cañas		
	2000	2001	2002
% $ETo$ <sup>†</sup>	m		
100	1.27 a <sup>‡</sup>	1.04 b	1.01 b
125	1.45 a	1.69 a	1.60 a
150	1.64 a	1.67 a	1.64 a

<sup>†</sup>  $ETo$  = evapotranspiración de referencia. <sup>‡</sup> Las medias con igual letra no tienen diferencia. Tukey,  $P > .05$ .

los tratamientos de 125 y 150% de ETo fueron los de mayor cantidad de entrenudos (Cuadro 6).

No se encontró diferencia ( $P > .05$ ) entre tratamientos para la variable peso de la poda. Sin embargo, 100% ETo fue el de tendencia a la baja durante los tres años de estudio (Cuadro 7).

**Cuadro 6. Número de entrenudos por caña para vid cv. Superior.**

Tratamiento	Entrenudos por caña		
	2000	2001	2002
% ETo <sup>†</sup>			
100	28 a <sup>†</sup>	23 b	24 b
125	30 a	30 a	31 a
150	30 a	30 a	31 a

<sup>†</sup>ETo = evapotranspiración de referencia. <sup>†</sup>Las medias con igual letra no tienen diferencia. Tukey,  $P > .05$ .

**Cuadro 7. Peso de la poda para vid cv. Superior.**

Tratamiento	Peso de poda		
	2000	2001	2002
% ETo <sup>†</sup>			
100	3.22 a	2.77 a	3.32 a
125	4.16 a	4.19 a	3.66 a
150	4.20 a	3.70 a	3.85 a

<sup>†</sup>ETo = evapotranspiración de referencia.

## CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos, se encontró que no es posible manejar la evapotranspiración de referencia a 100% de la estación agrometeorológica automática para el caso de vid cv. Superior, ya que esto ocasiona decremento en el peso promedio de 10 bayas, longitud de cañas y rendimiento.

- La mayor eficiencia en el uso del agua se logró con 125% ETo. Sin embargo, para predecir el tiempo de riego, se recomienda considerar 150% ETo y utilizar los coeficientes (Kc) que se aplicaron en este estudio.

## AGRADECIMIENTOS

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

## LITERATURA CITADA

- Carbonneau, A. y P. Casteron. 1979. Irrigation depressing effect floral initiation of cabernet sauvignon grapevines in Bordeaux area. *Am. J. Enol. Vitic.* 30: 3-7.
- Fimbres-Fontes, A. y R. Lagarda-Murrieta. 1985. Optimización del sistema de riego por goteo en vid *Vitis vinifera* L., en la región de Caborca. *Agric. Téc. en México* 11: 51-67.
- Fimbres-Fontes, A., G. Martínez-Díaz y M.J. Valenzuela-Ruiz. 2000. Alta y baja humedad con riego por goteo en vid para mesa y su efecto en las yemas florales. *Terra* 18:219-224.
- Godoy-Ávila, C. 1985. Respuesta de la vid *Vitis vinifera* L., a diferentes tensiones de humedad en el suelo en dos etapas de desarrollo. *Agric. Téc. en México* 11: 39-49.
- Godoy-Ávila, C., I. López-Montoya e I. Reyes-Juárez. 2002. Respuesta de la vid a tres tensiones de humedad del suelo en postcosecha. *Terra* 20: 285-290.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 1985. Guía para la asistencia técnica agrícola. Área de influencia del Campo Experimental Región de Caborca. Caborca, Sonora, México.
- Lavee, S. 1987. Necrosis in grapevine buds (*Vitis vinifera* cv. Queen of vineyard). III Endogenous gibberelin levels in leaves and buds. *Vitis* 26: 225-230.
- Mendoza-Robles, J.L. 2003. Manejo de cultivos para grano mediante riego por goteo. Folleto Técnico 18. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Noroeste-Campo Experimental Valle del Fuerte. Los Mochis, Sinaloa, México.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, J.M. González-Camacho, J.A. Guillen-González y H. Unland-Weiss. 1999. Pronóstico del riego en tiempo real. Manual de capacitación técnica. Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1983. Propuesta de reducción de las extracciones del acuífero en un plazo de 7 años, con un intervalo de evaluación. Anexo 2. Distrito de Riego 37, Altar-Pitiquito, Caborca, Sonora, México.
- Williams, E.L. 1991. Postharvest irrigation influences budbreak of Perlette grapevines. *HortScience* 26(8): 1081.

# SUSTRATOS Y FRECUENCIAS DE RIEGO PARA LA PRODUCCIÓN DE JITOMATE EN HILERAS A DIFERENTE ALTURA

Substrates and Irrigation Frequencies for the Production of Tomato in Rows at Different Heights

Quirino Hernández-Santiago<sup>1</sup>, Felipe Sánchez-Del Castillo<sup>1†</sup>, Aureliano Peña-Lomelí<sup>1</sup> y Domingo Montalvo-Hernández<sup>1</sup>

## RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar el efecto de tres sustratos (arena de tezontle rojo, perlita y una mezcla de los dos anteriores 50:50 con base en volumen) en combinación con dos y cuatro riegos diarios con solución nutritiva sobre algunos caracteres morfológicos y sobre el rendimiento por planta y sus componentes primarios en el cultivar Gironda. Se usó un diseño en bloques al azar y un arreglo de tratamientos en parcelas divididas con cuatro repeticiones, donde, en parcelas grandes, se ubicaron los intervalos de riego y, en subparcelas, los sustratos, dando seis tratamientos; la unidad experimental de las subparcelas estuvo formada por 18 plantas arregladas en tres hileras, cada una a distinta altura (40 cm de desnivel entre hileras contiguas). La distancia horizontal entre hileras contiguas de plantas fue de 10 cm y la distancia entre plantas de 16.6 cm. Las plantas se podaron a un tallo y se despuntaron tempranamente para cosechar sólo tres racimos a cada una. Las plantas en arena de tezontle rindieron 42% más que las cultivadas con perlita. La distribución de la solución nutritiva en cuatro riegos al día produjo un rendimiento por planta significativamente mayor que en dos riegos (21% más). Las plantas ubicadas en la hilera superior rindieron significativamente más (54 y 99%), tuvieron más frutos (25 y 30%) y de mayor peso (23 y 78%) que las plantas ubicadas en las hileras intermedia e inferior, respectivamente. El rendimiento de las plantas en arena de tezontle equivale a 34 kg m<sup>-2</sup> en un periodo que de trasplante a cosecha puede ser de sólo tres meses.

**Palabras clave:** *Lycopersicon esculentum* Mill., arreglos de plantación, densidades de población, despunte, hidroponía.

<sup>1</sup> Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Texcoco, México.

<sup>†</sup> Autor responsable (fsanchezdelcastillo@yahoo.com.mx)

Recibido: Febrero de 2004. Aceptado: Febrero de 2005.  
Publicado como nota de investigación en  
*Terra Latinoamericana* 23: 341-349.

## SUMMARY

The present research has the specific objective of evaluating the effect of three substrates (a red volcanic sand locally called "tezontle", perlite, and a mixture of both 50:50 based on volume) in combination with two and four irrigation intervals with a complete nutrient solution on some morphological traits and on plant yield and its primary components with the cultivar Gironda. A random block design with a split plot arrangement of treatments and four replications was used, where the two irrigation intervals were located in the plots and the three substrates in the subplots, giving six treatments; each experimental unit was formed by 18 plants arranged in sets of three rows located at different heights (40 cm difference in height between contiguous rows). The horizontal distance among contiguous rows of plants was 10 cm and the distance between plants was 16.6 cm. The plants were pruned to one stem and tips were cut early in the crop cycle to harvest only three clusters of each one. The plants in tezontle yielded 42% more than those cultivated in perlite. The distribution of the nutrient solution in four irrigations per day produced a significantly higher plant yield than in two irrigations (21% more). The plants located in the higher row yielded significantly more (54 and 99%), had more fruits (25 and 30%) and higher mean fruit weight (23 and 78%) than the plants located in the intermediate and lower rows, respectively. The plant yield in tezontle sand is equivalent to 34 kg m<sup>-2</sup> in a period, from transplant to end of harvest, of only three months.

**Index words:** *Lycopersicon esculentum* Mill., plant arrangement, plant density, stopping, soilless culture.

## INTRODUCCIÓN

El sistema de producción de jitomate en invernadero que normalmente se practica en el Norte de Europa y de América consiste en el uso de variedades de hábito indeterminado. Las plantas son

sembradas en sustratos hidropónicos a densidades de dos a tres plantas por  $m^2$  y se dejan crecer hasta 3 m de altura, para cosechar de 15 a 20 racimos por planta en un ciclo de cultivo de 10 a 11 meses y un periodo de inicio a fin de cosecha de cinco a siete meses. El rendimiento fluctúa de 300 a 400  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ , pero los costos de producción son muy elevados (Picken, 1984; Van de Vooren *et al.*, 1986; Hanan, 1998; Resh, 2001).

El principal problema para productores que usan estos sistemas en México es que lo largo del ciclo y del periodo de inicio a fin de cosecha, aparte de conllevar un alto riesgo de aparición y dispersión de plagas y enfermedades (Jarvis, 1998), en general provoca que una buena parte de la cosecha de frutos de jitomate se venda a precios relativamente bajos, ya que éstos siguen las leyes de la oferta y demanda y son muy oscilantes, tanto en el mercado nacional, como en el de exportación. Sólo se identifican dos meses del año (junio y diciembre) cuando frecuentemente se pagan altos precios (Muñoz *et al.*, 1995).

Como resultado de varios trabajos de investigación y experiencias comerciales, se ha desarrollado y validado comercialmente con productores una nueva tecnología de producción de jitomate en hidroponía que consiste en despuntar (eliminar la yema terminal) tempranamente para dejar dos a tres inflorescencias por planta; además se eliminan, por medio de podas, todos los brotes laterales que emitan antes, durante y después del despunte para dejar un solo tallo y así establecer densidades de población tan altas como ocho a 12 plantas  $m^{-2}$ . De esta manera, el ciclo de cultivo puede acortarse a tres meses después del trasplante, permitiendo hasta cuatro ciclos por año; si bien el rendimiento por ciclo es menor, la productividad anual es mayor ubicándose en el orden de 600  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$  (Cancino-Borraz *et al.*, 1991; Sánchez-Del Castillo y Corona-Saez, 1994; Ponce-Ocampo *et al.*, 2000).

La principal ventaja de este sistema de despunte temprano en altas densidades de población es que se logra concentrar toda la cosecha de un ciclo en un intervalo muy corto de tiempo (menos de un mes, contra más de cuatro meses en los sistemas convencionales), mismo que puede programarse para coincidir con las fechas en que los precios del producto son los más altos del año, y así incrementar la utilidad económica de los productores. El menor rendimiento por planta por ciclo se compensa

parcialmente con la mayor densidad de población (Sánchez-Del Castillo y Ponce-Ocampo, 1988; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 1999). Los costos de producción se reducen al no requerir invernaderos tan altos y resistentes, y, en las condiciones climatológicas favorables de varias zonas de México, pueden ser manejados con un mínimo de equipo para el control ambiental. En síntesis, el sistema en su conjunto se vuelve más rentable económicamente.

Aunque el rendimiento por unidad de superficie con este sistema es alto, se limita por la heterogénea distribución de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en el dosel, ya que las plantas se disponen en tinas largas de aproximadamente 1.2 m de ancho con dirección Norte-Sur y en cada tina se siembran conjuntos de cuatro hileras de plantas, quedando 50% de plantas con competencia completa por RFA (hileras centrales) y 50% con menor competencia (hileras exteriores), ya que son favorecidas por el espacio de los pasillos que se dejan entre tina y tina (Figura 1). A ese respecto, se ha observado en experiencias comerciales y comprobado en trabajos experimentales (Jarvis, 1998) que las plantas alineadas en hileras centrales interceptan menor RFA y rinden menos que las alineadas en las hileras exteriores de dicha tina. Según Charles-Edwards *et al.* (1986) y Gardner *et al.* (1990), si se distribuye más equitativamente la radiación solar entre todas las hojas del dosel, puede lograrse una mayor producción de materia seca por día y, por lo tanto, un mayor rendimiento por unidad de superficie y tiempo.

Méndez-Galicia y Sánchez-Del Castillo (2005), con la idea de mantener la ventaja de concentrar la cosecha en las ventanas donde el precio del producto es mayor, buscaron mejorar la distribución de RFA en dichas hileras centrales mediante un sistema basado en plantas despuntadas a tres racimos en alta densidad de población, pero colocadas en tinas a distintas

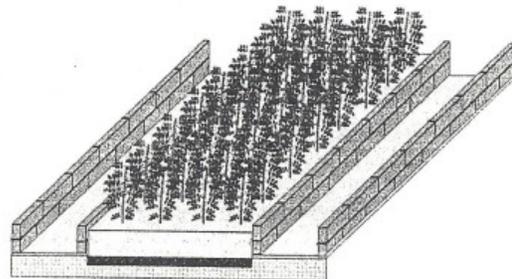


Figura 1. Esquema de una porción de tina mostrando cuatro hileras de plantas despuntadas a tres racimos en alta densidad de población.

alturas, formando cuatro escalones con orientación este-oeste (dosel en forma de escalera). La diferencia de altura entre escalones fue de 30 cm. Utilizaron el cultivar Pick Ripe de hábito determinado, encontrándose que la diferencia en altura entre escalones fue suficiente para evitar el sombreado mutuo entre hileras de plantas, pues las plantas despuntadas a tres racimos no sobrepasaron 50 cm. La orientación este-oeste de las hileras permitió un acercamiento entre planta y planta incrementando la densidad de racimos cosechados por unidad de superficie. El rendimiento por unidad de superficie fue estadísticamente superior al testigo despuntado a tres racimos con las hileras de plantas colocadas a la misma altura en 25% (20 contra 25 kg m<sup>-2</sup>, en un ciclo que puede completarse en tres meses del trasplante al fin de cosecha), lo cual representó un avance importante en el paquete tecnológico mencionado.

Para continuar el desarrollo de este sistema de producción con hileras de plantas colocadas a distinta altura (escalonadas) hacen falta trabajos sobre diferentes aspectos relacionados con la producción hidropónica a fin de poder ofrecer a los productores un paquete tecnológico más acabado. Entre muchos de los aspectos por estudiar cabe mencionar la evaluación de cultivares, soluciones nutritivas, contenedores, diferencia de altura entre contenedores, métodos de riego y sustratos. En estos dos últimos aspectos se centra el presente trabajo.

El riego es uno de los factores de producción que más influyen sobre el resultado del cultivo del tomate, tanto en lo que se refiere a la cantidad de cosecha obtenida, como a su calidad (Rudich y Luchinsky., 1986). La idónea programación de los riegos es crucial para conseguir resultados satisfactorios en el cultivo intensivo de tomate. La programación de riegos implica determinar la frecuencia de los riegos y la cantidad de agua a aplicar en cada uno de ellos (Castilla-Prados, 2004). El riego localizado presenta numerosas ventajas con respecto al sistema de riego tradicional en relación con la utilización de aguas salinas y el ahorro de agua. Sin embargo, en los últimos años se ha demostrado que las mayores posibilidades de este sistema de riego se centran en su utilización como vehículo de una dosificación racional de fertilizantes, es decir, que ofrece la posibilidad de realizar una fertilización día a día, en función del proceso fotosintético y exactamente a la medida de un cultivo, un sustrato y agua de riego determinados para unas condiciones ambientales definidas (Cadahía-López, 2000).

Con un sistema hidropónico se optimizaron las condiciones ambientales en que crece la raíz para que ésta tenga el mejor funcionamiento posible; una forma de lograrlo es mediante el uso de sustratos inertes y estériles, donde el control de la nutrición se logra con la aplicación de soluciones nutritivas balanceadas. La inercia química evita que se retengan o se liberen nutrientes que alterarían esa nutrición y la esterilidad asegura la ausencia de plagas, enfermedades y maleza en la raíz. Otras cualidades deseables de los sustratos son: alta porosidad, buena capilaridad, alta capacidad de retención de agua y, al mismo tiempo, buena aireación, durabilidad, economía y accesibilidad (Sánchez-Del Castillo y Escalante-Rebolledo, 1989; Urrestarazú-Gavilán, 2000; Resh, 2001).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de tres sustratos (arena de tezontle rojo, perlita y una mezcla de ambas) y dos intervalos de riego (dos y cuatro riegos por día) sobre el rendimiento por unidad de superficie y sus componentes en plantas de jitomate despuntadas a tres racimos y manejadas en hileras colocadas a distinta altura con orientación este-oeste formando doseles en forma de escalera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó de mayo a octubre de 2002 en un invernadero cuyas coordenadas son: 19° 29' N y 98° 53' O, a una altitud de 2200 m. Se utilizó el híbrido de jitomate Girona (Enza Zaden), el cual es de crecimiento indeterminado, con crecimiento fuerte y vigoroso y frutos del tipo "bola" con larga vida de anaquel. El invernadero, de estructura metálica con cubierta de polietileno térmico calibre 800 y alta dispersión de luz (más de 50% de la luz incidente en el interior era difusa), estaba orientado en dirección este-oeste. Sus dimensiones eran 23 m de ancho, 11 m de ancho y altura máxima de 4 m. Para lograr una mejor distribución de radiación en el interior, el techo del invernadero era asimétrico con dos vertientes, siendo de 8 m de ancho la orientada al sur y 4 m la orientada al norte (Figura 2), además, el piso se cubrió con malla de polipropileno blanca. El control de temperatura y humedad relativa, registrada con un higrotermómetro digital (Modelo WS44, Royal Consumers Business Products, China) se basaba en la apertura y el cierre de cortinas de polietileno ubicadas en ventanas ubicadas a lo largo de las paredes laterales del invernadero, logrando a lo largo



Figura 2. Vista general del invernadero con vertientes asimétricas donde se desarrolló el experimento.

del experimento mantener una temperatura del día entre 20 y 30 °C con máximas eventuales de hasta 35 °C, mientras que la humedad relativa fluctuaba entre 40 y 80%. Las temperaturas mínimas nocturnas disminuyeron a lo largo del ciclo desde 15 °C en junio hasta 8 °C en octubre. Además de las cortinas plásticas, las ventanas contaban con malla anti-áfidos como coadyuvantes en el control de plagas y enfermedades transmitidas por ellas.

Se utilizó un diseño experimental en bloques al azar con cuatro repeticiones. Se compararon seis tratamientos con dos factores (intervalos de riego y sustratos) arreglados en parcelas divididas. El factor intervalos de riego fue asignado al azar para cada parcela grande y el factor sustratos fue asignado al azar en las subparcelas. Cada unidad experimental en subparcela tenía 1 m de largo y 30 cm de ancho (0.3 m<sup>2</sup> de superficie útil), comprendiendo 18 plantas. Los intervalos de riego con solución nutritiva fueron dos y cuatro riegos al día, cuidando que la cantidad de solución nutritiva aplicada por día fuera la misma en ambos tratamientos. Los sustratos evaluados fueron: 1) arena de tezontle rojo con la mayoría de partículas comprendida entre 0.5 y 2 mm de diámetro; 2) perlita grado hortícola con partículas de 1 a 2 mm de diámetro; 3) una mezcla de arena de tezontle y perlita a 50% en volumen de cada material.

El sistema de riego fue por goteo, siempre con solución nutritiva y sin recirculación de la misma. Para cada hilera de plantas se utilizó una cintilla de polietileno flexible con emisores a cada 20 cm. La dosis diaria de riego se aportó en función de la evapotranspiración de cada tratamiento. En cada riego, las tinajas se regaban hasta capacidad del contenedor, permitiendo de 10 a 20% de drenaje del volumen aportado; de esta manera, en los tratamientos de dos riegos diarios, la cantidad de solución nutritiva aportada en cada riego era mayor que cuando se daban

cuatro riegos, pero la cantidad diaria era similar en ambos casos. La concentración de nutrimentos y las fuentes fertilizantes utilizadas se muestran en el Cuadro 1.

Los contenedores del sustrato se construyeron con láminas de polietileno calibre de 800 galgas y se recubrieron con tela de polipropileno blanco buscando mayor refracción de luz para las plantas. En el fondo de cada contenedor se hicieron perforaciones de 1 cm de diámetro a cada 25 cm para permitir el drenaje libre de los excesos de solución aplicados en cada riego. Las dimensiones de los contenedores eran: 10 cm de ancho, 40 cm de profundidad y 1 m de largo, y se sostuvieron a distinta altura mediante armazones formados con ángulo metálico de 3/4" y alambro de 3/8" de diámetro (Figura 3).

Cada uno de los seis tratamientos estudiados estuvo formado por tres hileras de plantas despuntadas a tres racimos; cada hilera se colocó a distinta altura y orientada en dirección este-oeste formando un dosel en forma escalonada (escaleriforme). La diferencia de altura entre cada hilera contigua de plantas era de 40 cm; cada contenedor tenía seis plantas (dadas las dimensiones del contenedor, esto equivale a 6.7 L de sustrato planta<sup>-1</sup>). La distancia horizontal entre hileras de plantas fue de 10 cm (Figura 3). Considerando que los pasillos entre cada conjunto de contenedores eran de 70 cm, se obtuvo una densidad de 20 plantas por m<sup>2</sup> de invernadero. La orientación este-oeste de las hileras de plantas fue con el objetivo de mejorar la distribución de RFA en el dosel, pues el sol se mueve en esa dirección, pero a la latitud geográfica del invernadero (19° N), la mayor parte del año lo hace cargado hacia el Sur.

Cuadro 1. Nutrimentos, concentraciones y fertilizantes con los que se preparaba la solución nutritiva.

Nutrimento	Concentración mg L <sup>-1</sup>	Fuente fertilizante
Nitrógeno	250	Nitrato de calcio
Fósforo	60	Ácido fosfórico al 85 %
Potasio	300	Sulfato de potasio
Calcio	300	Nitrato de calcio
Azufre	200	Sulfato de potasio; sulfato de magnesio
Magnesio	75	Sulfato de magnesio
Hierro	3	Sulfato ferroso
Manganeso	0.5	Sulfato de manganeso
Boro	0.5	Borax
Cobre	0.1	Sulfato de cobre
Zinc	0.1	Sulfato de zinc

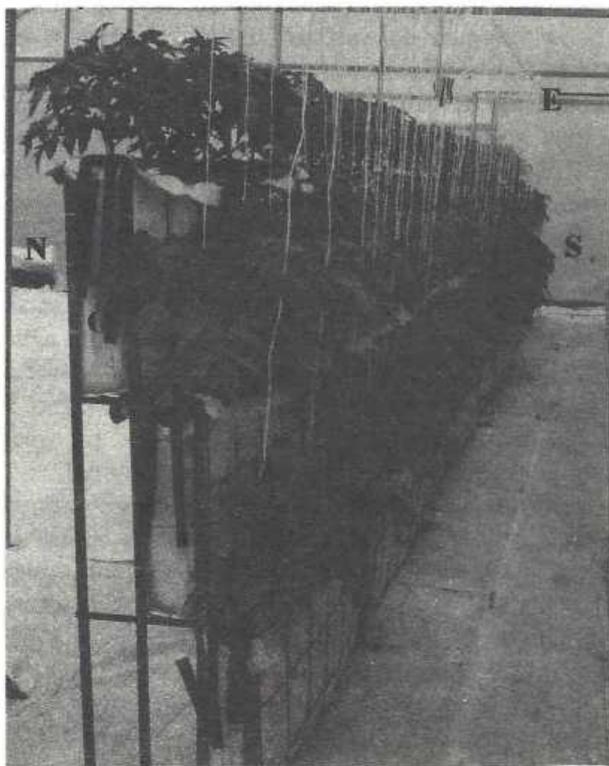


Figura 3. Vista parcial del experimento, mostrando la disposición en forma escalonada de las plantas en los contenedores.

Las variables estudiadas fueron:

- Altura de planta (cm), medida con un flexómetro a 86 días después de la siembra (DDS).
- Diámetro de tallo (cm), medido con vernier a 86 DDS.
- Área foliar por planta (cm<sup>2</sup>), medida a 86 DDS en tres plantas por tratamiento en cada repetición con ayuda de un integrador de área foliar (LI-300, Liquor Devices, Inc.).
- Rendimiento por planta (g), medido como la suma del peso de frutos en los cinco cortes realizados entre 120 y 150 DDS.
- Número de frutos por planta, medido como la suma del número de frutos en los cinco cortes realizados entre 120 y 150 DDS.
- Peso promedio por fruto (g), calculado a partir del rendimiento por planta dividido entre el número de frutos por planta.
- Diámetro ecuatorial del fruto (cm), medido con vernier y promediado considerando el total de frutos cosechados.

Además de la comparación global de los tratamientos de acuerdo con el diseño en parcelas

divididas, se efectuó también un análisis estadístico por hilera o nivel ocupado por la planta, considerando que cada hilera representaba un ambiente diferente. En ambos casos, se hicieron el análisis de varianza y las pruebas de comparación de medias (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

La siembra en semillero tuvo lugar el 17 de mayo de 2002 en charolas de poliestireno expandido de 200 cavidades, usando como sustrato turba vegetal preparada para semillero (Sunshine Mix). El trasplante se realizó a 34 DDS.

Todas las plantas se condujeron a un solo tallo y para ello fue necesario realizar la poda periódica de brotes laterales conforme se iban emitiendo; esta labor se realizó a partir de 60 y hasta 90 DDS. El despunte de la yema apical se llevó a cabo dos hojas arriba de la tercera inflorescencia y se realizó entre 75 y 85 DDS. El tutoreo se hizo apoyándose en marcos metálicos sostenidos de manera independiente del invernadero con alambres que corrían paralelamente a las hileras de plantas (Figura 3). De estos marcos se colgaron cordones plásticos (rafia) y las plantas fueron enredadas en ellos a partir de 60 DDS.

No se presentaron enfermedades fungosas de consideración, sin embargo, después de labores como los desbrotes se hicieron aplicaciones preventivas con base en maneb, zineb y cobre (Cupravit-Mix®, 2 g L<sup>-1</sup>). La mosquita blanca fue la única plaga que se presentó y se controló con dos aplicaciones de Deltametrina (Decis®, 0.5 mL L<sup>-1</sup>) en el intervalo de una semana (120 a 128 DDS).

Eventualmente, se midieron el pH y la conductividad eléctrica (CE) de las soluciones nutritivas, pero no hubo necesidad de corregirlas, ya que los valores de pH se encontraban entre 6 y 6.5 y los de CE entre 2 y 2.5 dS m<sup>-1</sup>. A 90 DDS, para cada uno de los distintos tratamientos, se hicieron mediciones de la conductividad en la solución drenante de un riego.

Las mediciones de pH y CE se realizaron con un aparato portátil (Modelo PC 18 Conductronic S. A., México, D.F.).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza (datos no mostrados) indicó diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) entre intervalos de riego sólo para la variable rendimiento por planta, mientras que para sustratos las hubo para diámetro de tallo, rendimiento por planta, peso medio

de fruto y diámetro de fruto. Para ninguna variable hubo efecto de interacción entre intervalos de riego y sustratos.

En el Cuadro 2, se observa que, para las dos frecuencias de riego establecidas (cuatro y dos riegos), las variables morfológicas (diámetro de tallo, altura de planta y área foliar) fueron estadísticamente iguales. Sólo en el caso del área foliar por planta hubo una fuerte tendencia a disminuir en el tratamiento de dos riegos por día. Mediciones de conductividad eléctrica en la solución drenada de los contenedores, realizadas a 90 DDS en el promedio de los sustratos dieron  $1 \text{ dS m}^{-1}$  más en los tratamientos con dos riegos por día que en los que se aplicaron cuatro riegos (4.4 contra 3.4, respectivamente), lo que indica una mayor posibilidad de estrés hídrico por acumulación de sales en el primer caso. Como lo señalaron varios autores (Bannister, 1976; Gardner *et al.*, 1990; Hanan, 1998), una de las primeras manifestaciones de un estrés hídrico (aunque éste sea pequeño) es una restricción en la elongación celular que se traduce en una reducción del crecimiento de órganos como las hojas.

En el mismo cuadro, se observa que las variables diámetro de fruto, número de frutos y peso medio de frutos no muestran diferencias significativas. En el caso particular del rendimiento por planta sí hubo diferencias estadísticas y el mayor rendimiento por planta se obtuvo con el tratamiento de cuatro riegos por día, 21% más que con dos riegos por día. Esto puede explicarse en función de lo señalado por Urrestarazú-Gavilán (2000), en el sentido de que las plantas manejadas con poco volumen de sustrato deben regarse frecuentemente con pequeños volúmenes de solución a fin de evitar variaciones fuertes en el contenido de humedad y de concentración de sales que dificultan la absorción de nutrientes y que repercuten, a la larga, en menor rendimiento por planta. En el presente experimento, el volumen de sustrato por planta fue menor que 7 L.

Como señalaron Hanan (1998) y Resh (2001), debido al poco volumen de sustrato usado por planta, en sistemas hidropónicos se maneja un contenido alto de humedad en el sustrato y en condiciones de días soleados y de temperaturas relativamente altas, las raíces de plantas como el tomate toman de las soluciones nutritivas con que se irrigan más agua en relación con nutrientes; si el volumen de solución está limitado por un volumen pequeño de sustrato, entre más espaciados sean los riegos, mayores serán las oscilaciones de CE y de volúmenes de agua aprovechable en el sustrato, lo que traerá consecuencias negativas en la absorción de agua y nutrientes y, por lo tanto, en los procesos fisiológicos involucrados y en el rendimiento final.

Como se muestra en el Cuadro 3, se encontraron diferencias significativas entre sustratos para la variable diámetro de tallo y el menor valor correspondió a la perlita; también los valores de altura de planta y área foliar por planta tendieron a ser menores en este sustrato.

En cuanto al rendimiento y sus componentes, en el Cuadro 3 se observa que los valores para las variables diámetro de fruto, rendimiento por planta y peso medio de fruto muestran un efecto significativamente mayor para el tezontle y la mezcla en relación con la perlita. Cabe destacar que el rendimiento por planta alcanzado por el uso de arena de tezontle como sustrato (a la densidad usada de 20 plantas por  $\text{m}^2$  de invernadero), equivale a  $34.5 \text{ kg m}^{-2}$ , mismo que, de acuerdo con Sánchez-Del Castillo y Ponce-Ocampo (1998) y Sánchez-Del Castillo *et al.* (1998), podría lograrse en tres meses de cultivo y, por lo tanto, en un invernadero adecuadamente equipado para producir todo el año, podrían lograrse cuatro ciclos por año que superarían  $100 \text{ kg m}^{-2}$  de rendimiento anual; esto es el doble de lo reportado por autores como Hanan (1998), Challa y Bakker (1999), y Resh (2001) para sistemas de producción de tomate en invernaderos altamente tecnificados como los holandeses o canadienses.

**Cuadro 2. Comparación de medias para caracteres morfológicos (medidos a 86 días después de la siembra), rendimiento por planta y sus componentes primarios en el cultivo de jitomate escaleriforme para distintos intervalos de riego.**

Riegos por día	Diámetro de tallo	Altura de planta	Área foliar por planta	Diámetro de fruto	Frutos por planta	Rendimiento por planta	Peso medio de fruto
	----- cm -----	----- cm -----	----- $\text{cm}^2$ -----	----- cm -----		----- g -----	
Cuatro	1.28 a <sup>†</sup>	131 a	7419 a	5.95 a	14.5 a	1688 a	115 a
Dos	1.23 a	135 a	6521 a	5.77 a	12.8 a	1393 b	108 a
DMS <sup>†</sup>	0.09	7.88	908.23	0.25	2.11	248.4	12

<sup>†</sup>Dentro de cada columna, medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey,  $\alpha=0.05$ ). <sup>†</sup>DMS = diferencia significativa.

**Cuadro 3. Comparación de medias para caracteres morfológicos (medidos a 86 días después de la siembra), rendimiento por planta y sus componentes primarios en el cultivo de jitomate escaleriforme para tres sustratos.**

Sustrato	Diámetro de tallo	Altura de planta	Área foliar por planta	Diámetro de fruto	Frutos por planta	Rendimiento por planta	Peso medio de fruto
	----- cm -----		cm <sup>2</sup>	cm		----- g -----	
Tezontle	1.32 a <sup>†</sup>	136 a	7214 a	6.07 a	13 a	1727 a	123 a
Perlita	1.14 b	130 a	6591 a	5.53 b	13 a	1212 b	92 b
Mezcla	1.30 a	134 a	7104 a	5.97 a	13 a	1683 a	120 a
DMS <sup>‡</sup>	0.07	13	1219	0.31	2	209	15

<sup>†</sup>Dentro de cada columna, medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ). <sup>‡</sup>DMS = diferencia significativa.

El comportamiento negativo de la perlita, de acuerdo con observaciones de campo, pudo ser causado por una mayor retención de agua, al grado de afectar el oxígeno disponible para la raíz originando un menor vigor en la planta. Tanto Resh (2001) como Urrestarazú-Gavilán (2000) señalaron que una perlita con partículas pequeñas puede ocasionar problemas de aireación en la raíz. De ser así, podría corregirse utilizando perlita con partículas de mayor diámetro al utilizado en el presente experimento.

Al hacer las pruebas de separación de medias (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ) para evaluar el comportamiento de cada hilera de plantas en el dosel escalonado, se determinó que las plantas ubicadas en la hilera superior presentaron la menor altura de planta y el mayor diámetro de tallo a 86 DDS, lo cual difirió estadísticamente de los niveles inferior e intermedio (Cuadro 4). La mayor altura de planta y el menor diámetro de tallo de las plantas en las hileras intermedia e inferior podría explicarse por la menor radiación captada por las plantas en esos niveles, ya que, a diferencia de las plantas del nivel superior, sólo recibían radiación del lado sur, pues las tinas de los niveles superiores, a pesar de ser blancas, impedían la incidencia de luz difusa proveniente del lado norte del invernadero; como lo indicaron Gardner *et al.* (1990), el sombreado causa que las plantas aumenten su altura y los tallos se vuelvan más delgados y débiles. Charles-Edwards *et al.* (1986) también mencionaron

que una disminución de la intensidad de radiación fotosintéticamente activa puede causar etiolación, cuyas principales manifestaciones son la elongación de los tallos y su adelgazamiento.

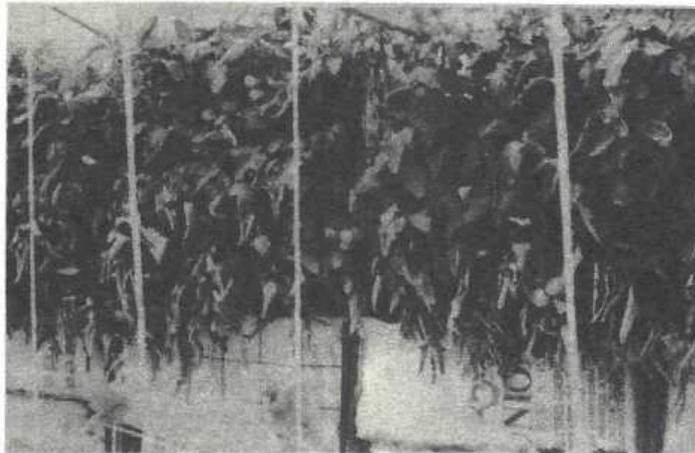
En el Cuadro 4, se observa que el rendimiento por planta y sus componentes (número de frutos por planta, peso medio de fruto y diámetro de fruto) fueron estadísticamente mayores en las plantas ubicadas en la hilera superior. Las plantas de esta hilera rindieron prácticamente el doble de las ubicadas en la hilera inferior, mientras que el peso medio de frutos también fue superior casi en 30% y el número de frutos por planta en casi 70%. En la Figura 4, se observa un detalle de esta hilera de plantas, destacando la estrecha distancia entre plantas a fin de cosechar más racimos por unidad de superficie.

Como ya se señaló, el bajo rendimiento de las plantas ubicadas en los niveles inferior e intermedio fue provocado principalmente por el sombreado que causaron las tinas de la hilera media y superior, respectivamente, reduciendo en 50% la intercepción de radiación difusa con respecto a las plantas ubicadas en la hilera superior (Figura 3). Hamed y Mohamed (1987) mencionaron que en alta densidad la radiación disminuye en los diferentes niveles de un dosel vegetal, el rendimiento por planta es menor. También Charles-Edwards *et al.* (1986) indicaron que el rendimiento puede incrementarse cuando existe mayor captación de radiación fotosintéticamente activa y

**Cuadro 4. Comparación de medias para caracteres morfológicos (medidos a 86 días después de la siembra), rendimiento por planta y sus componentes primarios en el cultivo de jitomate escaleriforme para las distintas hileras de plantas.**

Nivel	Altura de planta	Diámetro de tallo	Área foliar por planta	Frutos por planta	Rendimiento por planta	Peso medio de fruto	Diámetro de fruto
	----- cm -----		cm <sup>2</sup>		----- g -----		cm
Inferior	144 a <sup>†</sup>	1.07 c	7291 a	9 c	1073 c	98.4 b	5.6 b
Intermedia	138 a	1.25 b	6928 a	13 b	1385 b	101.7 b	5.7 b
Superior	118 b	1.41 a	6668 a	16 a	2135 a	127.2 a	6.1 a
DMS <sup>‡</sup>	10.3	0.08	895	2.9	232.8	10.1	0.1

<sup>†</sup>Dentro de cada columna, medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ). <sup>‡</sup>DMS: diferencia significativa.



**Figura 4.** Vista (lado norte) de la hilera de plantas en el nivel superior. El enrollado de las hojas es normal en plantas despuntadas cuando los frutos han llegado a su madurez fisiológica.

una distribución más homogénea de la misma en el dosel para mantener activas las hojas superiores e inferiores, situación que se presentó en las plantas de la hilera superior tal y como se aprecia en la Figura 4.

En el intento de incrementar el rendimiento por unidad de superficie mediante el aumento de la densidad de población en el cultivo de jitomate, en el presente trabajo se planteó la formación de doseles en forma de escalera a partir del manejo de hileras de plantas a diferente altura y orientadas en dirección este-oeste, debido a que con ello se lograba una distribución más homogénea de la radiación fotosintéticamente activa entre los distintos niveles de plantas. Sin embargo, debido a que Girona es una variedad de jitomate muy vigorosa, las distancias entre plantas resultaron pequeñas para el porte de este cultivar, ocasionando una competencia importante por la radiación incidente que ya de por sí se vio limitada en las hileras inferiores. Por ello, para trabajos posteriores, se recomienda evaluar variedades menos vigorosas, de preferencia de crecimiento determinado, así como ajustar bien las distancias entre plantas e hileras, todos con el mismo contexto de riegos y sustratos.

### CONCLUSIONES

- Las plantas cultivadas con arena de tezontle como sustrato rindieron significativamente más que aquellas cultivadas con perlita.

- Se obtuvo mayor rendimiento por planta dividiendo la misma cantidad de solución nutritiva diaria en cuatro riegos que dividida en dos riegos.

- Las plantas ubicadas en las tinas intermedia e inferior en el dosel escalonado tuvieron un rendimiento significativamente menor, menor tamaño y menor peso de fruto que las plantas ubicadas en el nivel superior.

### LITERATURA CITADA

- Bannister, P. 1976. Introduction to physiological plant ecology. Blackwell Scientific Publications. London, UK.
- Cadahía-López, C. 2000. Fertirrigación de cultivos hortícolas y ornamentales. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Cancino-Borraz, J., F. Sánchez-Del Castillo y P. Espinosa-Robles. 1991. Efecto del despunte y densidad de población en dos variedades de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en hidroponía bajo invernadero. Revista Chapingo 73: 26-30.
- Castilla-Prados, N. 2004. Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Challa, H. y M. Bakker. 1999. Potential production within the greenhouse environment. pp. 333-348. In: Stanhill, G. y H.Z. Enoch (eds.). Greenhouse ecosystems. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Charles-Edwards, D.A., D. Doley y G.M. Rimmington. 1986. Modelling plant growth and development. Academic Press. Sidney, Australia.
- Gardner, P.F., R.B. Pearce y R.L. Mitchel. 1990. Physiology of crop plants. Iowa State University. Ames, IA.
- Hamed, Y.N. y A.H. Mohamed. 1987. Effect of cutting stage, nitrogen fertilization and seeding rate on yield and quality of hybrid forage sorghum. J. Agric. Sci. 5: 135-148.
- Hanan, J.J. 1998. Greenhouses: advanced technology for protected agriculture. CRC Press. Boca Raton, FL.

- Jarvis, R.W. 1998. Control de enfermedades en cultivos de invernadero. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Méndez-Galicia, T. y F. Sánchez-Del Castillo. 2005. Doseles escaleriformes de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) orientados en dirección Este-Oeste. Revista Chapingo, Serie Horticultura 11: 185-192.
- Muñoz-Rodríguez, M., J.R. Altamirano-Cárdenas, J. Carmona-Montalvo, J. Trujillo-Félix, G. López-Cervantes y A. Cruz-Alcalá. 1995. Desarrollo de ventajas competitivas en la agricultura. El caso del tomate rojo. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México.
- Picken, A.J.F. 1984. A review of pollination and fruit set in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). J. Hort. Sci. 59: 1-13.
- Ponce-Ocampo, J., F. Sánchez-Del Castillo, E. Contreras-Magaña y T. Corona-Saez. 2000. Efecto de modificaciones al ambiente en la floración y fructificación de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Fitot. Mex. 23: 87-97.
- Resh, H.M. 2001. Cultivos hidropónicos. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Rudich, J. y U. Luchinsky. 1986. Water economy. pp. 335-367. In: Atherton, J.G. y J. Rudich (eds.). The tomato crop. Chapman and Hall. New York.
- Sánchez-Del Castillo, F. y T. Corona-Saez. 1994. Evaluación de cuatro variedades de jitomate bajo un sistema hidropónico a base de despuntes y altas densidades. Revista Chapingo, Serie Horticultura 1(2): 109-114.
- Sánchez-Del Castillo, F. y E. Escalante-Rebolledo. 1989. Hidroponía: un sistema de producción. 3a edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México.
- Sánchez-Del Castillo, F. y J. Ponce-Ocampo. 1998. Densidades de población y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. Revista Chapingo, Serie Horticultura 4(2): 89-94.
- Sánchez-Del Castillo, F., J. Ortiz-Cereceres, C. Mendoza-Castillo, V. González-Hernández y J. Bustamante-Orañegui. 1998. Physiological and agronomical parameters of tomato in two new production systems. Fitotecnia Mexicana 21: 1-13.
- Sánchez-Del Castillo, F., J. Ortiz-Cereceres, C. Mendoza-Castillo, V.A. González-Hernández y M.T. Colinas-León. 1999. Características morfológicas asociadas con un arquetipo de jitomate apto para un ambiente no restrictivo. Agrociencia 33: 21-29.
- Urrestarazú-Gavilán, M. 2000. Manual de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Van de Vooren, J., G.W.H. Welles y G. Hayman. 1986. Glasshouse crop production. pp. 582-624. In: Atherton, G. y J. Rudich (eds.). The tomato crop. Chapman and Hall. London, UK.

# RELACIÓN HOMBRE-NATURALEZA EN UN CICLO QUE PERPETÚA LA VIDA: AGUA Y GALERÍAS FILTRANTES EN EL VALLE DE TEHUACÁN

## Relationship Man-Nature in a Cycle Perpetuating Life: Water and Filtering Galleries in Tehuacan Valley; Mexico

D. Granados-Sánchez<sup>1†</sup>, Miguel Á. Hernández-García<sup>1</sup> y Georgina F. López-Ríos<sup>1</sup>

### RESUMEN

En México, en el Valle de Tehuacán, Puebla, se conserva en funcionamiento un sistema de aprovechamiento de agua subterránea que, utilizando la topografía y los desniveles naturales del terreno, ha proporcionado, desde el siglo XIX, el líquido a una diversidad de comunidades; este sistema se conoce como galerías filtrantes. En la actualidad, esta fuente de agua adquiere mayor importancia, pues no sólo es el vértice de una organización social con profundas raíces culturales sino también constituye una actividad generadora de ingresos económicos, al utilizarse tanto en la agricultura, como en otras actividades productivas. Sin embargo, con el aumento y la ampliación del número de galerías existentes en la región, se ha observado, desde mediados del siglo XX, un cierto abatimiento de los mantos acuíferos, pero que, no obstante, hasta hoy muestra su importancia para el desarrollo económico y social de las comunidades.

*Palabras clave:* fuente de agua, agua subterránea, qanats.

### SUMMARY

In the Tehuacan Valley, Puebla, Mexico, a harnessing system of subsoil water has been in existence since the nineteenth century, using the topography and the slopes of the land, to supply water to a number of villages; this system is known as filtering gallery. At present, this source of underground water is very important because it is the origin of a social organization with deep cultural roots. Moreover, it is a source of economic income when used in agriculture and in other productive

activities. However, the increasing and enlarging of the galleries in this valley from the middle of the twentieth century have caused a reduction of the infiltration coefficients and, consequently, a lowering of the water table. Nevertheless, at present this system has shown to be important for the economic and social development of the villages.

*Index words:* spring water, underground water, qanats.

### INTRODUCCIÓN

Con el surgimiento y desarrollo de la agricultura, las primigenias comunidades diversificaron tanto en su estructura, como en sus relaciones sociales, y se extendieron para conquistar otras regiones, incluidas las regiones áridas y semiáridas. Paralelamente, los conocimientos y las técnicas también se desarrollaron en el sentido de establecer una relación más estrecha y fecunda con la naturaleza. Así, surgió la necesidad de transformar los ambientes naturales para conformar ecosistemas artificiales relativamente estables, como un medio para obtener cada día mayores cantidades de alimentos y utilizar más intensivamente los recursos naturales (White, 1978).

En las regiones semiáridas se encontró que con el riego podían introducirse cultivos en áreas donde la intensa aridez impedía su desarrollo natural; las tierras bajas del Mar Muerto, en Jericó, que fue probablemente uno de los primeros sitios donde se practicó el riego (Kenyon, 1969), así como las tierras bajas de los ríos Tigris y Eúfrates, en el valle del Nilo, muestran las grandes civilizaciones cuyos sistemas agrícolas de riego hicieron posible su desarrollo hace 6000 años (Beaumont, 1993).

La aparición de ingeniosos sistemas –lo que es explicable no por la existencia de mejores condiciones climáticas en el pasado, sino por el uso de una diversidad de técnicas de conservación y almacenamiento de agua (Pacey y Cullis, 1986)– para proporcionar la humedad suficiente a las plantas cultivadas, además de mostrar el conocimiento acerca

<sup>1</sup> División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

<sup>†</sup> Autor responsable (didorog@latinmail.com)

de ciertos procesos naturales, es un ejemplo de la manera en que el progreso y la organización de las sociedades ancestrales se derivaron de la evolución de una sociedad burocrática altamente centralizada, dedicada a una política de control del agua y al desarrollo de la agricultura de riego, que dependió, en gran parte, del dominio de una fuente de energía económica y abundante: el trabajo de los esclavos, pues fue sólo mediante el mantenimiento de esta fuente de energía, frecuentemente por conquista, que el complejo sistema de canales pudo conservarse en funcionamiento (Beaumont, 1993). Sin embargo, esto que constituyó la prueba de la gran capacidad de adaptación del hombre ante una diversidad de condiciones ambientales, también significó el inicio de una relación de sometimiento de la naturaleza y del hombre mediante la tecnología.

Además, el impacto de esta relación entre el hombre y su entorno fue tal que algunos autores (Wittvogel, 1965; White, 1978) han afirmado que el desarrollo de la agricultura de riego es tan antiguo como el de la agricultura practicada en condiciones de temporal. Sin embargo, a pesar de que ambas formas de producir sirvieron para proporcionar los alimentos a cantidades crecientes de población, ocasionaron, a lo largo del tiempo, la degradación de la capa arable y de la fertilidad del suelo, así como la pérdida de la biodiversidad.

A pesar de lo anterior, en la actualidad se conservan no sólo vestigios arqueológicos, sino también algunos sistemas de captación y utilización de agua, en plenitud de funcionamiento, que con evidencias antiguas de suministro del vital líquido a diversidad de comunidades. Estos sistemas de

captación se han empleado no únicamente para el consumo doméstico o para el riego de algunos cultivos y otras actividades productivas, sino que se han constituido como elementos de poder simbólico y fáctico, cuyas cualidades se han utilizado como un medio de dominación económica y política, pero también como medios de cohesión comunitaria. En México, uno de esos métodos para la derivación de agua subterránea, que aprovecha la topografía y los desniveles naturales del terreno, es el localizado en varias comunidades del valle de Tehuacán y que es un ejemplo vivo que se conoce regionalmente como sistema de **galerías filtrantes**. Este sistema constituye una de las principales fuentes de agua en la región y al contrario de aquellas limitantes que se presentan en la utilización de fuentes subterráneas (altos costos de exploración, perforación, extracción, conducción, tratamiento, almacenamiento y distribución), conlleva una serie de ventajas. Estas ventajas se materializan en la combinación del conocimiento ancestral que los pobladores tienen acerca de los recursos de la región —ya que la mayoría son descendientes de los grupos establecidos desde antes de la llegada de los españoles— con la utilización del material propio de la zona y su mano de obra, para acceder a estas fuentes con disponibilidad de grandes volúmenes de agua, escasa profundidad y baja presión, así como un elevado rendimiento hídrico [(Cuadro 1) y póngese su aporte en una región semiárida y sin más fuentes de agua], alta tasa de renovación, aceptable calidad del agua y la proximidad del área de consumo (Antón, 1996).

Las evidencias más antiguas sobre la utilización de sistemas de este tipo (conocidos como *qanats*,

Cuadro 1. Evolución de las galerías filtrantes en las microrregiones y municipios del valle de Tehuacán.

Microrregión	Municipio	N° de galerías		Volumen total anual		Caudal		Hectáreas beneficiadas	
		1968	1986	1968	1986	1968	1986	1968	1986
				- millones de m <sup>3</sup> -		- - - L s <sup>-1</sup> - - -		- - - - ha - - - -	
Valle Alto	Tepanaco de López	1	4	0.9	3.9	30	125	71	126
	Santiago Miahuatlán	5	12	17.9	4.1	568	131	1345	139
	Chapulco	4	19	4.5	8.2	142	261	336	276
Valle Medio	Tehuacán	27	58	88.4	90.9	2802	2882	6643	2954
Valle Bajo	Ajalpan	7	26	8.9	17.3	283	550	670	690
Zongolica	San Antonio Cañada	-	8	-	0.3	-	1	-	10
Semiárida	Nicolás Bravo	-	6	-	0.2	-	7	-	10
Zapotitlán	Zapotitlán	-	5	-	0.3	-	8	-	10
Semiárida	Salinas	-	5	-	0.3	-	8	-	10

Fuente: Archivos Distrito de Desarrollo Rural 08 (Secretaría de Agricultura). Tehuacán, Puebla, 1968-1986.

término de origen semita a partir del cual se deriva la palabra canal, que además son llamados *karez* en Afganistán y Pakistán, *foggaras* en el norte de África y *falaj* en los Emiratos Árabes Unidos) se remontan al Medio Oriente, donde a partir de Persia (Irán) se extendieron hacia otras regiones áridas, tanto del Medio Oriente, como del Mediterráneo. La utilización de estos sistemas se inició a partir del siglo VIII a.C. en Armenia, de donde pasó a Nínive, Mesopotamia y Persia. Posteriormente se utilizaron para la irrigación en el área de Persópolis, una de las ciudades capitales del Imperio de Aquememe que en su expansión, durante el siglo V a.C., lo transmitió a Egipto, lugar en el que se adoptaron rápidamente y se pusieron en práctica en el Oasis Kharga. De Egipto, los *qanats* aparentemente se difundieron a las regiones central y noroccidental del Sahara, donde, aunque tuvieron una importancia secundaria, su construcción fue favorecida por las invasiones árabes de los años 984 y 1280 d.C. (Advisory Committee on Technology Innovation, 1974).

En 1959, Asin, citado por Woodbury y Neely (1967), encontró un sistema de galerías subterráneas en la ciudad de Madrid que, establecido alrededor del Año 1202, se convirtió en la evidencia de la difusión de los *qanats* hacia la Península Ibérica y, en particular, a España. Este sistema de galerías subterráneas, construido por los invasores en una pequeña villa, se convirtió en una fortaleza y a su salida se transformó en la ciudad de Madrid. El sistema muestra, además, que el nombre de la ciudad se halla estrechamente relacionado con la construcción de este sistema, pues Madrid es una derivación del vocablo híbrido árabe-español *mayrit*, que proviene del árabe *mayra* que significa "galería de agua".

De esta forma, los *qanats* se localizan en todos aquellos países que recibieron la influencia de la cultura persa, como Pakistán, Turkistán, el sur de la ex URSS, Irak, Siria, Arabia, Yemen y durante la época de la dominación romana, se extendieron hasta el norte de África y la Península Ibérica y, a través de esta última, se conocieron y se desarrollaron en el Nuevo Mundo, donde, en México, se conocen como "galerías", "galerías filtrantes", "pocerías" y *apantles* (término derivado del náhuatl *apantl*, que significa "canal de agua") con tragaluces (McNeish, 1971).

Un *qanat* es esencialmente un túnel horizontal que intercepta el agua subterránea dentro de un abanico aluvial; consta de un túnel de suave pendiente perforado a través de material aluvial, el cual

comunica el agua desde abajo del manto freático para ser conducida, sin bombas, equipo, ni alguna fuente adicional de energía, hasta la superficie (Figuras 1a y 1b), de modo que pueda ser usada (Advisory Committee on Technology Innovation, 1974).

En la actualidad, los sistemas de *qanat* se encuentran en todo el Medio Oriente pero alcanzan su máximo desarrollo en Irán, donde se tienen alrededor de 22 000, constituyendo una densa red de canales subterráneos de aproximadamente 27 350 km de longitud (Wulff, 1968). Asimismo, la magnitud de algunos de estos sistemas es notable, pues al oriente de Irán se han reportado pozos madre de más de 290 m de profundidad, construidos al interior de abanicos aluviales adyacentes a Gran Kavir, en la meseta central, mientras que alrededor de Yazd, los *qanats* pueden ser de más de 50 km de longitud; sin embargo, en términos generales, la mayoría de los *qanats* son mucho más pequeños, con pozos madre de profundidades de entre 10 y 50 m y longitudes de 1 a 5 km y quizás algo sorprendente, dado el inmenso esfuerzo hecho en su construcción, sus descargas de agua son relativamente bajas, con la mayoría de los valores fluctuando entre 0 y 80 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (Beaumont, 1971).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de la compleja red de relaciones que se teje alrededor de las múltiples interacciones derivadas de la distribución y utilización de un recurso tan escaso en esta región, como es el agua y su forma de aprovechamiento, tan particular como ancestral, mediante galerías filtrantes, es producto del trabajo de diversas generaciones de estudiantes en la región del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Estos años de estudio y trabajo han contribuido a redimensionar la importancia de una de las áreas que fue asiento de los primeros pobladores y cuna de la agricultura en Mesoamérica, así como encuentro de una diversidad de etnias y una variedad de formas de relacionarse con la naturaleza. Así, se ha obtenido un cúmulo de información a partir del cual se han sistematizado tanto el conocimiento de los rasgos culturales, como las relaciones comunidades-entorno y el potencial de desarrollo de la región. En particular, la información que da cuerpo al análisis que aquí se presenta, es el resultado de la combinación de un proceso de reconstrucción histórica a través del análisis documental, la observación participante en las actividades diarias de los individuos en sus

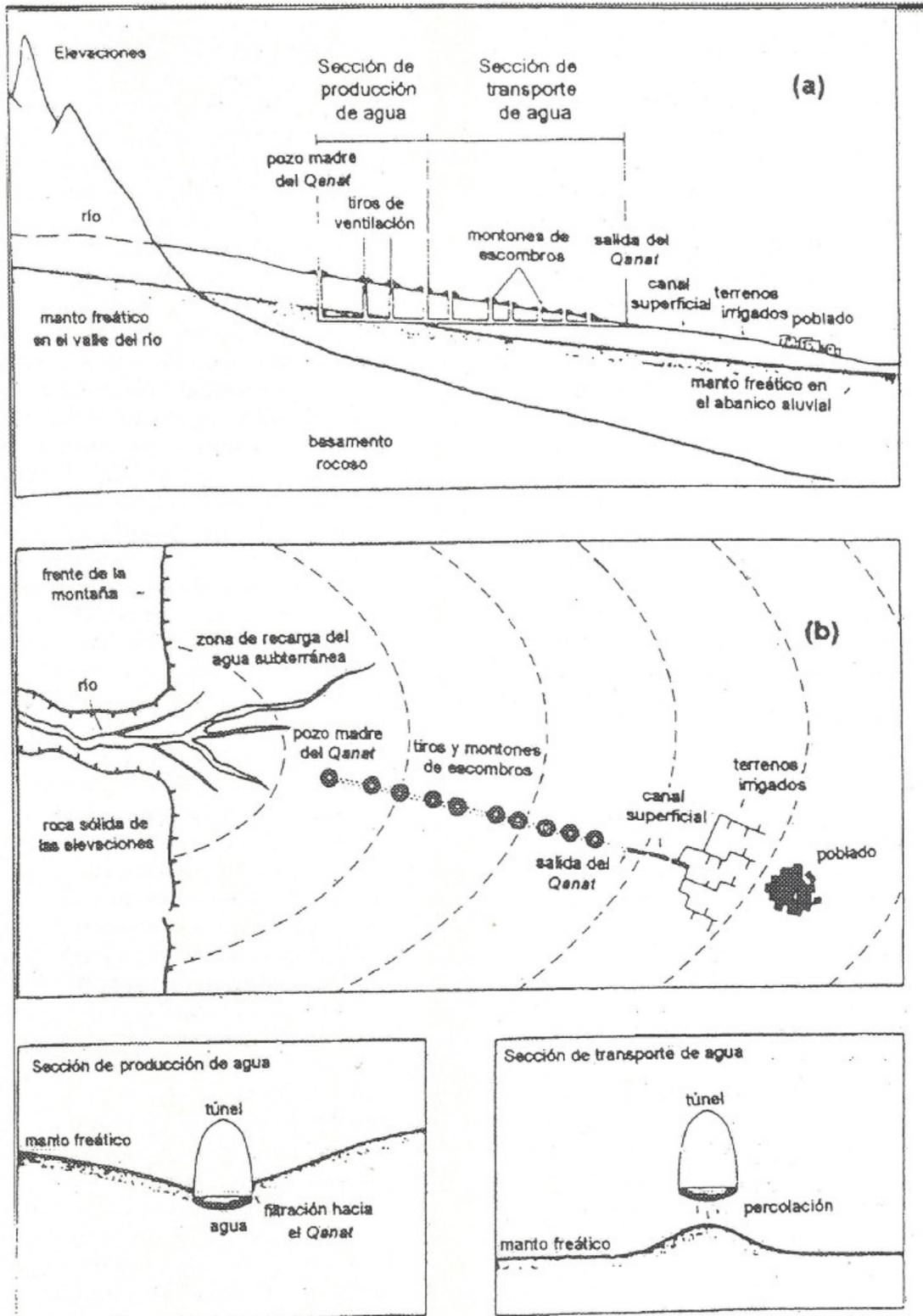


Figura 1. Sección transversal (a) y planta de los componentes de un "Qanat" (Beaumont, 1993).

comunidades y de las entrevistas estructuradas aplicadas a informantes que son depositarios del conocimiento tradicional y participantes activos en la construcción de su realidad cotidiana.

### APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE GALERÍAS FILTRANTES EN LA REGIÓN DEL VALLE DE TEHUACÁN, PUEBLA

#### Construcción de las Galerías Filtrantes

Las bases de estos sistemas de captación y aprovechamiento de agua descansan en las características del terreno, pues, mediante la combinación de relieve, topografía y composición del material parental, es posible aprovechar el agua que, proveniente de la precipitación, se filtra a través de las diversas capas del subsuelo hasta llegar a los mantos freáticos.

Estos sistemas de aprovechamiento de agua se construyen en general en las laderas de montañas, en las que, debido a la acumulación de material aluvial, es posible la infiltración del agua proveniente de las precipitaciones. De esta manera, una vez que personas

experimentadas estudian e interrelacionan la presencia de aluviones, los cambios en la pendiente del terreno, así como las variaciones en el tipo de vegetación y con ello determinan la posible presencia de algún depósito de agua subterránea, se traza un sistema compuesto por un túnel horizontal subterráneo que comunica perforaciones verticales las cuales captarán el agua depositada en los mantos freáticos y la conducirán hacia la superficie.

Una galería filtrante se compone de: a) un sistema de extracción constituido por los pozos (lumbrecras o respiraderos) y el túnel con sus ramales (si es el caso) y b) un sistema de almacenamiento y conducción. El túnel subterráneo tiene una altura de 1.8 a 2.0 m y una amplitud de alrededor de 0.70 m. Las lumbrecras o pozos verticales se construyen de 0.60 a 0.80 m de ancho y su profundidad depende de la distancia a que se encuentre el agua, aunque la mayoría son de más de 30.0 m de profundidad. La longitud de las galerías filtrantes es variable, así como el número de lumbrecras que cada una requiere (Figura 2).

La construcción de una galería se inicia con la contratación de personas experimentadas que, en la región, se conocen como "poceros", las cuales cavan un pozo en el sitio donde se presume se encuentra

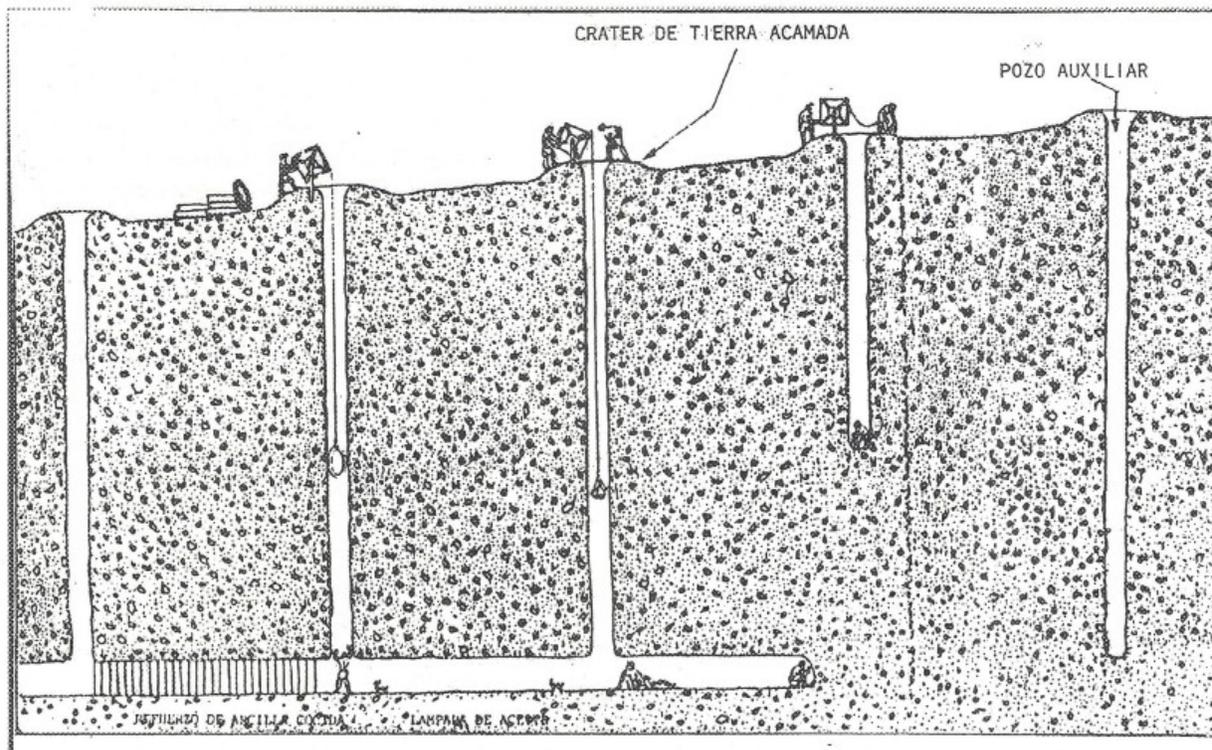


Figura 2. Esquema de la construcción de un "Qanat" (Wulff, 1968)

el agua; una vez que las excavaciones alcanzan un estrato húmedo, lo que constituye el indicio de la posible presencia de un acuífero, se perfora una cavidad hacia el fondo de la arcilla impermeable, con el objeto de medir el nivel del agua; si el agua que corre por esta cavidad es de considerable abundancia, entonces se ha encontrado un manto acuífero en el que su extensión y volumen potencial de agua se determinan perforando otras cavidades en el área adyacente al estrato húmedo. Logrado esto, se procede a marcar, sobre la superficie del terreno, el posible curso del canal subterráneo que conducirá la corriente de agua y a ubicar un conjunto de ventilaciones verticales que van hasta el sitio donde el canal alcanzará la superficie.

Para determinar la pendiente del canal subterráneo, se considera que el desplazamiento del agua sea tal que, al mismo tiempo que logre alcanzar la superficie, no arrastre los materiales depositados en el fondo; el declive adecuado y la dirección de los pozos se obtienen colocando, en los respectivos centros de los pozos de los extremos, dos plomadas que deben coincidir con el centro del túnel; para esto, se coloca una vela encendida en el punto de excavación y si la luz se proyecta sobre el centro, en línea con las cuerdas de las plomadas, la dirección de la excavación es correcta. Si, a medida que se avanza en la construcción de las lumbreras, el volumen de agua se reduce en buena parte, se decide ya sea la perforación de más lumbreras, la mayor excavación del túnel y ramales o, simplemente, la suspensión de la obra.

Para la perforación de las lumbreras, así como para realizar las labores de limpieza y extracción de materiales, se utiliza un torno que se construye colocando un travesaño sostenido por dos horcones ubicados en los flancos del pozo; en el travesaño se enrolla una cuerda que se despliega con dos manivelas situadas en los extremos del madero y así se introducen los poceros y se extraen los escombros. Cuando los túneles son perforados a través de material bien consolidado, como arcillas u otros conglomerados bien cementados, no requieren de la construcción de obras de reforzamiento y, cuando su trazo se encuentra con materiales rocosos, se realiza un rodeo que obliga a la perforación de nuevos ductos de ventilación. No obstante, cuando el canal cruza por áreas donde predominan materiales arenosos y suelos inestables que pueden causar el derrumbe del túnel, se colocan "ademes", que son piezas de concreto

en especial preparadas con forma y dimensiones que encajan perfectamente con las condiciones del túnel.

### Origen de las Galerías Filtrantes en Tehuacán

Aunque algunos autores, como Blázquez, citado por Woodbury y Neely (1967), han concluido que "...este sistema de captación de aguas fue aplicado por primera vez en Tehuacan, por los frailes franciscanos, casi a raíz de la conquista, cuando fue creado el marquesado de Oaxaca y desde entonces se ha venido desarrollando la red de galerías...", no obstante parece que el origen de este sistema de captación y utilización de aguas subterráneas fue posterior a la llegada de los españoles, pues tanto las técnicas, como los términos empleados para designarlos "galerías", "galerías filtrantes" (a excepción del vocablo náhuatl *apanitle*, que quiere decir canal de agua), indican su origen hispano más que indígena. Además, la similitud entre estos sistemas y los utilizados en el Medio Oriente es una evidencia de que España sólo sirvió como una vía de transmisión para su adopción en estas latitudes. Por otra parte, es casi imposible pensar que con las herramientas que poseían las culturas prehispánicas, fabricadas con madera y roca, pudieran haber construido los extensos túneles y los ductos de ventilación, requeridos en la conducción del agua desde el subsuelo hasta la superficie. Así, de acuerdo con los registros de los habitantes de la región, el primer sistema de galerías filtrantes establecido en el valle de Tehuacán data de la primera década del siglo XIX, ya que se construyó para cubrir las necesidades agrícolas y ganaderas de las haciendas de un acaudalado terrateniente (Woodbury y Neely, 1967).

### Importancia y Utilización de las Galerías Filtrantes

Con una escasa y mal distribuida precipitación (300 a 700 mm anuales), la región tiene en la carencia de agua su principal problema, pues a pesar de que sus pobladores son herederos de un conocimiento hidrogeológico e hidroagrícola —las primeras evidencias de manejo del agua en esta región, que fue centro de domesticación y cuna de la agricultura, se remontan a 2800 años y posiblemente más allá, si se considera que la evidencia botánica existente en el valle de Tehuacán pone en claro que durante la fase Coxcatlán, 4000 a.C., se practicó sistemáticamente la agricultura en pequeña escala para producir calabaza,

aguacate, chile, algún tipo de maíz y quizás amaranto y algodón— muchas de sus familias viven con 7 L por persona al día (Toledo y Solís, 2001).

Esta situación, aunada a la constante disminución y agotamiento de las fuentes naturales de agua, debidas al incremento en la superficie cultivada, y los cada vez mayores requerimientos del líquido para una población en permanente ascenso determinan que los habitantes de la región norte del valle utilicen estos sistemas para cubrir sus necesidades básicas; de esta manera, una de las principales funciones de estos sistemas es la de proporcionar agua para el consumo doméstico y para la irrigación de las áreas cultivadas. Sin embargo, debido a las presiones de la creciente agricultura de riego y a la constante reducción en el abastecimiento del agua subterránea —que se observaba ya desde la década de los cincuenta— los habitantes de la porción norte del valle han usado el sistema de galerías filtrantes para aumentar el agua de los manantiales naturales en el área. La importancia de la aportación de esta fuente de agua se hace evidente si se considera que las galerías filtrantes duplicaron el potencial hidráulico de la región y, por lo tanto, la cantidad de tierra susceptible de ser incorporada a la agricultura.

En la región sureste del valle de Tehuacán, los manantiales fueron la única fuente de agua desde la época de la Colonia. De este modo, cinco manantiales (La Taza, La Meza, La Ciénega, Coyoatl y Tochatl), que durante siglos abastecieron con su agua los requerimientos para usos públicos y domésticos, para el riego en pequeñas propiedades y ejidos, así como para el uso industrial de las comunidades de estos y otros municipios, con la aportación de agua para el riego de 3720 ha, se vieron complementados con la aportación del agua proveniente de las galerías filtrantes de los municipios de Chilac, Altepexi, Ajalpan, San José Miahuatlán y Zinacatepec, que beneficiaron con el riego una superficie de 3812 ha (Henoa, 1980).

Una segunda importante función del sistema de pozos en cadena es la de proporcionar el agua para las bebidas y baños medicinales por los cuales la región es bien conocida [Blázquez, citado por Woodbury y Neely (1967)] y que forman la base de la economía primaria y la industria de Tehuacan. Además, la creciente popularidad de las aguas minerales y el resultante incremento en el número de balnearios y plantas embotelladoras hicieron una necesidad el uso de las galerías, hasta el punto en que las mayores plantas embotelladoras estuvieran a punto de

abandonar el sistema de pozos en cadena a favor de los pozos profundos perforados con maquinaria (Woodbury y Neely, 1967).

En la actualidad, es claro que el aprovechamiento de estas fuentes de agua, para su comercialización como bebidas embotelladas, se complementa con una producción avícola que es de las más importantes de México, pero también altamente demandante de recursos tan valiosos como el agua.

Por otra parte, estos sistemas proporcionaron el líquido para el funcionamiento de plantas hidroeléctricas, pues muchas galerías se construyeron de manera tal que sus túneles convergieran en la cuenca generadora de energía de la planta, o se construyeron con el doble propósito de servir como fuente de energía y cubrir los requerimientos de la agricultura. A pesar de esto, las plantas fueron abandonadas, pues la combinación de altos costos de operación, la baja producción de energía eléctrica y el desmedido gasto de agua derivada de las galerías subterráneas, volvieron incosteable su operación [Comisión del Papaloapan, citada por Woodbury y Neely (1967)].

### **Recursos Naturales e Integración Social: la Síntesis de una Cultura**

La extensión de las galerías filtrantes, el volumen de agua que aportan, su ubicación, así como sus condiciones de operación varían grandemente y, aunque los datos que se presentan (Cuadro 1) se derivan de los registros de la Secretaría de Agricultura, en diferentes periodos, no obstante, no son un reflejo fiel, puesto que no se tiene un inventario actualizado ni completo de la totalidad de las galerías existentes.

En una región con tan larga tradición en el manejo y uso del agua como es el valle de Tehuacán, este recurso natural, como un bien escaso, presenta una variedad de particularidades en sus formas de aprovechamiento, las cuales son parte de una relación histórica en la que sociedad y ambiente se funden para reproducir la vida y estructurar las relaciones en la sociedad. Uno de los aspectos menos conocido de este tipo de aprovechamiento de agua es el que se relaciona con los aspectos organizativos. Cada galería es promovida por una “Sociedad explotadora y distribuidora de aguas”, la cual es una sociedad civil mejor conocida como “Sociedad de Agua”, que funciona como una cooperativa regida por estatutos, cuyo carácter de contrato y la propiedad de acciones

determinan los derechos y las obligaciones de cuerpo directivo y socios (Henao, 1980).

Inicialmente, las cooperativas se formaron con las perspectivas de toda empresa que busca cierta ganancia mediante la prestación de un bien o servicio. Así, se podía conformar una cooperativa con la asociación legal de un grupo familiar o de amigos, aunque es posible encontrar motivaciones de carácter eminentemente personal, social e incluso político. De este modo, en principio se encuentran a los hacendados, a los propietarios independientes y a grupos de medianos agricultores como promotores de la construcción de las galerías filtrantes, hasta que la mayoría de ellas se halló en manos de sociedades civiles que, con el tiempo, se apropiaron de la mayor parte de las acciones y, por lo tanto, de las aguas de diversas sociedades que tienen su origen incluso en otros municipios. Sin embargo, muchas de las sociedades han logrado preservar una serie de interrelaciones o mecanismos de integración entre los distintos pueblos usufructuarios del agua proveniente de las galerías.

Para los años ochenta, las "Sociedades de Agua" se encontraban concentradas en sociedades civiles (77%), haciendas (10%), propietarios particulares (2.7%), ejidos (5.4%), sociedad civil y ejido (0.9%), colonia agrícola (0.9%), industria avícola (0.9%), industria y ejido (0.9%), hacienda y ejido (0.9%) (Henao, 1980).

De esta manera, el agua proveniente de una multitud de manantiales y galerías filtrantes es derivada a través de una densa red de canales y mediante mecanismos de renta o mediería, puede ser conducida a diversidad de sitios –hasta el punto en que no es posible predecir su sitio de llegada–. No obstante, esto, que pudiera parecer un simple medio de distribución de un recurso, es la manifestación de una organización social que refleja tanto las características de propiedad, venta y renta de un recurso natural (que hacen posible no sólo que una parcela en un ciclo de cultivo sea "de regadío" y al otro sea "de temporal" o *viceversa*), como la existencia de un elaborado sistema de descentralización administrativa. Este sistema se estructura a partir de una multitud de asociaciones que manejan distintos aspectos de la administración y organización de los usufructuarios del agua, no únicamente en las galerías filtrantes, sino también en los manantiales, así como en la utilización de zanjas y de canales (Campos *et al.*, 2000).

La organización de los beneficiarios para la administración y el aprovechamiento del agua es un aspecto fundamental en la estructura de las comunidades, pues constituye uno más de los mecanismos de cohesión e integración cultural de los individuos con su comunidad y con su entorno. Así, la explotación del agua subterránea, mediante las galerías filtrantes, no puede desligarse del conjunto de relaciones históricas, políticas y culturales en que se desarrollan las comunidades de esta región. De esta forma, se constituye una "sociedad de aguas" que es la encargada de la administración de dicho sistema a través de "acciones", las cuales otorgan a cada uno de los integrantes el usufructo del agua para regar sus propios cultivos o la venta del riego, de acuerdo con sus intereses y necesidades.

Las "acciones de agua" son arreglos periódicos durante los cuales el titular de una acción puede hacer uso del agua proveniente de la galería subterránea. En términos generales, una sociedad dispone de 60 acciones de agua de 12 h cada una, lo que quiere decir que por cada acción que posea un socio, tiene derecho al usufructo de 12 h de agua por mes. Bajo la administración y gobierno de un órgano en el que la máxima autoridad es la asamblea general, se reúnen cada mes para revisar las condiciones de la galería y para tratar todos los asuntos relacionados con la administración, el funcionamiento y el desempeño de los representantes, los cuales se eligen cada año, ocupando el cargo ineludible y gratuitamente, en forma rotatoria, todos los miembros de la sociedad.

Considerando el *status* social y la situación económica de los integrantes, las sociedades pueden estar conformadas por campesinos sin tierras, campesinos minifundistas, agricultores comerciales o pueden estar integradas por una combinación de estos tipos de productores. Sin embargo, considerando que la finalidad de la organización es la obtención de un beneficio individual directo, aunque dentro de una organización basada en la participación colectiva pero considerablemente heterogénea, entonces, es posible observar dentro de este tipo de sociedad tanto las formas tradicionales de participación comunitaria, cohesión y solidaridad, como los más crudos mecanismos de exacción y opresión de tipo capitalista en las relaciones de usufructo del agua, de producción, intercambio y comercialización.

Por estas razones, con el correr del tiempo, las sociedades de aguas han tenido una decisiva influencia en la composición y estratificación social y económica de las comunidades a que pertenecen.

Así, en algunas comunidades han hecho posible el acceso de campesinos pobres o sin tierras a mejores niveles de vida, mediante su participación en la organización y administración de vital líquido. Pero también han establecido las condiciones para que quienes tienen un mayor poder al interior de la comunidad se apropien, mediante el acaparamiento de un buen número de acciones, de los mayores beneficios particulares por el aprovechamiento de un volumen superior del recurso.

Para las sociedades campesinas, cuya conformación es más homogénea, este tipo de organización es parte indisoluble de su acervo cultural y manifestación de ciertos rasgos de autonomía e independencia. Tales rasgos son la prueba del funcionamiento de una estructura que mediante la conjugación de los recursos que ofrece el medio, la aplicación del conocimiento y de las técnicas, así como una eficiente organización social, hacen posible el uso intensivo de un recurso esencial para la vida, pero también alejado del control oficial o particular.

#### SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE LAS GALERÍAS FILTRANTES EN EL VALLE DE TEHUACÁN

En la región de Tehuacán, la combinación de factores naturales (ubicación geográfica, composición geológica, escasa y errática precipitación, etc.) con las actividades del hombre (sobreexplotación de recursos naturales, flora, fauna, agua) ha contribuido al agotamiento significativo de una gran variedad de recursos naturales. En relación con los recursos hidráulicos, el abatimiento de los mantos acuíferos que comenzó a observarse en los años cincuenta, debido quizás al excesivo uso de las galerías filtrantes, a las excavaciones más profundas para derivar nuevos acuíferos que pudieron incrementar la velocidad de agotamiento del agua de acuíferos más superficiales, así como para robar de otros sistemas de galerías, es la evidencia de un frágil recurso que ya para mediados del siglo XX mostraba, de acuerdo con los estudios de Blázquez y Fuentelsaz, citados por Woodbury y Neely (1967), que la explotación de las fuentes de agua subterránea por medio de manantiales y pozos en cadena había alcanzado un límite más allá del cual se utilizaba más agua de la que podría ser repuesta a través de los procesos naturales. De esta manera, de acuerdo con la relación negativa entre el agua infiltrada y la extraída, se daba lugar a un decreto de veda, por tiempo indefinido, para la excavación de

norias, la perforación de pozos someros para la captación de aguas freáticas y galerías filtrantes, así como para la prolongación y repisado de las ya existentes [Comisión del Papaloapan, citada por Woodbury y Neely (1967)].

A pesar de estas disposiciones, de acuerdo con los datos presentados en el Cuadro 1, se observa un incremento en la construcción de galerías filtrantes y una tendencia a seguir aumentando, pues esta fuente de agua adquiere mayor importancia cada día, ya que no sólo es el eje de toda una organización social con profundas raíces culturales, sino que, además, constituye una actividad generadora de ingresos económicos que, al mismo tiempo, constituye tanto el medio para mantener la disponibilidad de un caudal necesario para la agricultura y el consumo doméstico, como la posibilidad de recuperar un recurso que las comunidades consideran esencial para su desarrollo particular.

El relativo bajo costo de las técnicas empleadas en la construcción de las galerías filtrantes, las cuales requieren de una cuantiosa inversión en mano de obra pero una reducida inversión en material y equipo, y el abatimiento del manto freático, que origina la disminución paulatina del caudal de las galerías, son condiciones que posiblemente se conjugaron para construir un mayor número de ellas o tratar de ampliar su capacidad de abastecimiento de agua. Sin embargo, contrariamente a lo esperado, con este aumento en el número de galerías existentes en la región y con datos acerca de la ampliación de un buen número de ellas, el caudal de agua extraído no se incrementó de manera significativa. Esta situación pudo deberse a que, aun contando con un mayor número de galerías o su ampliación, lo único que se logró fue una redistribución del líquido, lo que aunado a la conducción superficial del agua en canales a cielo abierto, que en general presentan graves desperfectos, para acceder a las áreas agrícolas, incrementa las pérdidas por evaporación.

A primera vista, esta relación entre una mayor construcción o ampliación de galerías y la perforación de pozos sugiere sólo una redistribución del líquido entre un mayor número de usuarios. No obstante, el aprovechamiento del agua subterránea oculta una situación en la que esa apropiación del recurso no es del todo equitativa. Si se considera que, comparativamente, los costos de perforación de un pozo son mucho más elevados que los de la construcción de una galería, entonces, poco a poco, la mayor capacidad de algunos usuarios ha producido

una estratificación al interior de las comunidades. Esta estratificación social se manifiesta en el acaparamiento de mayores volúmenes de agua por parte de unos cuantos individuos, mientras que la mayoría tiene que racionar cada vez más sus aprovechamientos. Esto puede reflejarse en la concentración de la superficie dedicada a la agricultura de riego en algunos municipios (Cuadro 2).

A pesar de que estos datos no reflejan una disminución en la superficie dedicada a la agricultura de riego, muestran un incremento en la superficie irrigada (comparando los datos reportados para los años 1968 y 2000/2002) de alrededor de 4.9%, no obstante es patente la concentración de la producción (96.9%) en tres municipios, los cuales del total de la superficie cultivada con riego en la región ocupan Tehuacán (72.7%), Ajalpan (15.5%) y Santiago Miahuatlán (11.8%).

Aunque pudiera considerarse que los mayores volúmenes de agua se estarían dedicando a la realización de actividades más rentables, como el embotellamiento, la avicultura o la ganadería, ante la falta de estudios detallados y actualizados sobre este recurso y sus diferentes formas de aprovechamiento, no se puede sino afirmar que la situación actual de la explotación de aguas subterráneas a través de galerías filtrantes, es un reflejo de un conjunto de factores que se relacionan tanto con aspectos tecnológicos y

**Cuadro 2. Superficie cultivada con riego (cultivos temporales y perennes) en los municipios abastecidos con agua de manantiales y de galerías filtrantes.**

Municipio	Hectáreas beneficiadas con riego				
	1968	1986	1991	1999/ 2000	2001/ 2002
Tepanco de López	71	126	-	-	-
Santiago Miahuatlán	1345	139	977	886	1088
Chapulco	336	276	194	117	125
Tehuacán	6643	2954	5197	6566	6697
Ajalpan	670	690	1376	1668	1430
San Antonio Cañada	-	10	-	80	79
Nicolás Bravo	-	10	9	-	-
Zapotitlán Salinas	-	10	60	80	90
Total	9065	4215	7813	9397	9509

Fuente: Distrito de Desarrollo Rural 08, Tehuacán, Puebla. Secretaría de Agricultura/TNEGI. Anuario Estadístico de Puebla, 1992, 2001, 2003.

económicos, como con situaciones de carácter cultural y social, entre los que se pueden mencionar:

- Cambios en la intensidad y uso del agua. La creciente urbanización, así como la diversificación e intensificación de las actividades económicas, origina no sólo un incremento en la demanda de agua, sino una situación de conflicto entre las necesidades de uso doméstico, ganadero e industrial, pues el destino del aprovechamiento del agua muchas veces se decide a partir de criterios comerciales -principalmente en aquellas galerías donde el control no depende enteramente de los beneficiarios- o atendiendo a la fuerza política o económica de los interesados en el cambio de uso del agua.
- Cambios en el patrón de cultivos. El establecimiento de cultivos comerciales (alfalfa, sorgo, cebada, jitomate, chile, tomate, etc.) que son económicamente más rentables y más intensivos en su producción, da lugar al incremento en la utilización de insumos (maquinaria, fertilizantes y agroquímicos), pero también a un mayor consumo de agua.
- Incremento en las pérdidas por infiltración y evaporación derivadas de: i) un aumento en el número de galerías y el consecuente aumento en el número de canales de conducción, los cuales, en su mayoría, no se encuentran revestidos; ii) la construcción cada vez más frecuente de represas de almacenamiento para acumular un caudal en creciente disminución y sus respectivos canales de distribución, que raramente son impermeabilizados; iii) la mayor distancia que existe entre las galerías construidas debido a la disminución del volumen recibido y las áreas de cultivo.
- Relación entre la recarga de los mantos acuíferos y la extracción de agua, originada por la sobreexplotación de la cubierta vegetal, la pérdida de la capa superficial del suelo y la acentuación de los procesos de erosión hídrica y eólica.
- Aprovechamiento ineficiente del agua, tanto para uso agrícola, como pecuario e industrial.

## CONCLUSIONES

- Es evidente que el uso del agua proveniente de las galerías filtrantes se ha diversificado y compite con otras formas de aprovechamiento de aguas subterráneas, lo que, aunado a la mayor demanda de una población en constante aumento y con actividades más complejas, diversas e intensivas, agudiza, en general, los problemas relacionados con su conservación y manejo.

- Las galerías filtrantes, si bien constituyen una muestra acerca de las formas ancestrales de relacionarse con la naturaleza, de organización social y productiva, así como un ejemplo de la transmisión de conocimientos y técnicas de una región a otra, de un país a otro, también nos presentan formas vigentes de aprovechamiento de los recursos, como lo demuestran el pleno funcionamiento de las galerías filtrantes existentes en el valle de Tehuacán.

- Sin embargo, las pautas de un desarrollo que privilegian la competencia antes que las necesidades, la individualización de las relaciones sociales, antes que la organización de la sociedad, la producción para el mercado antes que la resolución de problemas concretos y el mejoramiento de las condiciones de vida de quienes constituyen la mayor parte de los habitantes de este país, empujan a los productores hacia la senda en que se sobreexplota por igual a la naturaleza y al hombre.

- Lo mismo sucede tanto con los recursos renovables, como con los no renovables, cuya recuperación requiere de ciclos con períodos temporales y espaciales de mayor extensión cada vez. De esta manera se presenta el ciclo de recuperación del agua en las galerías filtrantes, en un proceso que, a la par que comercia con el agua, sirve para fortalecer las relaciones de acumulación y enriquecimiento de unos cuantos en detrimento de la riqueza natural y la pobreza de todos.

- La consideración de una alternativa que contemple la conservación, la restauración, el manejo y el destino del agua en un sistema de galerías filtrantes y su posible expansión o inducción en otras regiones, debe partir de una visión integral del equilibrio ecológico. Un equilibrio entre las condiciones de la atmósfera, la cubierta vegetal y el material geológico, los cuales hacen posible la renovación del ciclo natural de infiltración y recarga de los mantos acuíferos. De igual forma, debe considerarse que el desarrollo futuro de cualquier región o nación no puede sustentarse, como hasta ahora, en la explotación de la naturaleza y la opresión del hombre.

## LITERATURA CITADA

- Advisory Committee on Technology Innovation. 1974. More water for arid land promising - Technologies and research opportunities. National Academy of Sciences. Washington, DC.
- Antón, D.J. 1996. Ciudades sedientas. Agua y ambientes urbanos en América Latina. Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (CIID), UNESCO y Editorial NORDAN-Comunidad. Montevideo, Uruguay.
- Beaumont, P. 1971. Qanat systems in Iran. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrology* 16: 39-50.
- Beaumont, P. 1993. *Drylands - Environmental management and development*. Routledge. London, UK.
- Campos, F., L.E. Henao, K. Enge y S. Whiteford. 2000. El Valle de Tehuacán. pp. 253-344. *In: Palerm-Viqueira, J. y T. Martínez-Saldaña (eds.) Antología sobre pequeño riego. Volumen II. Organizaciones autogestivas*. Colegio de Postgraduados-Plaza y Valdés. México.
- Henao, L.E. 1980. Tehuacán. Campesinado e irrigación. Colección Ciencias Sociales. Editorial Edicol. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1992. Anuario Estadístico del Estado de Puebla. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001. Anuario Estadístico del Estado de Puebla. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2003. Anuario Estadístico del Estado de Puebla. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Kenyon, K.M. 1969. The origins of the Neolithic. *The Advancement of Science* 26: 1-17.
- McNeish, R. 1971. Speculation about How and Why food production and village life developed in the Tehuacan Valley, Mexico. *Archaeology* 4: 307-309.
- Pacey, A. y A. Cullis. 1986. *Rainwater harvesting: the collection of rainfall and run-off in rural areas*. Intermediate Technology Publications. London, UK.
- Toledo, V.M. y L. Solis. 2001. Ciencia para los pobres. El programa "agua para siempre" de la Región Mixteca. *Revista Ciencias (México)* 64: 27-35.
- White, G.F. 1978. Environmental effects of arid land irrigation in development countries. MAB Technical Note 8. Man and Biosphere. New York.
- Wittfogel, K.A. 1965. The hydraulic civilisation. pp. 152-164. *In: Thomas, W.L. (ed.) Man's role in changing the face of the Earth*. University of Chicago Press. Chicago, IL.
- Woodbury, R.B. y J.A. Neely. 1967. Water control systems of the Tehuacan Valley. pp. 81-153. *In: McNeish, R.S., A. Nelken-Turner y D.S. Byers (eds.) The Prehistory of the Tehuacan Valley. Volume IV. Chronology and Irrigation*. University of Texas. Austin, TX.
- Wulff, H.E. 1968. The qanats of Iran. *Sci. American* 218: 94-101.

# HISTORICAL ANALYSIS OF THE IRRIGATION EVOLUTION OF THE LAGUNA REGION OF MEXICO

## Análisis Histórico de la Evolución de la Irrigación de La Comarca Lagunera de México

Marco A. Inzunza-Ibarra<sup>1†</sup> and H. Curtis Monger<sup>2</sup>

### SUMMARY

The people of La Laguna Region of Mexico are highly dependent on the irrigated agriculture of the region. The magnitude of irrigation has increased in recent times to the point that water tables are lowering and that soil properties are actually being affected. The main objective of this paper was to analyze the evolution of irrigation in La Laguna Region and locate the irrigation areas throughout time in order to be a reference for future research about soil property changes with the irrigation practice in the region. Old books, maps, articles, personal interviews, historic museums and libraries of La Laguna Region, and records of Mexican government institutions were investigated. Also, a geographic information system was used to locate the irrigation areas throughout time from old maps. The history analysis of the region reveals that there were four periods important to the evolution of irrigated agriculture: The big Latifundios Period (1700 to 1825) when the entire Laguna Region was used for grazing and livestock activities; the Hacienda Period (1840 to 1910) when irrigation began, grew and boomed together with cotton; the Period after the Agrarian act (1936 to 1946) when the farmers used the old and deficient irrigation infrastructure; and finally the Modernization Period (1950 to 1975) when important hydraulic structures were made for improving the irrigation system of today.

*Index words:* geographic information system, prehistoric period, latifundio period, livestock period, hacienda period, modernization period.

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-CENID-RASPA. km 6.5 Margen Derecha Canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango, México. † Autor responsable (inzunza.marco@inifap.gob.mx)

<sup>2</sup>New Mexico State University, Dept. of Agronomy and Horticulture. Box 3Q, Las Cruces, NM, USA. (cmonger@nmsu.edu)

Recibido: Julio de 2003. Aceptado: Diciembre de 2004.  
Publicado como ensayo en *Terra Latinoamericana* 23: 363-370.

### RESUMEN

Los habitantes de la Región Lagunera son altamente dependientes de la agricultura de riego de esta región. La magnitud de dicha práctica de riego se ha incrementado en los últimos años de tal forma que la profundidad del acuífero ha disminuido y las propiedades del suelo han cambiado. El objetivo principal de este trabajo fue analizar la evolución de la irrigación en la Región Lagunera y localizar las áreas de riego a través del tiempo con el fin que sea una referencia para futuras investigaciones acerca del cambio de las propiedades del suelo debido al uso de la irrigación en la región. Para esto, se realizó una investigación en libros antiguos, mapas, artículos, entrevistas personales, museos históricos y librerías de la Región Lagunera, así como en registros gubernamentales. Además, se utilizó un sistema de información geográfica con el objetivo de integrar la información y localizar las áreas de riego a través del tiempo. El análisis histórico de la región revela que hubo cuatro periodos importantes en la evolución de la agricultura de riego: el periodo de los grandes latifundios (1700 a 1825) cuando toda la Laguna fue usada para actividades de pastoreo; el periodo de Las Haciendas (1840 a 1910) con el inicio de la irrigación y el esplendor algodonerero; el periodo después del Reparto Agrario (1936 a 1946) cuando los agricultores todavía usaban la antigua infraestructura hidráulica; y, finalmente, el periodo de Modernización (1950 a 1975) cuando se construyeron importantes estructuras hidráulicas para mejorar el sistema de irrigación.

*Palabras clave:* sistema de información geográfica, periodo prehistórico, periodo del latifundio, periodo de agostadero, periodo de la hacienda y periodo de la modernización.

### INTRODUCTION

One of the most important soil uses by man has been agriculture. Since ancient times, nomadic people

have tried to find places near rivers with good land to produce food where they could settle. It is believed that the first farm began nine to ten thousand years ago (Vargas, 1997).

With increased population better techniques to improve crop yield have been necessary. With this goal, irrigation was probably introduced by ancient civilizations. It is thought that irrigation and agriculture began at approximately the same time to increase food production. The use of irrigation was first reported on the flood plains of the Nile, Euphrates, and Tigris river valleys. Other independent agricultural places appeared later in Middle America, in West Africa, and in Southeast Asia between Malaysia and the east coast of India (Dunigan, 1969). In Mexico, La Laguna Region has been an important irrigation center in the north from the middle nineteenth century until today. The main objective of this work was to analyze the irrigation evolution in La Laguna Region to understand the contemporaneous irrigation management and to make better decisions in order to improve the current irrigations system. Also, irrigation areas were located throughout time for future studies about how soil properties have been affected by irrigation practices in the region. Then, this paper describes the history of irrigation in La Laguna Region. It begins with prehistoric inhabitants, then discusses the first and large estates, the Latifundio. It then describes the irrigation areas of the Haciendas Period and the Land Distribution Act (Reparto Agrario). Next, it is followed by a discussion of the Rehabilitation when irrigation practices improved and agricultural areas increased.

## MATERIALS AND METHODS

### Study Area, La Laguna Region

La Laguna Region is situated in the southeastern part of Coahuila and in the northwestern part of Durango states in Mexico. The geographical position lies between 102° 22' and 104° 47' W and 24° 22' and 26° 23' N. The mean altitude of La Laguna Region is 1139 meters. The topography of the region is generally flat with slight slopes that range from 0.20 to 1.0 m km<sup>-1</sup> mostly located in the north and northeastern directions. La Laguna Region has a total area of 4 788 750 ha, of which approximately 206 243 ha could be used for agricultural activities (SAGARPA, 2002). Irrigation waters are supplied by regional dams and groundwater wells.

## Research Methodology

The research strategy was to investigate in old books, maps, and articles, libraries and the historic museum of La Laguna Region. Also, personal interviews and records of Mexican government institutions were investigated. A geographic information systems (ARC VIEW) was used to integrate the information and geographically locate the irrigated areas through time using digitized old maps with the superposition technique.

## RESULTS AND DISCUSSION

In order to answer how the irrigated areas were originated and to locate the irrigation areas throughout time, the discussion was divided in three periods: the Pre Hispanic Era, the Latifundio Epoch, and the Hacienda Period.

### Lagunero Indians and Pre Hispanic Land Use

The most important and ancient information source about the pre Hispanic natives of La Laguna Region is the Litterate Annuaes or Annuas written by the Jesuit missionaries (Decorme, 1941). The Annuas were the reports of the Jesuit missionaries who annually wrote in their assigned missions. Thus, historians took the Annuas as their basis to research the pre Hispanic history for La Laguna Region. In this way, Robles (1938) cited the Annuas of 1595 and 1596 to deduce that the first contact of the inhabitants of La Laguna Region could have occurred during these years. The author explained that it was not possible to establish foundations in this area due to the extreme barbarian behavior of the natives. The Annuas indicated that the Lagunero indians did not built huts, they were not polite persons, they did not use clothes, did not cultivate domestic plants and they got food from fishing, hunting and root collecting.

Martinez (1995) cited that the 1595 and 1596 Annuas reported that the Lagunero natives did not cultivate. In a similar way, the Annua of 1598 reported that the natives did not practice agriculture since they obtained enough food from hunting and fishing. The Missionaries found they preferred to live in mountain caves, live off the land, and enjoy an existence of food without work. Thus, the author concluded that the pre Hispanic era did not show evidence that Lagunero natives practiced a formal agriculture.

### Land Use Development during Latifundio Epoch

The Lagunero natives almost disappeared during the latter part of the seventeenth century. The main factors were the diseases brought into the American continent and later transmitted by the Europeans, the frequent incursions and attacks of barbarian indians from the North, such as Apaches, Tobosos, and Conchos, the hard work imposed to them in regional mines, and the plagues and extended droughts that diminished their population (Martinez, 1954; Mota y Escobar, 1993; Guerra, 1996).

The disappearance of the Lagunero natives was accelerated when the Spaniards consolidated and expanded their land holdings in the region. The Spanish King Philip II granted, in 1589, a vast part of the Nueva Viscaya (actually Durango, Coahuila, Chihuahua, Sinaloa, and Sonora states) to the loyal conqueror Don Francisco de Urdiñola. He was a successful miner and was named governor of Nueva Viscaya in 1613. He joined La Laguna Region to his land properties and thus consolidated a large area of more than five million hectares by the last half of the seventeenth century (Robles, 1938). According to Dunigan (1969), this fact began the Era of the large land possessions called Latifundio (estate) that predominated in the North of Mexico in the years to follow. Of the Latifundios formed in Coahuila and Durango states, three were the most important due to their enormous territories constituted, the Latifundio of the Marques de Aguayo family, the Sanchez Navarro Latifundio, and the Compañía de Jesus Latifundio. La Laguna Region was enclosed in the southern part of the Marquisate of San Miguel de Aguayo and the Compañía de Jesus Latifundio.

#### Latifundio of the Marques de Aguayo

In 1682, the Urdiñola property became part of an even larger private domain this so-called estate of the Marques de Aguayo in 1682. Marques de Aguayo accumulated the biggest Latifundio in New Spain of about seven million hectares throughout the seventeenth and eighteenth centuries (Gándara, 1979). Most of La Laguna lands were included in the Marques de Aguayo estates during the period from 1717 to 1760 (Santibañes, 1992).

The purpose of Marques de Aguayo to enlarge his territory was to control the water resources of the region. His motive, once he possessed this critical resource, was to rule any settlement and land in use of

the region (Meyers, 1994). The Marques de Aguayo believed that La Laguna lands and the water acquired were fairly good for grazing. Thus, according to this criterion the extended and semiarid prairies provided potential for raising livestock but not for agricultural crops.

#### Latifundio of Sanchez Navarro Family

The Sanchez Navarro family was among the elderly of Coahuila. In 1821, this family owned about 670 thousand hectares. In 1840 descendants of Sanchez Navarro extended their Latifundio to the largest estate, not only of Mexico but also of Latin America. After buying the Latifundio of Marques de Aguayo they had already eight million hectares of land, which included those of La Laguna Region (Harris, 1975; Gándara, 1979). Like the Marques de Aguayo, the production activities of Sanchez Navarro in the lands of La Laguna Region were mainly for grazing. After Sanchez Navarro family acquired the Latifundio of Marques de Aguayo in 1843, the hacienda named "Lorenzo de la Laguna" was converted to a center of wheat production although corn was also cultivated. This hacienda included La Laguna Region.

#### Latifundio of Jesuit College of Parras

Another of the three greatest Latifundios formed in the North of Mexico was that of the Company of Christ of Parras. The Latifundio began in 1729 when the Jesuits bought Haciendas or unused lands in order to obtain money for their religious missions and educational activities. The Latifundio was situated South of Sanchez Navarro estate and its main production center was the hacienda "Santa Ana de Los Hornos" (Guerra 1932; Harris, 1975). The property reached 341 thousand ha and also included the hacienda of Jimulco, which was an important mining center. At the same time, a part of La Laguna Region of Durango was sold to Don José Vásquez Borrego. He bought 137 151 ha in 1731 which originated the Hacienda of San Juan de Casta, which is today the city of León Guzman, located in Lerdo county (Martínez, 1986). These lands were situated to the west of that of the marquisate of Aguayo and to the south of Sanchez Navarro property. This Latifundio included also places such as La Boca de Jimulco, Llanos de Ledesma, Boca de San Diego, Río Nazas, and Presidio de Mapimi (Guerra, 1932).

Finally, the remainder lands of La Laguna Region were bought in 1756 by Don Andres de Velasco y Restan. These lands were located Northwest of the Marquisate of Aguayo and formed the "Hacienda de Ramos" with a surface of 410 130 ha. This Hacienda was situated in Santa Maria del Oro county of Durango. This big Latifundio was then purchased by Don Juan N. Flores in 1836 who was one of the most important agricultural pioneers in La Laguna Region. This rich farmer increased his landholding to 1.5 million ha in La Laguna of Durango. Thus, in 1848 the lands of La Laguna Region belonged to two great Latifundios, the one of Sanchez Navarro with eight million ha and that of Don Juan N. Flores with 1.5 million ha.

#### **Hacienda Period: Development of Initial Irrigation Zones**

In 1836, Juan N. Flores started to cultivate maize and wheat in the upper part of the Nazas River in the Hacienda of San Juan de Casta. In addition, he introduced the cultivation of cotton from 1830 to 1840 using irrigation channels to draw water from the Nazas River to the more close ranches of Juan de Casta and Avilés. The cotton project was promoted in La Laguna Region by the independent government of Mexico because of the extreme scarcity of clothes for the Mexican people. In 1848, Flores estates increased its cotton production after he had established two cotton spin factories in Peñón Blanco, Durango in 1840. Juan Flores built the first irrigation works on the upper part of the Nazas River where the Haciendas of San Juan de Casta and Avilés were located. In addition, he made a little dam in his Hacienda named San Fernando that later became Lerdo city (Sotomayor, 1992).

Thus, irrigated agriculture in La Laguna Region began in the old Haciendas of Flores on the upper part of La Laguna Region. It was introduced at the same time as the development of cotton in La Laguna Region. At this time, an important cotton period was born in which both the irrigation and cotton areas were increased in equal form. Then, cotton production under irrigation began in La Laguna upper zone at several Haciendas, such as San Juan de Casta, La Loma, San Carlos, and Avilés inside Lerdo county.

#### **Origin of the Irrigation Areas in La Laguna Valley**

Approximately at the same date, in 1848, Sanchez Navarro family sold the property of San Lorenzo de

la Laguna, which occupied almost the entire western portion of the zone, from Parras to Mapimi. The area was marketed to the partnership of Don Juan I. Jiménez, from Cuencamé, Durango and Don Leonardo Zuloaga from Spain. They were convinced that, due to the yearly flooding of the Nazas and the alluvial soil with high water holding capacity, it was only necessary to build water holds through the Nazas River in order to utilize the irregular streams to obtain excellent harvests. The project was to acquire access to and control the Nazas waters. Thus, these Spaniard farmers purchased one million hectares of La Laguna Region. Most of this area, 800 thousand ha in Coahuila State and the remainder 200 thousand hectares, were located in Durango State. They had the idea to cultivate cotton just as Juan N. Flores was producing in the upper portion of La Laguna Region (Martínez, 1986). The plans of Zuloaga, Jiménez, and Flores laid the fundamental principles for the spectacular development of La Laguna into one of the wealthiest agricultural districts of Mexico (Meyers, 1994).

The lands of San Lorenzo de la Laguna were divided in 1852. The Zuloaga and Jiménez association was disintegrated because they disagreed with water usage. Zuloaga then received the lands located in Coahuila and Jiménez those of Durango. Jiménez accepted the smallest and least fertile portion of the lands in exchange for its strategic upper river location and for the Calabazas dam which had been built by Zuloaga and Jiménez in 1848. The Calabazas dam was located just below Flores dam on his Durango lands. Oppositely, Zuloaga sacrificed the higher river location in Durango. Lateron, Zuloaga constructed his own dam named "El Coyote" dam just below that of Jiménez and both Hacendados started to establish irrigation systems in order to irrigate their cotton properties (Meyers, 1994). The Zuloaga dam located in El Carrizal gave origin to the city of Torreón.

The rustic dams built on the Nazas River gestured the initiation of large scale agriculture and the definition of irrigation areas as well as the pattern of settlement and development (Dunigan, 1969). Thus, the irrigation surfaces for agriculture were strongly promoted from 1850 to 1870 by the three landholders: Leonardo Zuloaga, Juan I. Jiménez, and Juan N. Flores. They increased the cultivation areas of cotton under irrigation throughout this period. Also, the colonists established in Matamoros and San Pedro, Coahuila on grant lands given by Mexican president Juárez. All were producing cotton on irrigated lands

with water directed from the Nazas and Aguanaval Rivers.

Jiménez, owner of the irrigation lands of the Durango portion, initiated the irrigation of land surfaces after 1848 when the Calabazas dam was built. He started irrigating and cultivating the narrow flood lands immediately adjacent to the Nazas River. This landholder started irrigating the Hacienda of Santa Rosa, today the Club Campestre, and the lands of the so-called "Colonia del Campestre", located in Gómez Palacio city.

During the period from 1850 to 1880, Jiménez increased his irrigation areas significantly after he built the Santa Rosa dam. He derived irrigation water from the Nazas River to places each time farther from this river using channels and irrigation ditches. In this way, important areas under irrigation were converted into Hacienda places such as, Santa Rosa, Relampágo, Noé, and Sacramento (Martínez, 1986; Terán, 1989). The cotton production increased from a minimum of 765 metric ton cotton fiber with seed in 1852 to 9000 metric ton in 1872. This represented 1176 percent more than the harvest that year (Vargas, 1997).

Thus, the agricultural development in Lerdo county was started by Juan N. Flores. In Gómez Palacio county, the agricultural practices were initiated by Juan I. Jiménez in La Laguna of Durango. In La Laguna lands of Coahuila, Leonardo Zuloaga, the landholder, was a very important agricultural pioneer. Later on, in 1880, San Pedro lands located on a down-river-zone of Coahuila Laguna were colonized. Finally, in 1890, Tlahualilo was converted to irrigation agriculture. So, in 1895, all the irrigation lands were organized in the same manner until the "Reparto Agrario" (Agrarian grant) came in 1936 (Martínez, 1986). Juan I. Jiménez died and, in 1880, his descendants sold Jiménez property to a Spaniard named Santiago Lavín who had been Jiménez administrator of some of his Haciendas. Santiago Lavín bought a big extension of Jiménez family lands which joined then with those of Santa Rosa dam. Lavín property was named Perímetro Lavín containing almost 54 thousand ha of which 18 thousand were irrigated lands (Machuca, 1980).

#### **Expansion of Irrigation Areas under Cotton Cultivation**

After 1885, La Laguna Region had a significant agricultural development. Cotton production in this

region was enough to satisfy 90 percent of the fiber demand of the Mexican textile industries, displacing US cotton. In 1905, the "golden era" of cotton started in the region. During this period the industry was established and maintained in La Laguna until 1936. The cotton prosperity of La Laguna Region would not have been possible if an irrigation system would not have been installed. Water was an essential key for the successful agriculture in La Laguna. Thus, the landholders had to establish some water regulations. The first was celebrated in 1852 by the agricultural pioneers of La Laguna. The next water regulation was originated in 1891 when the downstream owner got in conflict for water with the Lavín upper owner and the Tlahualilo company. The water distribution problem continued and, in 1895, the Comisión Federal del Agua agreed to regulate the irrigation systems. This Commission created the Irrigation district 17, after "El Reparto Agrario", covering La Laguna Region. The first irrigation systems established in the region were realized by the three main pioneers of its agricultural development when they built their hydraulic facilities in the Nazas River. Then, in the same way, other agricultural investors created their own hydraulic constructions along the Nazas River. Thus, nine irrigation systems were founded 100 km along the river. The distribution of water to the lands, using the rustic irrigation systems, was from upper river lands to the down river lands. Therefore, water was first distributed to Juan N. Flores using the San Fernando dam, then to Lavín family with Santa Rosa dam, next to the new owners of the Zuloaga's riverside lands and Matamoros properties and, finally, water was assigned to the lands of farmers of San Pedro (Ibarrola, 1891). The irrigation system capacity consisted basically in carrying water from the river to the riverside lands of one square km each known as "Lotes". The Lotes were irrigated or flooded with water layers of more than one meter height. The cotton cultivation began when the water volume applied was infiltrated.

#### **Period after the Agrarian Act**

In this period, the expropriation of about three-fourths of the irrigable lands and one fourth of the non-irrigable usable land in La Laguna Region was decreed. Table 1 shows land distribution after expropriation. Of the 221 properties before the expropriation, 34 816 peasants and 2000 small owners were benefited.

Table 1. Distribution of La Laguna lands after "Reparto Agrario".

Type	Ejidos	Small properties
Benefited tenants	34 816	2000
Non-land tenants	2465	
Ejidos formed	296	
Distributed land		Area (ha)
Irrigable land	146 277	71 700
Eriazo	299 846	980 784
Urban zone	1392	
Total	447 515	1 052 484
Total irrigable land	217 977	

From: Hernández (1975).

This period was characterized by low irrigation efficiency using the old and rustic irrigation infrastructure, low productivity and the irrigation areas were not increased.

#### Modernization Period (1950 to 1975)

This period is considered to be the initiation of the hydraulic infrastructure works. In this period the Palmito Dam was inaugurated and La Laguna's district began its operation. The modernization was based on improving water efficiency for the Irrigation district 17. According to this goal, several actions were realized.

**Construction of the Palmito Dam.** Its operation started in 1947 and it was located 260 km from the main irrigated zone. It prevented great floods in towns and cultivated zones and helped to improve significantly the water management.

**Rehabilitation of Irrigation District 17 of La Laguna.** The principal purposes of the Rehabilitation Plan were (1) to increase the irrigation water availability, (2) to augment the irrigation areas, and (3) to practice crop diversification. The rehabilitation was initiated in 1966 and finished in 1970. During this period, the next activities were carried on (Santibañes, 1992; Meyers, 1994; Vargas, 1997).

**Construction of the Francisco Zarco Dam in the Nazas River.** This dam was built 200 km downstream from the Palmito Dam and 55 km from the San Fernando regulatory Dam. The Francisco Zarco Dam was utilized as storage water reservoir of the exceeding volumes downstream of the Palmito Dam, and so it prevented floods in the irrigation area.

**Compactness of irrigated areas of La Laguna.** The scattered cultivated areas were joined into relatively

large contiguous blocks. It was an important phase in the design to reach greater efficiency in the distribution of water through the advantage of compactness.

**Construction of an entirely new canal system.** The plan involved building new main hydraulic and secondary canals network. The canals network was covered with concrete to avoid water losses by infiltration. The canals were dug in a simplified and quite compact way in contrast to the roving network of canals of the old irrigation system.

**Leveling of the irrigated areas.** The rehabilitation plan considered leveling of unscattered areas to improve water application efficiency in the parcels.

#### CONCLUSIONS

The evolution of land use in La Laguna Region can be divided in three general periods. First, the unadulterated and native ecosystem that existed before the arrival of Spaniard in 1595. Second, the grazing activity realized by the big landholders from the last half of the seventeenth century to the early nineteenth century. Third, the agricultural activities that began utilizing irrigation after 1836. The evolution of the irrigation areas through time in La Laguna Region before the 1936 Land Grant Act, is illustrated in Figure 1. The first irrigation areas were established in San Juan de Casta Plantation in approximately 1836. This area is situated in the Upper Nazas River zone close to León Guzmán city in the Irrigation Module III of San Jacinto in Lerdo county. Close to San Juan de Casta irrigated areas were created in the Haciendas of Avilés, La Loma, San Carlos, and San Fernando in Lerdo county from approximately 1836 to 1840. The next irrigated areas were incorporated from approximately 1848 to 1850 and were situated in the Santa Rosa Hacienda, southwest of Gómez Palacio city and in the Hacienda del Torreón, today northwest part of Torreón city (Figure 1). From 1850 to 1870 areas situated in the Relámpago, Noé, and Santa Cruz Haciendas on the left-hand side of the Nazas River in Durango were opened to irrigation. In the same time period irrigated areas were established in the Haciendas of Sacramento, El Pilar, Dolores, Santa Lucia, Bilbao, Concordia, San Francisco, and San Ignacio on the left side of the Nazas River in Coahuila. Also, on the right side of the Nazas River irrigation areas were established in the Haciendas of San Antonio del Coyote and La Concepción situated in Coahuila State. Similarly, in approximately 1862

and during this period, irrigation lands were established in the Matamoras area using water from the Aguanaval River in the southern portion of La Laguna Region. Lateron, from 1880 to 1890, the lands located in the lower Nazas River zone were opened to irrigation (Figure 1). The irrigation areas were situated

in the Haciendas of San Pablo, San Antonio del Norte, and Bolivar situated on the left side of the Nazas River and San Jose de los Alamos on the right side. The last irrigation properties that opened to irrigation practices were established in Tlahualilo county approximately in 1895 (Figure 1).

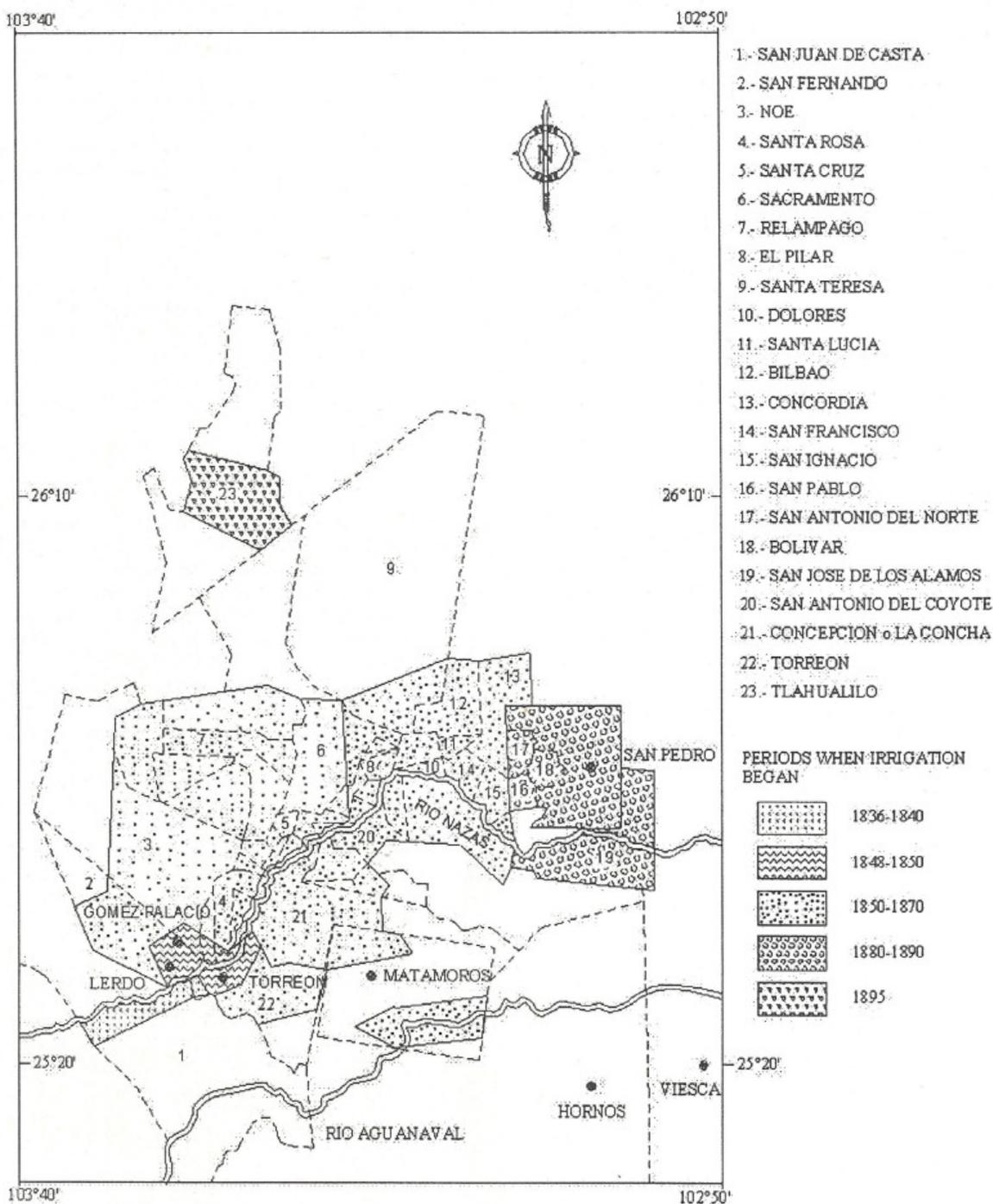


Figure 1. Evolution of the irrigation areas before 1900 in La Laguna Region.

The irrigation areas did not change significantly after the Land Grant Act in 1936. However, this important change concerned land tenure, more than expansion or relocation of irrigated areas. The 221 agricultural properties were distributed to 34 816 tenants and 2000 small landowners in 1936. The consolidation of the irrigation areas in 1970 was another important event in the evolution of the irrigation areas in La Laguna Region. The compacted areas resulting from the rehabilitation of Irrigation District 17 are the definitive irrigation areas of today. The irrigated areas vary on a year-to-year basis depending on the water availability having an annual average of 90 thousand ha irrigated with an average of 1250 million m<sup>3</sup> of the Nazas River water, and approximately 12 thousand ha irrigated with an average of 12 million m<sup>3</sup> of the Aguanaval River water. Today, an annual average of 70 thousand ha are irrigated with approximately 1000 million m<sup>3</sup> supplied from the groundwater of La Laguna aquifers.

#### LITERATURA CITADA

- Decorme, G. 1941. La obra de los Jesuitas Mexicanos, durante la época colonial. Tomo II. Las Misiones. Porrúa e Hijos. México D.F.
- Dunigan, C.J. 1969. Information dissemination and regional development through urban linkages in the Laguna Region of Mexico. Geography Department University of Tennessee. Knoxville, TN.
- Gándara-Mendoza, L. 1979. La formación de las Haciendas en la Comarca Lagunera: 1538-1850. Cuadernos de la Casa Chata # 18. México, D.F.
- Guerra, E. 1932. Torreón, su origen y sus fundadores. Fondo Editorial Lagunero. Torreón, Coahuila, México.
- Guerra, E. 1996. Historia de La Laguna. Tercera edición. Editorial del Norte Mexicano. Torreón, Coahuila, México.
- Harris, H.C. 1975. A Mexican Family Empire. The Latifundio of Sánchez Navarro 1765-1867. University of Texas, Austin, TX.
- Hernández, A.P. 1975. ¿La explotación colectiva en la Comarca Lagunera es un fracaso? B. Costa-Amic Editor. México, D.F.
- Ibarrola De, J.R. 1891. Distribución de las Aguas del Río Nazas. Documentos adicionales. Secretaría de Fomento. México, D.F.
- Machuca-Macias, P. 1980. Ensayo sobre la fundación de la ciudad de Gómez Palacio. Segunda versión. Industria Gráfica, Editorial Mexicana. México, D.F.
- Martínez-Del Río, P. 1954. La Comarca Lagunera a fines del Siglo XVI y principios del XVII según las fuentes escritas. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Historia. México, D.F.
- Martínez-Gómez, R. 1995. Santa Anna de los Hornos y la Flor de Jiménez. Dos Haciendas Laguneras. Ediciones Cardenche. Torreón, Coahuila, México.
- Martínez-Saldaña, T. 1986. 100 años de producción agrícola, 50 años de reforma agraria en la Comarca Lagunera. 1936-1986. Cincuentenario de la Reforma Agraria en la Comarca Lagunera 1936-1986. Editorial del Norte Mexicano. Torreón, Coahuila, México.
- Meyers, W.K. 1994. Forge of progress, crucible of revolt. The origins of the Mexican Revolution in La Comarca Lagunera, 1880-1911. University of New Mexico Press. Albuquerque, NM.
- Mota y Escobar, A. 1993. Descripción geográfica de los reinos de Nueva Galicia, Nueva Vizcaya y Nuevo León. Instituto Jalisciense de Antropología e Historia. Colección de obras Facsimilares. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.
- Robles-Vito, A. 1938. Coahuila y Texas en la época Colonial, Porrúa. México, D.F.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2002. Anuario estadístico de la producción agropecuaria. Delegación en la Región Lagunera Durango-Coahuila. Lerdo, Durango, México.
- Santibáñez-García, E. 1992. La Comarca Lagunera. Ensayo monográfico. Tipográfica Reza, S.A. Torreón Coahuila, México.
- Sotomayor-Garza, J. 1992. Anales Laguneros. Editorial del Norte Mexicano. Torreón, Coahuila, México.
- Terán-Lira, M. 1989. Historia de Torreón. Tercera edición. Editorial Macondo. Torreón, Coahuila, México.
- Vargas-Gutiérrez, J.J. 1997. San Juan de Casta 400 Años. Lerdo 104 años de esperanza. 1598-1998. Proyecto PACMYC 1997. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. Culturas Populares. Unidad Regional Durango. Cd. Lerdo, Durango, México.

# CULTIVO DE MAÍZ EN SISTEMAS DE LABRANZA CON BARRERAS BIOFÍSICAS EN ANDOSOLES DE LADERA

## Maize Crop in Tillage Systems with Biophysical Barriers in Cultivated Steep-slope Andosols

Miguel Bravo-Espinosa<sup>1</sup>\*, Jaime Ruiz-Vega<sup>2</sup> y Víctor Volke-Haller<sup>3</sup>

### RESUMEN

En México, la agricultura de ladera abarca una superficie importante cuyos suelos, al ser cultivados sin prácticas de conservación, están sujetos a una degradación moderada o severa por erosión hídrica. Esto resulta en la disminución de la productividad de la parcela, su abandono y, finalmente, el aumento de la pobreza y la emigración del productor. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta del suelo y del cultivo de maíz a dos sistemas de labranza y tres tipos de barreras biofísicas en un Andosol de 18% de pendiente de la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán. Los sistemas de labranza fueron: labranza tradicional (Lt) y labranza de conservación (Lc), y las barreras fueron: sin barrera, con barrera de zarzamora (Bz) y barrera de zarzamora más llantas de desecho (Bnz), que se combinaron en un factorial 2 x 3 sin repeticiones. Los tratamientos se evaluaron en dos ciclos del cultivo de maíz, 2000 y 2001, con lluvia natural y con lluvia simulada de 90 mm h<sup>-1</sup> durante 60 min. El agua disponible en la capa superficial del suelo con Lc fue mayor que con Lt en los períodos más secos del año. En promedio, la tasa de infiltración final para los sistemas Lt y Lc, ambos con barreras, fue de 49 y 74 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente. El escurrimiento disminuyó en 50% cuando Lt se complementó con barreras, pero la reducción fue de 80% cuando las barreras acompañaron a Lc. El efecto de Lt en reducir la erosión sólo fue comparable con Lc cuando se acompañó de Bnz. El sistema Lt

complementado con barreras incrementó el rendimiento de grano de maíz en 0.5 t ha<sup>-1</sup>.

*Palabras clave:* Zirahuén, erosión, zarzamora, llantas de desecho, lluvia artificial.

### SUMMARY

In Mexico, hillside agriculture covers a large area in which soils are affected by water-erosion processes that cause degradation from moderate to severe due to lack of soil conservation practices. As a result, soil productivity decreases, farmers abandon their land and, finally, poverty and rural migration are increased. The objective of this research was to evaluate soil and maize crop responses to two tillage systems combined with three types of biophysical barriers on an Andosol on a hillside with an 18 per cent slope in the Zirahuén Lake basin. The tillage systems were traditional tillage (Lt) and conservation tillage (Lc), and the barriers were no barriers, blackberry hedge (Bz), and blackberry hedge accompanied with a worn-out-tire (Bnz) barriers that were combined in a 2 x 3 factorial design. Treatment evaluations were done during the rainy seasons of 2000 and 2001; moreover, they were evaluated under artificial 60 min rainfall at 90 mm h<sup>-1</sup> intensity on dry soil. The average water content in the upper soil layer under Lc was higher than that in those soils under Lt during the driest periods of the year. The average final-infiltration-rate for soils under Lt with barriers and Lc with barriers was 49 and 74 mm h<sup>-1</sup>, respectively. Runoff decreased 50 per cent when barriers were added to Lt, and it decreased 80 per cent on soils under Lc. The effect of blackberry barriers on soils under Lt was comparable to that on Lc only when old tires were added to the barriers. Barriers under Lt produced an increase in corn yield of 0.5 t ha<sup>-1</sup>.

*Index words:* Zirahuén, brambleberry, rejected-old-tire, artificial rainfall.

<sup>1</sup> Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Producción Sostenible-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apdo. Postal 7-116, 58260 Morelia, Michoacán, México.

\* Autor responsable ([bravo\\_miguel@infoscl.net.mx](mailto:bravo_miguel@infoscl.net.mx)).

<sup>2</sup> Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Instituto Politécnico Nacional, Campus Oaxaca.

<sup>3</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México.

## INTRODUCCIÓN

La pobreza de millones de personas del medio rural obliga a trabajar tierras de ladera. La explotación de estas tierras en general se hace sin consideraciones sobre la conservación del suelo y agua, con el resultado de que están sujetas a una degradación permanente por erosión hídrica, con sus consecuencias sobre la productividad, disminución de la recarga de acuíferos y azolvamiento de cuerpos de agua (World Resources Institute, 2000). En México, más de 60% de la superficie cultivable presenta pendientes mayores que 4% y sus poseedores están experimentando los efectos de la degradación (Turrent-Fernández *et al.*, 1998).

En las cuencas de los lagos de Pátzcuaro y Zirahuén, Michoacán, los ambientes de sierra y lomeríos abarcan más de 60% de la cuenca. En estos escenarios se practica el sistema de manejo denominado *año y vez*, que consiste en cultivar la tierra con arado un año, dejándola después para el pastoreo de ganado durante uno a tres años (Astier *et al.*, 2000). En la cuenca del lago de Pátzcuaro, en el sistema de *año y vez* se pierden más de 3 t ha<sup>-1</sup> de suelo y la productividad es menor que 1.8 t ha<sup>-1</sup> de grano de maíz, lo cual refleja el deterioro y la baja rentabilidad del sistema (Tiscareño-López *et al.*, 1999). Como medidas de control de la erosión, en las cuencas mencionadas, se han promovido diferentes tipos de terrazas y la labranza de conservación. Las terrazas reducen las pérdidas de suelo y el escurrimiento, sin embargo, su construcción y operación son costosas, quizá por ello, esta práctica tuvo una baja adopción cuando se promovió su construcción en la década de los ochenta. En los sistemas de labranza se ha demostrado su efectividad para reducir las pérdidas de suelo y el escurrimiento en suelos con pendiente menor que 8% (Tiscareño-López *et al.*, 1999). Pero, es escasa la información para suelos con pendientes mayores que 10%. Además, es cuestionable su adopción por productores que carecen de residuos para alimentación del ganado y para cobertura del suelo.

Una opción a lo anterior son las barreras biofísicas, las cuales son sistemas agroforestales que integran arbustos, pastos y materiales inertes con cultivos anuales, aumentando con ello la diversificación y el acercamiento a la sostenibilidad. Las barreras reducen las pérdidas de suelo y el escurrimiento, y favorecen la formación natural de terrazas y la fertilidad del suelo (McDonald *et al.*,

1997; Gilley *et al.*, 2000). Como barreras se han utilizado pastos, arbustos y árboles con beneficios en forraje, leña y frutos (Kiepe, 1996; Angima *et al.*, 2000). No existen reportes sobre el uso de barreras de zarzamora (*Rubus* sp.), tampoco sobre el uso de llantas de desecho como barreras, pero sí existen referencias sobre el uso de llantas para el control de cárcavas (Sparovek *et al.*, 2001). La reutilización de llantas de desecho es un problema en los centros urbanos y es necesario buscar alternativas de uso ambientalmente adecuadas. La potencialidad de barreras biofísicas en combinación con sistemas de labranza se ha escasamente investigado en las áreas de ladera de México (Uribe-Gómez *et al.*, 2000; Ruiz-Vega *et al.*, 2001).

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la respuesta del suelo (contenido de humedad, infiltración, escurrimiento y pérdidas de suelo) y del cultivo de maíz (rendimiento de grano y rastrojo) establecido con dos sistemas de labranza con y sin barreras como complemento, en un Andosol de ladera de la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del lago de Zirahuén se ubica en el Estado de Michoacán entre 19° 21' 14" y 19° 29' 32" N y entre 101° 30' 33" y 101° 46' 15" O, y cubre una superficie de 260 km<sup>2</sup>. La altitud fluctúa de 2075 a 3000 m y las pendientes de 4 a 40% con un valor medio de 11% (Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000). El clima es templado subhúmedo; presenta una temperatura media anual de 16.1 °C y una precipitación media anual de 1000 mm, distribuida de junio a noviembre. Predomina el bosque de pino-encino. La unidad Andosol, del sistema FAO-UNESCO (1990), abarca 82% de los suelos en la cuenca. La agricultura se basa en el cultivo de maíz, que, en 1991, ocupó 17 000 ha (INEGI, 1994) y se siembra con el sistema de *año y vez*.

El sitio experimental se ubicó en un Andosol con 18% de pendiente, el cual se caracterizó con 20 muestras colectadas en 10 000 m<sup>2</sup>, para formar cinco muestras compuestas de la capa superficial (0 a 15 cm); en éstas se determinó la textura (método de la pipeta), materia orgánica (Walkley y Black), y constantes de humedad (olla y membrana de presión). A fines de 1999, se instalaron seis lotes de escurrimiento de 5 x 20 m sin repeticiones, ubicados en el sentido de la pendiente, para establecer los siguientes tratamientos:

Sistema de labranza	Barrera biofísica
Tradicional (Lt)	Sin barrera Zarzamora con filtro de sedimentos (Bz) Zarzamora y llantas de desecho (Bnz)
De conservación (Lc)	Sin barrera Zarzamora con filtro de sedimentos (Bz) Zarzamora y llantas de desecho (Bnz)

La Lt consistió de barbecho, rastreo, surcado y dos labores de cultivo; en Lc, 33% de la superficie del suelo estuvo cubierta con residuos de maíz e incluyó un rastreo y la siembra con pala sin formar surcos. El porcentaje de cobertura se estimó con cuadrantes de 1 m<sup>2</sup>, considerando que 3.0 t ha<sup>-1</sup> de rastrojo ofrecen una cobertura de 33% (J. Velásquez, 2000. Comunicación personal). En cada lote, se establecieron dos barreras, al inicio del lote y en su parte media; es decir, a una separación de 10 m, para un espaciamiento vertical de 1.7 m; sus dimensiones fueron de 5 m de largo y 0.8 m de ancho. La barrera de zarzamora se formó con dos hileras de plantas a una separación de 0.2 m, siguiendo una distribución tipo tres bolillo. En la base superior de la barrera, se aplicaron residuos de las podas y rastrojo de maíz como filtros de sedimento. La barrera de llantas de desecho y zarzamora se formó con dos hileras de llantas, una sobre la otra; cada llanta de la hilera superior se colocó sobre dos llantas de la hilera inferior. En cada unión de dos llantas se establecieron dos plantas de zarzamora. Durante los ciclos de cultivo 2000 y 2001, los seis lotes se sembraron con maíz criollo. La siembra se realizó en la última semana de abril, con humedad residual, utilizando 25 kg ha<sup>-1</sup> de semilla para establecer 50 mil plantas. Se fertilizó con la dosis 120-90 en tres oportunidades: un tercio del N y todo el P en la siembra, un tercio del N 40 días después de la siembra y el resto 30 días después de la segunda aplicación. El control de la maleza en las parcelas con Lc se realizó con una aplicación postemergente de Gesaprim Combi (3.0 L ha<sup>-1</sup>). La cosecha se efectuó entre diciembre y la primera semana de enero.

Se midió el efecto de los tratamientos sobre el agua disponible en el suelo, escurrimiento, pérdidas de suelo, y rendimiento de grano y rastrojo. El agua disponible en el suelo, expresada en lámina de agua,

se calculó como la diferencia entre el contenido de la humedad presente en la fecha de muestreo y el punto de marchitez permanente (PMP). Estas determinaciones se realizaron durante el ciclo de cultivo 2001 sólo para cuatro tratamientos. La medición del escurrimiento se obtuvo a partir del volumen de la escorrentía para cada evento de lluvia; las pérdidas de suelo se calcularon como el producto de la concentración de sedimentos en muestras colectadas de 1000 mL y el volumen del escurrimiento medido.

En adición, en enero de 2002, después de la cosecha del maíz, en los seis lotes se delimitó una subparcela de 1 m de ancho por 3 m de largo, incluyendo la barrera, cuando así correspondió. La longitud máxima de cada subparcela se ubicó en el sentido de la pendiente. En éstas se estudió el efecto de la lluvia, a través de simulación de lluvia, sobre infiltración, escurrimiento, pérdidas de suelo y características del sedimento transportado. Las pruebas se realizaron con un simulador de lluvia similar al descrito por Miller (1987), sólo en la condición de suelo seco, con corridas de 60 min aplicando intensidades de alrededor de 90 mm h<sup>-1</sup>. Estas condiciones se basaron en el conocimiento de que la corrida en seco es de primordial importancia para obtener información sobre infiltración y escurrimiento (Cook y Stubbendieck, 1986).

El tratamiento que se le dio al suelo, antes de cada prueba, fue realizar un barbecho en las subparcelas con Lt y un rastreo en las con Lc. Además, en éstas últimas se aplicaron residuos de maíz para obtener una cobertura de 33% de la superficie, según el procedimiento señalado anteriormente. No se realizaron repeticiones de las simulaciones debido a que cada corrida consistió de 12 mediciones de 5 min en cada tratamiento y para minimizar el disturbio en los lotes de escurrimiento. La escorrentía producida en las distintas pruebas se colectó a intervalos de 5 min en recipientes calibrados. De estas muestras, se tomaron alícuotas de 1000 mL para determinar la concentración de sedimentos y la distribución de tamaño de partículas; esta última se determinó por el método de la pipeta (Gee y Bauder, 1986). Esta determinación no se realizó con los sedimentos obtenidos en los experimentos con lluvia natural. Las tasas de infiltración inicial y final se obtuvieron según el procedimiento descrito por Simanton y Renard (1992).

Cuadro 1. Características de la capa superficial del suelo en la zona de estudio.

Profundidad cm	Arena	Arcilla	Limo	DA <sup>1</sup>	MO <sup>2</sup>	CC <sup>3</sup>	PMP <sup>4</sup>
	----- % -----			g cm <sup>-3</sup>	----- % -----		
0 a 15	48.7	12.2	39.1	0.71	1.74	60.3	33.8

<sup>1</sup>DA= densidad aparente, <sup>2</sup>MO= materia orgánica, <sup>3</sup>CC= capacidad de campo, <sup>4</sup>PMP= punto de marchitez permanente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características del suelo en el sitio experimental se presentan en el Cuadro 1. El bajo contenido de arcilla y de materia orgánica, posiblemente fue ocasionado por el arrastre selectivo de partículas finas por el escurrimiento a través de los años.

El período de lluvia para los años 2000 y 2001 fue de mayo a octubre; en la Figura 1, se presenta la distribución mensual en dicho período, comparada con la media mensual para 1948-2000. Con excepción del mes de junio de 2000, la lluvia mensual durante los dos años de estudio fue menor que la media mensual del período de 47 años.

Durante la temporada de lluvias de 2000, se acumularon 856 mm provenientes de 59 eventos, de los cuales en 28 se registraron precipitaciones mayores que 10 mm, y la máxima precipitación por evento fue de 33.7 mm. En 2001, hubo 65 eventos, que acumularon 821 mm, de los cuales 32 fueron mayores que 10 mm, y el mayor evento precipitó 48.1 mm.

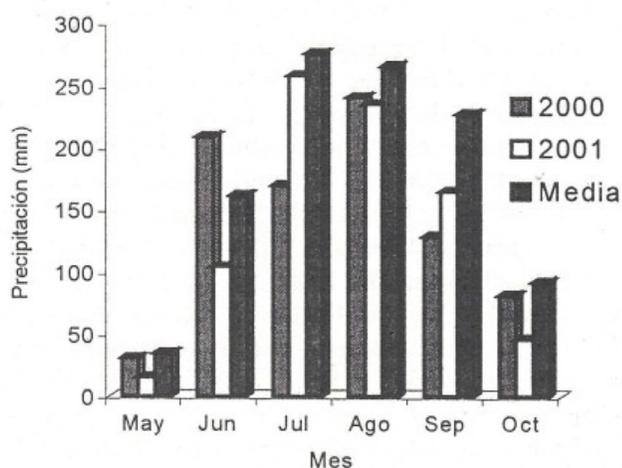


Figura 1. Distribución de la precipitación mensual durante la estación húmeda.

## Agua Disponible en el Suelo

En la Figura 2, se observa la influencia de los tratamientos sobre el agua disponible en el suelo durante 2001. El efecto de los tratamientos se aprecia, principalmente, en la capa superficial y en los períodos más secos, al inicio y al final del año, cuando la cantidad de agua aumentó de 5 a 10% con el sistema de Lc y barreras biofísicas. Pero las diferencias disminuyeron con la profundidad del suelo. Al parecer, en la capa superficial del suelo con los tratamientos Lt y LtBz ocurrieron mayores cambios en la disponibilidad de agua debido a la temperatura, evaporación, absorción de agua y a otros procesos que crearon condiciones de marchitez permanente durante períodos más prolongados con relación a los tratamientos Lc y LcBz. Según Jury *et al.* (1991), la máxima tasa de evaporación se alcanza con tensiones relativamente bajas ( $h \sim -1000$  cm) en la capa superficial. Probablemente, la cubierta de rastrojo, presente en Lc y LcBz, redujo el efecto de la influencia externa. El PMP no se alcanzó en las capas de 6 a 12 cm y de 12 a 20 cm durante el período de estudio.

## Infiltración

Las tasas de infiltración inicial y final para los tratamientos evaluados con lluvia simulada se presentan en el Cuadro 2. Estos resultados indican que las mayores velocidades de infiltración ocurrieron con Lc con y sin barreras; también muestra que la combinación de llantas de desecho más zarzamora propiciaron mayores tasas de infiltración final en ambos sistemas de labranza. La barrera de zarzamora indujo un menor efecto porque no formó una estructura densa en la parte inferior, cercana al suelo, que propicie un encharcamiento prolongado. En los tratamientos Lt sin barrera y con barrera de zarzamora ocurrieron las menores tasas de infiltración.

En los tratamientos con Lc, la cubierta de rastrojo afectó la relación escurrimiento-infiltración. Al evitar el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo,

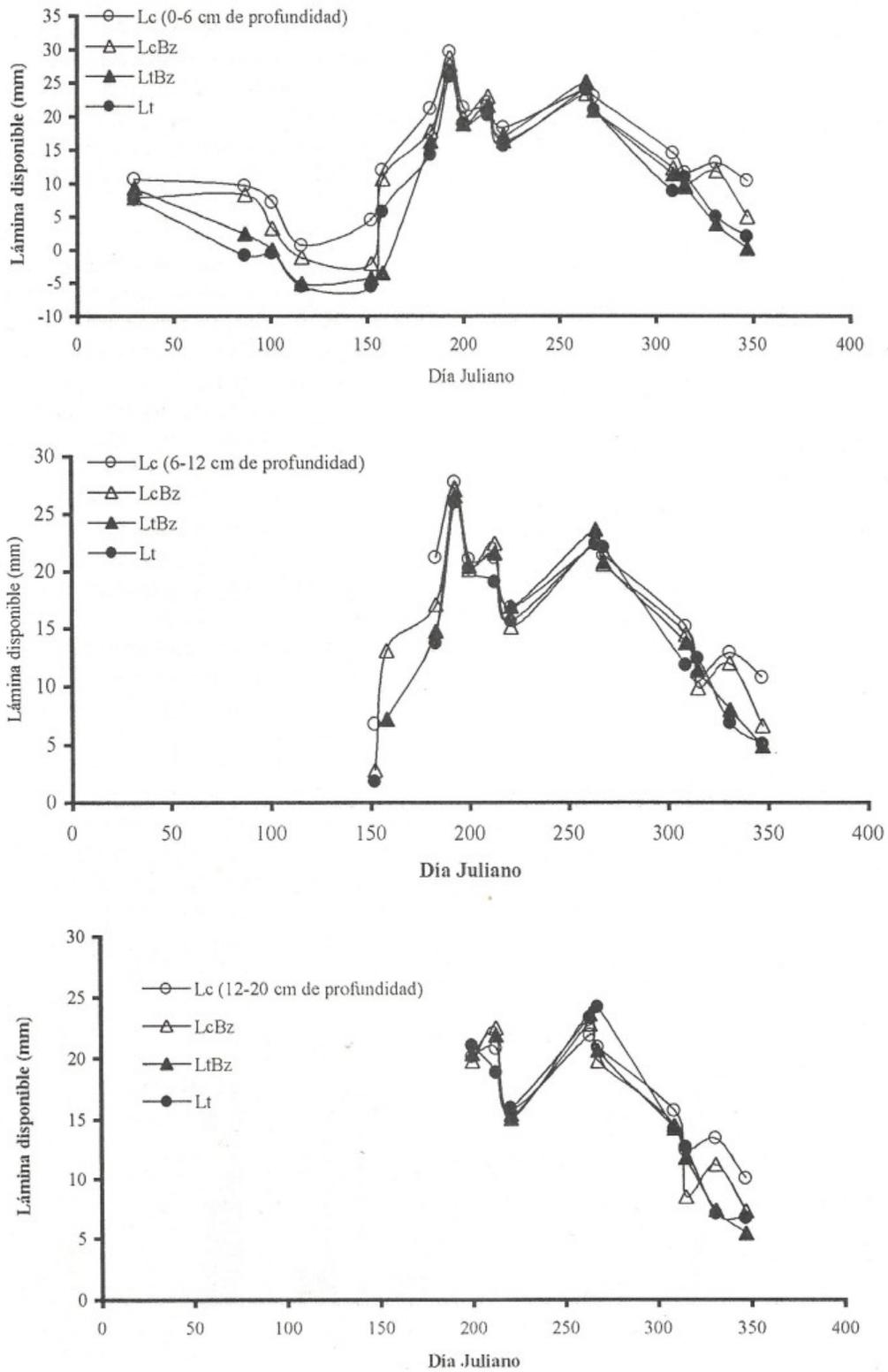


Figura 2. Efecto de cuatro tratamientos sobre la lámina de agua disponible en el suelo durante el ciclo 2001.

**Cuadro 2. Tasas de infiltración inicial y final registradas en los tratamientos con lluvia simulada.**

Tasa de infiltración	Lt <sup>†</sup>	LtBz	LtBnz	Lc	LcBz	LcBnz
Inicial, mm h <sup>-1</sup>	59.0	66.4	81.6	83.1	83.6	88.3
Final, mm h <sup>-1</sup>	22.7	36.5	62.8	57.3	65.0	84.5

<sup>†</sup> Lt = labranza tradicional, Bz = con barrera de zarzamora, Bnz = barrera de zarzamora más llantas de desecho, Lc = labranza de conservación.

la cubierta previno el sellamiento de la superficie del suelo, por lo tanto, hubo un efecto positivo sobre la infiltración y negativo sobre el escurrimiento. En este caso, la magnitud del efecto sobre el escurrimiento se aumentó por la barrera de llantas más zarzamora al crearse en la barrera una zona de almacenamiento temporal de agua. Estos resultados sugieren que los manejos del suelo que propiciaron un encharcamiento por efecto de los residuos aplicados al suelo en los tratamientos con Lc, barreras compactas o ambos, también presentaron mayores tasas de infiltración que aquellos manejos que no crearon en la superficie, o en la zona de la barrera, una resistencia hidráulica al escurrimiento.

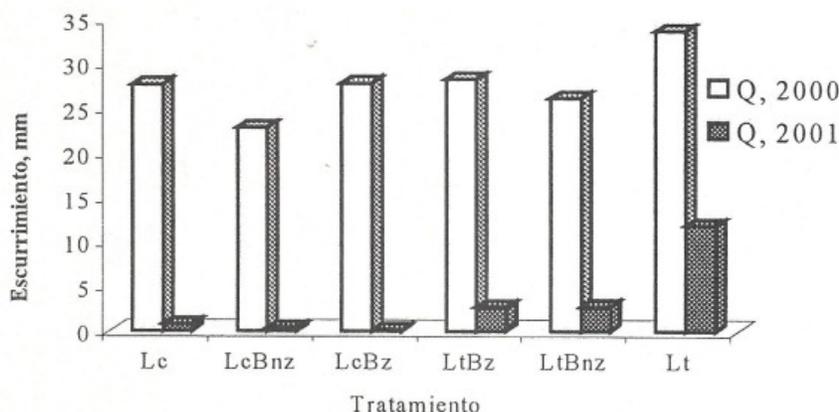
### Escurrimiento Superficial

En la Figura 3, se muestra la producción de escurrimiento en los tratamientos con lluvia natural la cual ocurrió principalmente durante los meses de julio y agosto. En el ciclo de temporal 2000, se aprecia que en las parcelas con Lt produjo un escurrimiento de 33.7 mm, mientras que en aquellas con Lc fue de 27.7 mm. En general, durante el primer año, el escurrimiento fue mayor en 20% en el tratamiento

de Lt, con respecto al resto de tratamientos. En 2001, la respuesta fue más clara, probablemente por el mayor desarrollo de las barreras de zarzamora. El mayor escurrimiento nuevamente se produjo con Lt. En promedio, la barrera redujo en 75% el escurrimiento con Lt, mientras que con Lc fue de más de 90%. Es importante mencionar que durante los ciclos 2000 y 2001, las intensidades de lluvia fueron menores que 40 mm h<sup>-1</sup>.

En la Figura 4, se muestra la respuesta hidrológica del suelo, con los diferentes tratamientos, a la lluvia simulada durante enero de 2002. En trabajos de simulación de lluvia, en especial cuando se usan altas intensidades de lluvia, la generación del escurrimiento es predominantemente de tipo Hortoniano, el cual se produce en la superficie del suelo cuando la intensidad de la lluvia excede a la capacidad de infiltración. Como los procesos de infiltración y escurrimiento ocurren simultáneamente, durante y después de un evento de lluvia, el manejo del suelo que favorece a un proceso afecta, en consecuencia, al otro proceso. Phillips (1992) ha documentado ampliamente estas relaciones.

En este caso, los tratamientos Lt y LtBz mostraron las mayores tasas de escurrimiento debido a que Lt y la barrera de zarzamora no favorecieron altas tasas de infiltración final, mientras que el manejo del suelo con barrera de llantas más zarzamora aumentó la infiltración y, por lo tanto, redujo la escorrentia en más de 90% cuando se complementó con Lc. Con LtBnz, el escurrimiento disminuyó en 70% aun cuando sólo se favoreció su infiltración en el área de la barrera. Es muy probable que, en los tratamientos con cubierta de rastrojo, una porción de la lluvia



**Figura 3. Efecto de los sistemas de labranza y barreras biofísicas sobre el escurrimiento en condiciones de lluvia natural.**

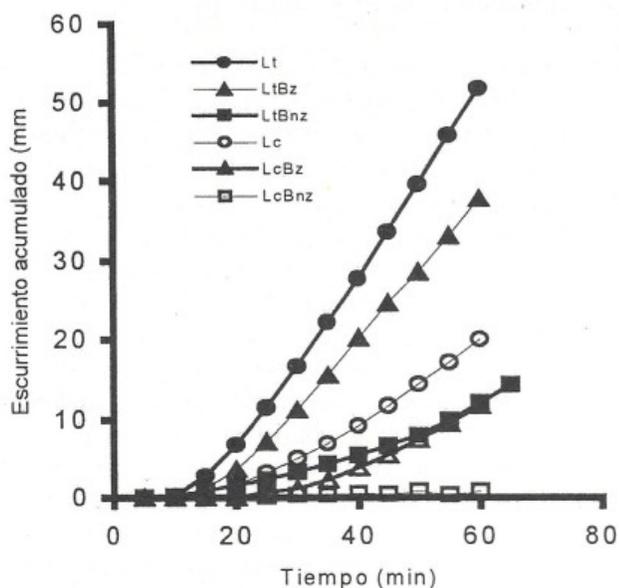


Figura 4. Relación entre tiempo y escurrimiento acumulado para dos barreras biofísicas con labranza tradicional (Lt) y labranza de conservación (Lc) con lluvia simulada de  $90 \text{ mm h}^{-1}$ .

aplicada escurrió por debajo de la cubierta de rastrojo una vez que el encharcamiento aumentó lo suficiente para rebasar la resistencia hidráulica de dicha cubierta. En esta circunstancia es importante la barrera con zarzamora o llantas de desecho.

#### Pérdidas de Suelo y Características del Sedimento Transportado

En la Figura 5, se presenta el efecto de los tratamientos en la erosión hídrica del suelo para

los dos años de evaluación con lluvia natural. En el ciclo 2000, la máxima pérdida de suelo ocurrió con Lt ( $1.4 \text{ t ha}^{-1}$ ), mientras que los dos sistemas de labranza complementados con barreras no mostraron diferencias notables entre ellos, con excepción de LcBnz que redujo en 70% la erosión ( $0.4 \text{ t ha}^{-1}$ ). En el primer año, con excepción de la Lt, el promedio de pérdidas de suelo fue de  $0.7 \text{ t ha}^{-1}$ . En el ciclo 2001, las diferencias fueron más notables a favor de Lc complementada con barrera de zarzamora o llantas más zarzamora. Similarmente, la Lt complementada con barreras disminuyó la erosión en 70%. Éste es un resultado favorable para aquellos productores que no disponen de rastrojo suficiente para aplicarlo como cobertura del suelo.

En la Figura 6, se presentan los resultados de las pérdidas de suelo con lluvia artificial, destacándose que LtBz redujo la erosión en 50%. Se asume que las pérdidas de suelo con Lt, con o sin barreras, resultaron tanto del impacto de las gotas de lluvia, como del esfuerzo cortante del flujo concentrado, mientras que en los tratamientos con Lc, con o sin barreras, resultaron principalmente de la acción del flujo acanalado. En los tratamientos con Lc, parte de la lluvia aplicada se desplazó principalmente por debajo de la cubierta de rastrojo. La variación en las concentraciones de sedimento en el escurrimiento, muy probablemente ocurrió en respuesta a variaciones tanto en el tirante de la lámina escurrida, como en la tasa de desprendimiento de partículas de sedimento. En este sentido, se ha establecido que la tasa de transporte de sedimentos puede ser limitada por la capacidad del flujo, conocida como limitación por transporte, o bien, por el proceso identificado como

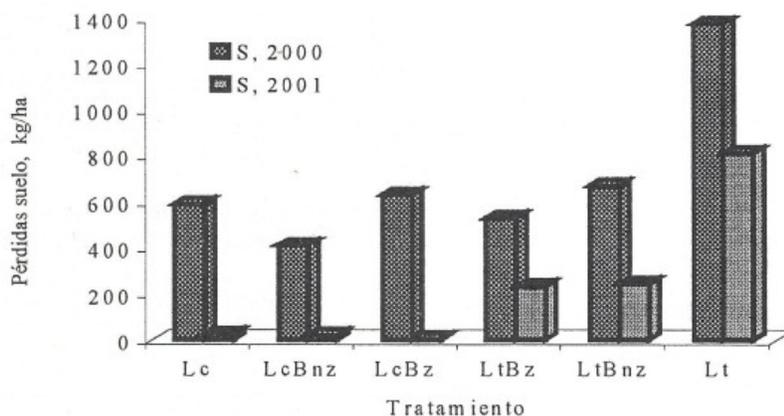


Figura 5. Pérdidas acumuladas de suelo observadas en los tratamientos en estudio.

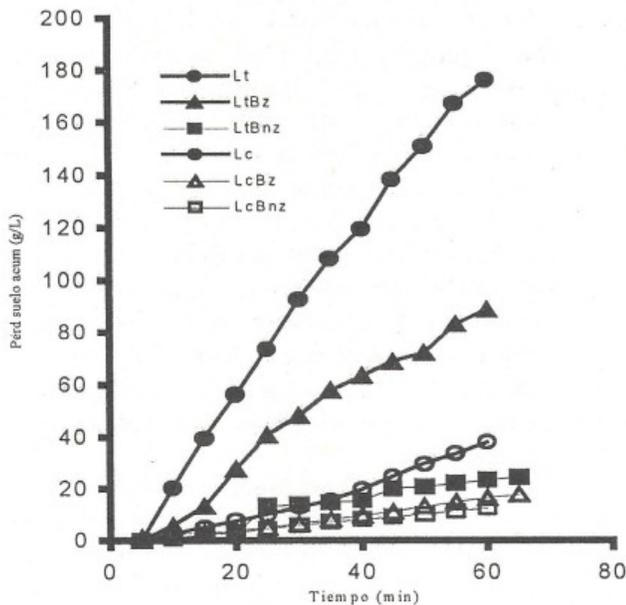


Figura 6. Relación entre tiempo y pérdidas de suelo acumuladas para dos barreras biofísicas con labranza tradicional (Lt) y labranza de conservación (Lc) con lluvia simulada de  $90 \text{ mm h}^{-1}$ .

limitación por disponibilidad de sedimento (Parsons y Abrahams, 1992). El efecto de Lc en reducir la erosión sólo fue comparable con Lt cuando ésta se acompañó con barreras de zarzamora más llantas de desecho.

El sedimento transportado y colectado a intervalos de 5 min en los experimentos con lluvia simulada, en promedio en los tratamientos, fue más fino (39.9% de arena, 32.5% de limo, 26.3% de arcilla) que el de la matriz del suelo de la capa superficial (48.7%, 39.1% y 12.2%, respectivamente). Una prueba *t* para comparación de medias de los porcentajes de arena confirmó que ambos promedios provienen de poblaciones con medias significativamente diferentes ( $P = 0.05$ ). Este resultado implica que tanto el desprendimiento producido por las gotas de lluvia, como el transporte por el flujo concentrado, son procesos de remoción selectiva de partículas finas y más fértiles del suelo. La baja capacidad de retención de sedimento de la barrera de zarzamora probablemente estuvo relacionada con el tamaño fino de partículas transportadas por la escorrentía.

## Rendimiento de Grano y Rastrojo

El rendimiento promedio de grano de los ciclos 2000 y 2001, ajustados a 14% de humedad, se muestra en el Cuadro 3. Se observa que el rendimiento promedio para los tratamientos con Lt fue de  $2.6 \text{ t ha}^{-1}$ , mientras que con Lc fue de  $2.9 \text{ t ha}^{-1}$ . Cuando se acompañó Lt con barreras, el rendimiento se incrementó en  $0.5 \text{ t}$ , respecto de sólo Lt. Cuando la Lc se complementó con barreras, el rendimiento aumentó en  $0.15 \text{ t}$ , respecto de sólo Lc. Estos resultados sugieren que durante los primeros dos años no existen beneficios importantes sobre el rendimiento de grano con Lc y confirman, en parte, lo que mencionaron Salinas-García *et al.* (2001), que los incrementos ocurren después del tercer o cuarto año, debido, principalmente, al efecto de la materia orgánica y a una mayor actividad microbiana.

El rendimiento de materia seca de rastrojo promedio para los ciclos 2000 y 2001 del tratamiento Lt fue de  $6 \text{ t ha}^{-1}$ , en tanto que para Lc fue de  $7.1 \text{ t ha}^{-1}$  (Cuadro 3). El efecto de las barreras sobre el rendimiento de rastrojo con Lt y Lc fue de  $1.35$  y  $0.5 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente. Como se mencionó en la descripción del trabajo de campo,  $3.0 \text{ t ha}^{-1}$  de rastrojo de maíz ofrecen una cobertura de 33%; esto significa que los agricultores podrían emplear  $4.0 \text{ t}$  de rastrojo para alimentar su ganado, si producen el maíz con Lc, o bien, utilizar todo el rastrojo para el ganado, pero el cultivo de maíz con Lt se deberá complementar con barreras de zarzamora o barreras con llantas de desecho.

Es conveniente mencionar que la tecnología de barreras con llantas de desecho, por los costos que implica el acarreo de ellas, requiere del apoyo municipal e institucional. Por ejemplo, para construir  $100 \text{ m}$  de barrera se requieren de  $200$  a  $250$  llantas de desecho. En un terreno de una hectárea, con pendiente de 18%, se requieren 10 hileras, separadas a  $10 \text{ m}$ , por lo cual se necesitarían entre  $2000$  a  $2500$  llantas. Cabe mencionar que, en Michoacán, la Comisión Forestal

Cuadro 3. Rendimiento promedio de grano de maíz y de rastrojo para los ciclos 2000 y 2001.

Rendimiento	Lt <sup>†</sup>	LtBz	LtBnz	Lc	LcBz	LcBnz
Grano, $\text{t ha}^{-1}$	2.6	3.1	3.1	2.9	3.1	3.0
Rastrojo, $\text{t ha}^{-1}$	6.0	7.5	7.2	7.1	7.3	7.7

<sup>†</sup> Lt = labranza tradicional, Bz = con barrera de zarzamora, Bnz = barrera de zarzamora más llantas de desecho, Lc = labranza de conservación.

implementó un pequeño programa piloto de conservación de suelos con llantas de desecho, basado en los resultados del presente trabajo en éste se apoya al productor con el transporte de las llantas.

### CONCLUSIONES

Los resultados de la presente investigación sugieren que Lt mejoró las relaciones hidrológicas y de erosión cuando se complementó con barreras biofísicas; sin embargo, al parecer el manejo más efectivo fue LcBnz porque formó una barrera densa que impidió el arrastre de partículas de suelo y favoreció la infiltración. El sistema de barreras más Lc aumentó la disponibilidad de agua entre 5 y 10%, con respecto a la Lt sin barreras, durante los periodos más secos del año. La tasa de infiltración después de 60 min fue de 49 y 79 mm h<sup>-1</sup> para los sistemas de Lt y Lc, ambos con barreras, respectivamente. El escurrimiento se redujo en 50% para Lt más barreras, mientras que la reducción fue de 80% cuando las barreras acompañaron a Lc. El efecto de Lt sobre las pérdidas de suelo fue comparable con Lc cuando se complementó con Bnz. El efecto de las barreras sobre el rendimiento de grano de maíz fue de 0.5 t ha<sup>-1</sup> con el sistema Lt.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación Produce Michoacán A.C. el apoyo financiero para desarrollar esta investigación; asimismo, a los productores Gabriel Carrillo y Rafael García.

### LITERATURA CITADA

- Angima, S.D., M.K. O'Neill, A.K. Omwega y D.E. Stott. 2000. Use of tree/grass hedges for soil erosion control in the Central Kenyan Highlands. *J. Soil Water Conserv.* 55: 478-482.
- Astier, M., E. Pérez, F. Mota, O. Masera y C. Alatorre. 2000. El diseño de sistemas sustentables de maíz en la región Purhépecha. pp. 271-323. *In: Masera, O. y S. López-Ridaura (eds.). Sustentabilidad y sistemas campesinos: cinco experiencias de evaluación en el México Rural.* Mundi-Prensa. México, D.F.
- Bernal-Brooks, F.W. y H.R. MacCrimmon. 2000. Lake Zirahuén (Mexico): an assessment of the morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs. pp. 61-76. *In: Munawar, M., S.G. Lawrence, I.F. Munawar y D.F. Malley (eds.). Aquatic ecosystems of Mexico: status and scope.* Backhuys. Leiden, The Netherlands.
- Cook, C.W. y J. Stubbendieck (eds.). 1986. Methods for studying rangeland hydrology. pp. 155-182. *In: Range research: basic problems and techniques.* Society for Range Management, Denver, CO.
- FAO-UNESCO (Food and Agriculture Organization). 1990. Mapa mundial de suelos, leyenda revisada. Versión en español, preparada por la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Roma, Italia.
- Gee, G.W. y J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. pp. 383-411. *In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods. Number 9.* American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Gilley, J.E., B. Eghball, L.A. Kramer y T.B. Moorman. 2000. Narrow grass hedge effects on runoff and soil loss. *J. Soil Water Conserv.* 55: 190-196.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1994. Resultados definitivos del VII censo agrícola-ganadero del Estado de Michoacán. Tomos 1, II y III. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Jury, W.A., W.R. Gardner y W.H. Gardner. 1991. *Soil physics.* John Wiley. New York.
- Kiepe, P. 1996. Cover and barrier effect of *Cassia siamea* hedgerow on soil conservation in semi-arid Kenya. *Soil Tech.* 9: 161-171.
- McDonald, M.A., P.A. Stevens, J.R. Healey y P.V.D. Prasad. 1997. Maintaining soil fertility on steep lands in the blue mountains of Jamaica: The role of contour hedgerows. *Agrofor.* Forum 8: 21-25.
- Miller, W.P. 1987. A solenoid-operated variable intensity rainfall simulator. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 832-834.
- Parsons, A.J. y A.D. Abrahams. 1992. Field investigations of sediment removal in interrill overland flow. pp. 307-334. *In: Parsons, A.J. y A.D. Abrahams (eds.). Overland flow: hydraulics and erosion mechanics.* Chapman & Hall. New York.
- Phillips, J.D. 1992. Deterministic chaos in surface runoff. pp. 177-198. *In: Parsons, A.J. y A.D. Abrahams (eds.). Overland flow: hydraulics and erosion mechanics.* Chapman & Hall. New York.
- Ruiz-Vega, J., M. Bravo-Espinosa y G. Loaeza-Ramírez. 2001. Cubiertas vegetales y barreras vivas: tecnologías con potencial para reducir la erosión en Oaxaca, México. *Terra* 19: 89-95.
- Salinas-García, J.R., M. Gallardo-Valdez y F. Caballero-Hernández. 2001. Efecto de labranza en la distribución de carbono y nutrientes. pp. 69-87. *In: Claverán-Alonso, R. y F.O. Rulfo-Vilchis (eds.). Productividad y conservación: agua y suelo. Avances de investigación en agricultura de conservación II.* Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Morelia, Michoacán, México.
- Simanton, J.R. y K.G. Renard. 1992. Upland erosion research on rangelands. pp. 335-376. *In: Parsons, A.J. y A.D. Abrahams (eds.). Overland flow: hydraulics and erosion mechanics.* Chapman & Hall. New York.
- Sparovek, G., S. Hornink y E. Schnug. 2001. A solution for worn-out tires, gully erosions, forests and dengue fever in Brazil. *Landbauforsch. Völkenrode* 51(3): 95-99.
- Tiscareño-López, M., A.D. Báez-González, M. Velásquez-Valle, K.N. Potter, J.J. Stone, M. Tapia-Vargas y R. Claverán-Alonso. 1999. Agricultural research for watershed restoration in Central Mexico. *J. Soil Water Conserv.* 54: 686-692.
- Turrent-Fernández, A., N. Francisco-Nicolás, S. Uribe-Gómez y R. Camacho-Castro. 1998. La terraza de muro vivo,

tecnología para la explotación prosostenible de laderas roturadas del trópico subhúmedo de México. *Agric. Tec. Mex.* 24: 67-81.

Uribe-Gómez, S., M.C. Gutiérrez-Castorena, C. Tavares-Espinosa y A. Turrent-Fernández. 2000. Caracterización y clasificación

de suelos de ladera manejados con terraza de muro vivo en los Tuxtlas, Veracruz. *Agrociencia* 34: 403-412.

World Resources Institute. 2000. *People and ecosystems: the frying web of life*. UN Development Programme, UN Environment Programme. World Bank y World Resources Report 2000-2001. Washington, DC.

# SISTEMAS DE LABRANZA, INCORPORACIÓN DE ABONO VERDE Y RECUPERACIÓN DE LA FERTILIDAD DE UN YERMOSOL HÁPLICO

## Tillage Systems, Incorporation of Green Manure, and Fertility Recuperation in a Haplic Yermosol

F.A. Beltrán-Morales<sup>1†</sup>, J.L. García-Hernández<sup>1</sup>, R.D. Valdez-Cepeda<sup>2</sup>, B. Murillo-Amador<sup>1</sup>,  
E. Troyo-Diequez<sup>1</sup>, J. Larrinaga-Mayoral<sup>1</sup>, F.H. Ruiz-Espinoza<sup>3</sup>, L. Fenech-Larios<sup>3</sup> y  
F. García-Rodríguez<sup>4</sup>

### RESUMEN

La adopción de sistemas de labranza reducida y la utilización de abonos verdes en las áreas de riego en México se han limitado extremadamente, a pesar de los múltiples reportes existentes sobre los beneficios de realizar tales prácticas. La preparación convencional de suelos, consistente en un paso de arado, uno o dos rastreos y la ausencia de incorporación de residuos, ha propiciado severos grados de degradación del suelo, en especial en las zonas áridas, donde, de forma natural, la fertilidad es baja, principalmente por el contenido de materia orgánica. En el presente trabajo, se hace uso de una de las herramientas de análisis estadístico más sofisticadas para evaluar el efecto de la reducción de labranza y el abonado verde sobre variables de fertilidad de un Yermosol háptico del noroeste de México. En esta investigación, se evaluó el efecto de tres sistemas de labranza y la incorporación de frijol dolichos *Dolichos lab lab* como abono verde en la recuperación de las variables de fertilidad en un suelo con pobres características nutrimentales, como un contenido inicial de materia orgánica de 0.4%. A los datos obtenidos se les practicó un análisis univariado, el cual mostró, en primera instancia, que la materia orgánica y el contenido de N, P y K fueron significativamente mayores en un muestreo realizado dos meses después de la incorporación del abono verde, comparados con el muestreo previo. Después

se utilizó un análisis de correlación canónica (ACC) a través del programa CANOCO. El ACC demostró una recuperación significativa con la incorporación del abono verde con respecto al contenido de macronutrientes (N, P y K) y de materia orgánica.

*Palabras clave:* materia orgánica, frijol dolichos, zona árida, suelo arenoso, fertilidad de suelos.

### SUMMARY

Adoption of reduced tillage fallow systems and green manure incorporation in the irrigation zones of Mexico has been very limited, in spite of several reports that describe the benefits from those practices. At present, it is well recognized that conventional tillage, consisting of one-pass ploughing, one or two passes with a harrow, and the absence of residue-incorporation, has propitiated severe degrees of degradation, especially in arid zones, where natural fertility is low, mainly due to the organic matter content. In the present study, we utilized one of the most sophisticated analysis tools to assess the effect of reduced tillage and green manure on fertility variables of a classic sandy soil in northwest of Mexico. We evaluated the effect of three levels of tillage and dolichos *Dolichus lab lab* green manure incorporation, on the recovery of fertility of soil with poor nutrient characteristics such as an initial organic matter content of 0.4%. A univariate analysis was performed on the obtained data and showed, in the first instance, that the organic matter and N, P, and K contents were significantly higher in a sample taken two months after the incorporation of green manure, compared with the previous sampling. The canonical correlation analysis (ACC) was later used through CANOCO software. ACC showed significant recovery after the green manure incorporation with respect to macronutrient (N, P, and K) content, and organic matter.

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, Baja California Sur, México.

<sup>†</sup> Autor responsable (abeltran04@cibnor.mx)

<sup>2</sup> Centro Regional Universitario Centro-Norte, Universidad Autónoma Chapingo. Zacatecas, Zacatecas, México.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Baja California Sur. Apartado Postal 19-B, La Paz, Baja California Sur, México.

<sup>4</sup> Sección Limnología, Facultad de Ciencias. 11400 Montevideo, Uruguay.

*Index words:* organic matter, dolichos bean, arid zone, sandy soil, soil fertility.

## INTRODUCCIÓN

La superficie agrícola nacional con riego ocupa alrededor de seis millones de hectáreas (SAGAR, 1997). En estos suelos, la labranza convencional sin incorporación de residuos ha propiciado que el contenido de materia orgánica disminuya a valores menores que 2% (Crovetto, 1996). Este efecto se acentúa en las zonas áridas, donde, de forma natural, los suelos poseen una baja fertilidad (García-Hernández *et al.*, 2004). La disminución de materia orgánica, como consecuencia del laboreo convencional, se ha documentado en una gran cantidad de estudios detallados (Karlen *et al.*, 1991; Lyon *et al.*, 1997; Kettler *et al.*, 2000). En tales estudios, se ha indicado que el uso frecuente de maquinaria agrícola es una de las principales causas de la degradación del suelo, reflejada en baja fertilidad, erosión, encostramiento, compactación y dificultad de manejo. Esta degradación da lugar a una, cada vez mayor, necesidad de laboreo mecánico a medida que transcurre el tiempo (Karlen *et al.*, 1990).

Como alternativas viables para recuperar la fertilidad del suelo, se han sugerido diferentes modalidades de preparación conservacionista del suelo a largo plazo que, además, incluyen la incorporación de leguminosas (Thönnissen *et al.*, 2000a). Estos sistemas permiten incrementar la materia orgánica, el nitrógeno y el carbono orgánico, así como la actividad microbiana, dando como resultado, a través del tiempo, una mejor condición de fertilidad y agregación del suelo (Wander y Bollero, 1999). Asimismo, se consigue mayor captación, disponibilidad y eficiencia del agua por los cultivos (Drury *et al.*, 1999), menor compactación del perfil del suelo a largo plazo, mayor estabilidad estructural y mejor condición de porosidad (Karlen *et al.*, 1990), lo cual repercute en una mejor y mayor productividad en los cultivos (Karlen *et al.*, 1991; Lyon *et al.*, 1997).

En México, se ha realizado un gran número de experimentos con sistemas de labranza (Figueroa-Sandoval y Morales-Flores, 1992), sin embargo, aunque la información obtenida posee gran valor, en sí misma es limitada, ya que estos trabajos corresponden a parcelas con un año o menos de manejo y, principalmente, en condiciones de temporal. Aún no se cuenta con información suficiente para áreas con riego, donde se presentan

diversos problemas con la eficiencia en el uso del agua.

La posibilidad de recuperar la fertilidad del suelo mediante el uso de abono verde se ha estudiado y discutido en diversos reportes, principalmente de zonas tropicales (Thönnissen *et al.*, 2000a,b; Bayer *et al.*, 2001). El efecto inmediato de los sistemas conservacionistas en el suelo es el aumento en el contenido de materia orgánica; sin embargo, la medida en que ello ocurre en las zonas áridas con un régimen de riego no se ha determinado cabalmente. En los trabajos mencionados, se ha demostrado el impacto de los abonos verdes sobre características propias de la fertilidad del suelo, como: la capacidad de intercambio catiónico, la disponibilidad de macro y micronutrientes, la formación y estabilización de agregados, el mejoramiento de la infiltración del agua y la aeración del suelo; específicamente en el caso de las leguminosas, en la incorporación al suelo de nitrógeno, a través de la fijación biológica (Igue, 1984).

El frijol dolichos (*Dolichus lab-lab*) es una planta semiperenne, originaria del sureste de Asia, que crece de 1 a 3 m de altura y tiene gran adaptabilidad a diversos climas. En la actualidad, esta planta es una de las leguminosas más importantes utilizadas como forraje y abono verde. Esta planta ofrece beneficios como proveer al suelo de nitrógeno fijado de la atmósfera y adicionar materia orgánica. El frijol dolichos presenta una relación C/N baja, inferior a 30, y se descompone en menos de 60 días, a una temperatura ambiente entre 22 y 30 °C (Humphreys, 1995). Dado que la variación del suelo es más continua que discreta (Odeh *et al.*, 1992) y que las propiedades físicas y químicas del suelo varían espacialmente, debido a la naturaleza dinámica del material de origen (Riha *et al.*, 1986), se recomienda utilizar análisis multivariados para la correcta interpretación de resultados en estudios de campo en los cuales se considere la medición de la variabilidad (Parkin *et al.*, 1990; Johnson, 1998). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la preparación del suelo y la incorporación de frijol dolichos como abono verde sobre la materia orgánica y el contenido de N, P y K.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el noroeste de México, cuyas coordenadas son: 24° 10' N y 110° 19' O. La mayoría de los suelos del estado

presentan una textura areno-migajosa, el contenido promedio de materia orgánica en este tipo de suelos en la región es de aproximadamente 0.4%. En esta zona, se presenta un clima BW (h') h w (e), es decir, seco desértico cálido, con una temperatura media anual mayor que 22 °C y con lluvias predominantes en verano, la precipitación promedio anual es de 184 mm. El suelo del sitio experimental presenta 75% de arena, 15% de limo y 10% de arcilla, y se clasifica como Yermosol háplico (INEGI, 1994).

El estudio se realizó durante 2002 y 2003, se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con arreglo en parcelas divididas y tres repeticiones y la unidad experimental tuvo una dimensión de 6 x 10 m. En el factor A, se evaluaron tres sistemas de labranza (L1: labranza convencional, consistente en un paso de arado y dos de rastra; L2: labranza mínima, consistente en dos pasos de rastra; y L3: labranza óptima, con un solo paso de rastra (para incorporar los residuos). El Factor B consistió en la aplicación de dos dosis de abono verde (con incorporación de 50 t de materia verde y sin incorporación) sobre cada uno de los sistemas de labranza. Como abono verde se utilizó frijol dolichos, cultivo de amplia aceptación en Centroamérica como abono verde en agroecosistemas conservacionistas.

Las variables de estudio fueron: materia orgánica (%), se determinó mediante la técnica de Walkley y Black (ASA-SSSA, 1982); nitrógeno total ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), se obtuvo mediante el digestor Kjeldahl (ASA-SSSA, 1982); fósforo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), se determinó por el método de Olsen (ASA-SSSA, 1982); y potasio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), por el método de Pech (ASA-SSSA, 1982). Los muestreos de suelo se realizaron a una profundidad de 0 a 30 cm. El primer muestreo exploratorio de suelos se realizó en febrero de 2002; el segundo muestreo, en mayo de 2002; el tercer muestreo, en agosto de 2002 (dos meses después de la incorporación del abono verde); el cuarto muestreo, en febrero de 2003; y el quinto muestreo, en junio de 2003.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para cada fecha de muestreo, atendiendo al modelo de parcelas divididas, con el fin de encontrar significancias en los efectos primarios y secundarios de los factores en estudio. Posteriormente, se valoró el efecto del tiempo (fechas) en los factores del experimento, realizando el ANOVA para serie de experimentos (factores jerarquizantes) mediante el programa estadístico SAS, Versión 6.12 (SAS Institute, 1998). Asimismo, se incluyó una comparación de medias para el factor fechas, la cual

se insertó como una tercera fuente de variación en el modelo estadístico. Después, los datos de todas las variables se analizaron con el programa de cómputo CANOCO para Windows (Versión 4.0) (Ter Braak y Smilauer, 1998), mediante el análisis de correlación canónica. El CANOCO se ha utilizado para el análisis de datos ambientales, ecología y agricultura; es una herramienta muy valiosa para obtener información multivariada de datos (Beltrán-Morales *et al.*, 2003). Las gráficas se obtuvieron con el programa CANODRAW, disponible en la Versión 4 de CANOCO para Windows (Ter Braak y Smilauer, 1998).

Se realizó un análisis comparativo de costo-beneficio de la aplicación de fertilizantes nitrogenados, con respecto a la incorporación de materia verde de frijol.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza a nivel factorial y la serie de experimentos (Cuadro 1) no mostraron valores que indiquen diferencias significativas para los efectos primarios ni las interacciones, sin embargo, mostraron significancias para P y K en el factor labranza; la incorporación tuvo alta significancia en el contenido de K. Con respecto a las interacciones de los otros factores incluidos en el modelo estadístico, este análisis indicó una diferencia altamente significativa en lo que respecta a la fecha de muestreo, en todas las variables de estudio. La débil significancia en los factores labranza e incorporación se debe, en parte, a que, por la heterogeneidad presentada en este tipo de estudios de campo, no es recomendable realizar análisis sujetos a un momento o espacio debido a los procesos de cambio en el suelo (Trangmar *et al.*, 1987), ya que el comportamiento de los tratamientos depende de un gran número de factores, no sólo aquellos considerados en el diseño experimental (Warren y Méndez, 1982).

En relación con lo anterior, Morkoc *et al.* (1985) señalaron que es aconsejable usar otras técnicas estadísticas de análisis, interpretación y estimación que tomen en cuenta la heterogeneidad en la parcela experimental.

Por otro lado, la escasa diferencia entre algunos de los factores en estudio también se debe a que los sistemas conservacionistas y la utilización de abonado verde por lo general necesitan varios años antes de presentar diferencias altamente significativas en las

**Cuadro 1. Análisis seriado de experimentos (ANOVA) de sistemas de labranza e incorporación de frijol dolichos como abono verde, establecido en bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas.**

Fuentes de variación	G.L <sup>†</sup>	Cuadrado medio del ANOVA			
		Materia orgánica %	Fósforo	Nitrógeno mg kg <sup>-1</sup>	Potasio
Fechas	4	0.2453**	0.0355**	0.405**	2216.89**
Repetición por fecha	10	0.1019**	0.0074	0.190**	90.95
Labranza	2	0.0068	0.0192*	0.013	164.91*
Fecha por labranza	8	0.0308	0.0041	0.047	143.60**
Error	20	0.0296	0.0089	0.051	62.72**
Incorporación	1	0.0650	0.0003	0.082	341.17
Labranza por incorporación	2	0.0039	0.0192*	0.007	59.47
Fecha por incorporación	4	0.0041	0.0025	0.005	88.09
Error b.	8	0.0127	0.0038	0.024	59.26

<sup>†</sup> G.L. = grados de libertad, \*,\*\* = significancia estadística a los niveles de 0.01 y 0.05, respectivamente.

características físicas y químicas del suelo (Bayer *et al.*, 2001; Thönnissen *et al.*, 2000a,b).

Tomando como base el resultado del ANOVA, se realizó una comparación de medias para el factor fechas (Cuadro 2). En este cuadro, se observa que el tercer muestreo, realizado dos meses después de la incorporación, muestra valores significativamente más altos para materia orgánica, N, P y K. Esto significa que, en primera instancia, el contenido de materia orgánica y los mencionados macronutrientes se encontraban, en general, en menores concentraciones y que dos meses después de la incorporación de abono verde, la concentración se incrementó significativamente. Los muestreos realizados al final mostraron una nueva reducción del contenido de macronutrientes y materia orgánica. En el caso del N, el fenómeno se explica por el incremento en la velocidad de la pérdida de nitrógeno mediante la incorporación de residuos de cosecha (Eck y Jones, 1992; Rice *et al.*, 1996; Salazar-Sosa *et al.*, 2003a).

**Cuadro 2. Comparación de medias para las variables en estudio respecto a cinco fechas de muestreo en un experimento de sistemas de labranza e incorporación de frijol dolichos como abono verde.**

Muestreo	Materia orgánica %	Fósforo	Nitrógeno mg kg <sup>-1</sup>	Potasio
Feb 2002	0.543 b	0.593 ab	280 b	9.180 c
May 2002	0.536 b	0.191 b	260 b	26.556 b
Ago 2002	0.758 a	0.703 a	380 a	39.994 a
Feb 2003	0.543 b	0.426 ab	280 b	22.004 b
Jun 2003	0.441 b	0.528 a	210 b	27.479 b

Medias en la misma columna con distinta letra son diferentes estadísticamente (Tukey, P < 0.01).

Las diferencias significativas para la mayoría de las características del suelo se manifiestan hasta después de varios ciclos de labranza de conservación, desde cinco hasta 15 años (Thönnissen *et al.*, 2000a,b; Bayer *et al.*, 2001; Salazar-Sosa *et al.*, 2003a,b).

La cantidad de abono verde aplicada al suelo fue, en promedio, de 49.98 t ha<sup>-1</sup>. La producción de materia seca del frijol dolichos fue de, aproximadamente, 6000 kg y cada 1000 kg de materia seca pueden aportar de 15 a 40 kg ha<sup>-1</sup> de N; es decir, con la incorporación de este abono verde puede aportarse al suelo hasta 240 kg de N mineral (Humphreys, 1995). En climas templados, el aporte de N mediante la mineralización neta anual es de 45 a 150 kg ha<sup>-1</sup> en los primeros 30 cm del suelo, considerando la relación C/N que presenta el abono verde (Beltrán-Morales, 2003).

El análisis de correspondencia canónica (Figura 1), muestra que el efecto de la incorporación del abono verde de frijol dolichos tuvo un efecto positivo en el contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio; en dicha figura, puede observarse el agrupamiento del Muestreo 3 en los ejes positivos. En relación con ello, la literatura indica que el efecto de los abonos verdes sobre la estructura del suelo, la actividad biológica y el ciclo de los nutrientes depende de la composición química, así como de la relación C/N, de la concentración de lignina y polifenoles, del tamaño de las partículas del suelo y del contacto del abono verde con el suelo (Nyborg *et al.*, 1995). Los residuos de cultivos y los abonos verdes se consideran, por la ciencia y las autoridades, como una fuente de vida natural para la conservación y la sustentabilidad de la productividad

**Símbolos**

- MO Materia orgánica (%)
- NT Nitrógeno total (%)
- P Fósforo mg kg<sup>-1</sup>
- K Potasio mg kg<sup>-1</sup>

- |   |                                         |   |            |
|---|-----------------------------------------|---|------------|
| A | Labranza convencional sin incorporación | 1 | Muestreo 1 |
| B | Labranza convencional con incorporación | 2 | Muestreo 2 |
| C | Labranza mínima sin incorporación       | 3 | Muestreo 3 |
| D | Labranza mínima con incorporación       | 4 | Muestreo 4 |
| E | Labranza óptima sin incorporación       | 5 | Muestreo 4 |
| F | Labranza óptima con incorporación       | 5 | Muestreo 5 |

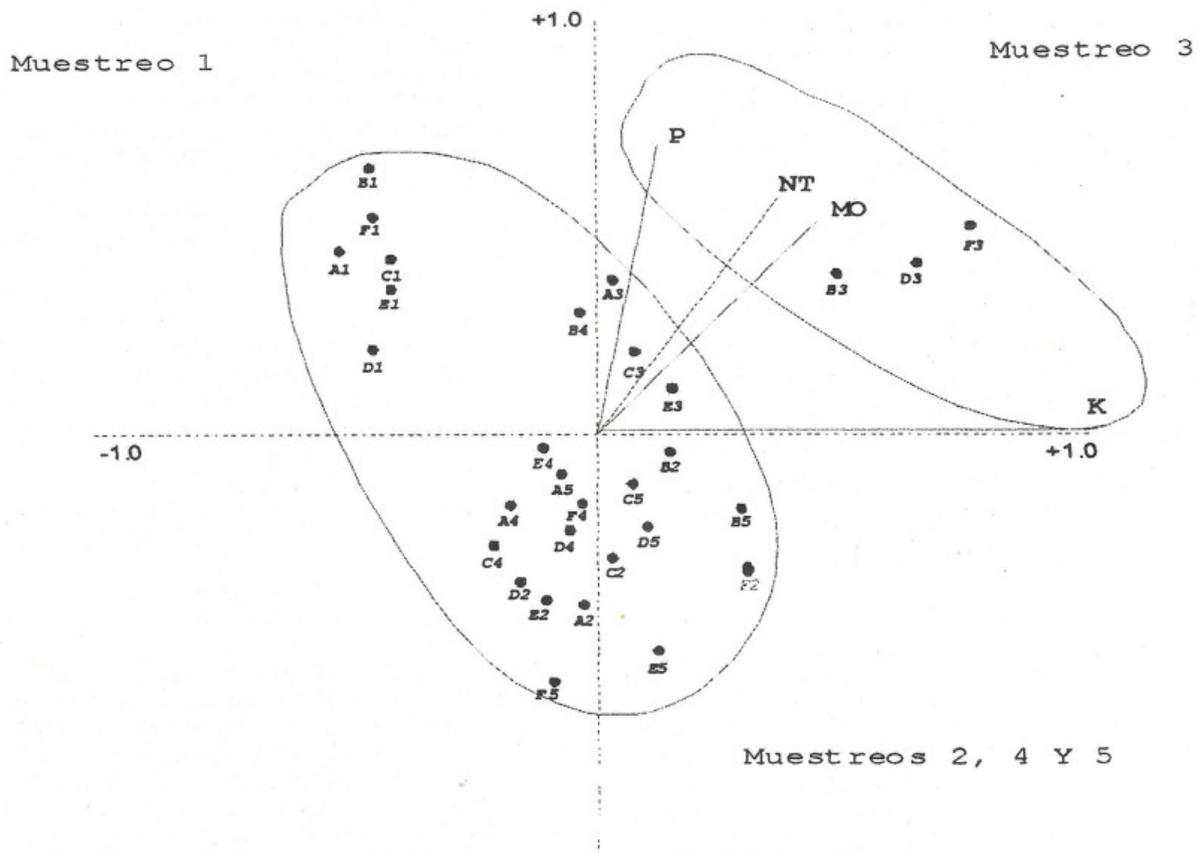


Figura 1. Análisis de correlación canónica para sistemas de labranza e incorporación de abono verde.

del suelo, además de ser la fuente principal de reposición de la materia orgánica del suelo (Walters *et al.*, 1992).

Los residuos de cultivos han demostrado proveer de nutrimentos esenciales a la mayoría de las especies de plantas (Walters *et al.*, 1992). Nyborg *et al.* (1995) han señalado que, además de mejorar el aspecto físico y biológico del suelo, la incorporación de residuos puede prevenir su degradación. Humphreys (1995)

mencionó que el uso del frijol dolichos como abono verde conserva la fertilidad del suelo y aporta nitrógeno mediante la fijación biológica, enriqueciendo el suelo de una manera limpia. En la agrupación de datos que se muestran en la Figura 1, puede observarse que, con relación a los sistemas de labranza, existe una estrecha relación positiva entre los sistemas de labranza óptima (F3), labranza mínima (D3), y labranza convencional (B3) con respecto

al contenido de materia orgánica y macronutrientes en el suelo provenientes de la incorporación previa del abono verde. En este sentido, Fox y Bandel (1986) determinaron que una disminución de pasos de maquinaria para preparar el suelo, con el sistema de labranza mínima y labranza óptima, reducen las pérdidas de materia orgánica; asimismo, Havlin *et al.* (1990) concluyeron que la mínima labranza incrementa la cantidad de residuos de cosecha sobre la superficie del suelo e incrementa la disponibilidad de nitrógeno. En este contexto, Dick (1983) y Kitur *et al.* (1984) coincidieron en que, debido al incremento de la materia orgánica en el suelo con los sistemas de labranza mínima y labranza cero, se promueve un mayor potencial de inmovilización y disponibilidad del nitrógeno para las plantas. Al realizar el análisis económico de la incorporación del abono verde, se tomaron en cuenta conceptos como el costo de la semilla, las labores culturales, la preparación del suelo, la siembra y el costo del agua, éstos representan una erogación aproximada de \$ 1500 (mil quinientos pesos 00/MN) por hectárea; por otra parte, la aplicación de fuentes sintéticas de fertilizantes representa un costo de alrededor de \$ 1800 (mil ochocientos pesos 00/MN) por hectárea, incluyendo aspectos como el costo del fertilizante y la mano de obra por su aplicación. Lo anterior indica que el uso del abono verde, con relación a la aplicación de fertilizantes sintéticos, es aproximadamente 17% más económico, sin tomar en cuenta los beneficios ambientales y edáficos que se generan.

### CONCLUSIONES

La materia orgánica (MO) mostró una recuperación significativa después de la incorporación del abono verde, con un incremento de 0.215% en el tercer muestreo; lo anterior equivale a aumentar una cuarta parte del contenido promedio de MO. El suelo con incorporación de abono verde incrementó su contenido de nutrientes, mostrando incrementos de 0.11 mg kg<sup>-1</sup> de P, 100 mg kg<sup>-1</sup> de N y 30.814 mg kg<sup>-1</sup> de K. En virtud de la deficiencia de MO y nutrientes en el suelo del área de estudio, los incrementos mostrados por los tratamientos con incorporación de abono verde resultan ser importantes para este tipo de suelos. Se confirmó que el análisis de correlación canónica con componentes principales es una herramienta apropiada para discernir los efectos significativos en estudios de alta heterogeneidad. El análisis económico reflejó una disminución de 17% de

los costos de producción en el tratamiento de labranza óptima (un solo paso de rastra para incorporación del abono verde) con respecto a labranza convencional.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo financiero de la Fundación Produce de Baja California Sur, al Programa de Mejoramiento de Profesores (PROMEP) y al Dr. Manuel de Jesús Luna Cisneros por su apoyo en el análisis estadístico de datos.

### LITERATURA CITADA

- ASA-SSSA (American Society of Agronomy-Soil Science Society of America). 1982. Methods of soil analysis. Chemicals and microbiological properties. Madison, WI.
- Bayer, C., L. Martin-Neto, J. Mielniczuk, C.N. Pillon y L. Sangoi. 2001. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1473-1478.
- Beltrán-Morales, F.A. 2003. El nitrógeno. Su impacto en la agricultura y en el ambiente. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México.
- Beltrán-Morales, L.F., F. García-Rodríguez, J. Borges-Contreras, G. Sánchez-Mota y A. Ortega-Rubio. 2003. Environmental and socioeconomic multivariate analysis of the primary economic sector of Mexico. *Sustainable Dev.* 11: 77-83.
- Crovetto, C. 1996. Stubble over the soil: the vital role of plant residue in soil management to improve soil quality. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Dick, W.A. 1983. Organic carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and pH soil profiles as affected by tillage intensity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 102-107.
- Drury, C.F., C.S. Tan, T.W. Welacky, T.O. Oloya, A.S. Hamill y S.E. Weaver. 1999. Red clover and tillage influence on soil temperature, water content and corn emergence. *Agron. J.* 91: 101-108.
- Eck, H.V. y O.R. Jones. 1992. Soil nitrogen status as affected by tillage, crops, and crop sequence. *Agron. J.* 84: 660-668.
- Figuerola-Sandoval, B. y F.J. Morales-Flores. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Fox, R.H. y V.A. Bandel. 1986. Nitrogen utilization with no-tillage. pp. 117-255. *In: Sprague, M.A. y G.B. Triplett (eds.). No-tillage and surface-tillage agriculture: the tillage revolution.* John Wiley. New York.
- García-Hernández, J.L., R.D. Valdez-Cepeda, B. Murillo-Amador, A. Nieto-Garibay, L.F. Beltrán-Morales, R. Magallanes-Quintanar y E. Troyo-Diéguez. 2004. Compositional nutrient diagnosis and main nutrient interactions in yellow pepper grown on desert calcareous soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 509-515.
- Havlin, J.L., D.E. Kissel, L.D. Maddux, M.M. Claassen y J.H. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 448-452.
- Humphreys, L.R. 1995. Diversity of productivity of tropical legumes. pp. 1-21. *In: D'Mello, J.P.F. y C. Devendra (eds.).*

- Tropical legumes in animal nutrition. CAB-International. Wallingford, UK.
- Iguc, K. 1984. Dinámica da materia organica e seus efeitos na propriedade do solo. pp. 232-267. *In: Adubo verde no Brasil*. Fundacao Cargill (eds.). Campinas, SP., Brasil.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1994. Síntesis geográfica del Estado de Baja California Sur. Carta estatal de suelos 1:1 000 000. La Paz, Baja California Sur, México.
- Johnson, D.E. 1998. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. International Thomson. México, D.F.
- Karlen, D.L., T.C. Erbach, T.S. Kaspar, E.C. Colvin, C. Berry y C.R. Timmons. 1990. Soil tith: a review of past perceptions and future needs. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 153-161.
- Karlen, D.L., E.C. Berry y T.S. Colvin. 1991. Twelve-year tillage and crop rotation effects on yields and soil chemical properties in northeast Iowa. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22: 1985-2003.
- Kettler, T.A., D.J. Lyon, J.W. Doran, W.L. Powers y W.W. Stroup. 2000. Soil quality assessment after weed-control tillage in a no-till wheat-fallow cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 339-346.
- Kitur, B.K., M.S. Smith, R.L. Blevins y W.W. Frye. 1984. Fate of N15 depleted ammonium nitrate applied to no tillage and conventional tillage corn. *Agron. J.* 76: 240-242.
- Lyon, D., C.A. Monz, R. Brown y A.K. Metherell. 1997. Soil organic matter changes over two decades of winter wheat-fallow cropping in western Nebraska. pp. 343-351. *In: Paul, E.A. y C.V. Cole (eds.)*. Soil organic matter in temperate agricultural ecosystems: a site network approach. Lewis Publishers. Chelsea, MI.
- Morkoc, F., J.W. Biggar, R.J. Millar y D.R. Nielsen. 1985. Statistical analysis of sorghum yield: a stochastic approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1342-1348.
- Nyborg, M., E.D. Solberg, S.S. Malhi y R.C. Izaurralde. 1995. Fertilizer N, crop residue, and tillage alter soil C and N contents after a decade. pp. 93-100. *In: Lal, R., J. Kimble, E. Levine y B.A. Stewart (eds.)*. Advances in Soil Science: soil management and greenhouse effect. Lewis Publishers, CRC Press. Boca Raton, FL.
- Odeh, I.O.A., A.B. McBratney y D.J. Chittleborough. 1992. Fuzzy-c-means and kriging for mapping soil as a continuous system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1848-1854.
- Parkin, T.B., S.T. Chester y J.A. Robinson. 1990. Calculating confidence intervals for the mean of a lognormally distributed variable. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 321-326.
- 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.
- Riha, S.J., B.R. James, G.P. Senesac y E. Pallant. 1986. Spatial variability of soil pH and organic matter in forest plantations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1347-1352.
- SAGAR. (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural). 1997. Anuario estadístico de la producción agrícola en México. México, D.F.
- Salazar-Sosa, E., F.A. Beltrán-Morales, M. Fortis-Hernández, J.A. Leos-Rodríguez, J.A. Cueto-Wong y C. Vázquez-Vázquez. 2003a. Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de avena forrajera con tres sistemas de labranza. *Terra 21: 561-567*.
- Salazar-Sosa, E., A. Beltrán-Morales, M. Fortis-Hernández, J.A. Leos-Rodríguez, J.A. Cueto-Wong, C. Vázquez-Vázquez y J.J. Peña-Cabriales. 2003b. Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de maíz forrajero con tres sistemas de labranza. *Terra 21: 569-575*.
- SAS Institute Inc. 1998. SAS for Windows. Release 6.12. Version 4. Cary, NC.
- Ter Braak, C.J.F. y P. Šmilauer. 1998. CANOCO reference manual and user's guide to Canoco for Windows: software for canonical community ordination (Version 4). Microcomputer Power. Ithaca, NY.
- Thönnissen, C., D.J. Midmore, J.K. Ladha, R.J. Holmer y U. Schmidhalter. 2000a. Tomato crop response to short-duration legume green manures in tropical vegetable systems. *Agron. J.* 92: 245-253.
- Thönnissen, C., D.J. Midmore, J.K. Ladha, D.C. Oik y U. Schmidhalter. 2000b. Legume decomposition and nitrogen release when applied as green manures to tropical vegetable production systems. *Agron. J.* 92: 253-260.
- Trangmar, B.B., R.S. Yost, M.K. Wade, G. Uehara y M. Sudjadi. 1987. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 668-674.
- Walters, D.T., M.S. Aulakh y J.W. Doran. 1992. Effects of soil aeration, legume residue and soil texture on transformation of macro and micronutrients in soils. *Soil Sci.* 153: 100-107.
- Wander, M.M. y G.A. Bollero. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 961-971.
- Warren, J.A. e I. Méndez. 1982. Methods for estimating background variation in field experiment. *Agron. J.* 74: 1004-1009.

# RELACIÓN BASES INTERCAMBIABLES – RENDIMIENTO DE MAÍZ EN UN CAMBISOL DÍSTRICO CON LABRANZA, ENCALADO Y ABONO VERDE

## Relationship Exchangeable Bases - Maize Yield in a Distric Cambisol under Tillage, Liming, and Green Manure

Rigoberto Zetina-Lezama<sup>1‡</sup>, Antonio Trinidad-Santos<sup>2</sup>, José L. Oropeza-Mota<sup>2</sup>, Víctor Volke-Haller<sup>2</sup> y Luis L. Landois-Palencia<sup>3</sup>

### RESUMEN

A partir del ciclo primavera-verano de 1997 se estableció un experimento de campo en un Cambisol dístico en el sur de Veracruz, para estudiar, a largo plazo, el efecto del encalado, abono verde (*Mucuna pruriens*) y tres intensidades de labranza sobre la sustentabilidad del recurso suelo y la producción de maíz. Después de cuatro años de tratamientos y evaluaciones continuas, se hicieron un muestreo y un análisis de suelos, determinando las bases y acidez intercambiables para cada uno de los tratamientos los cuales se relacionaron con el rendimiento de maíz. Los resultados indican que la disponibilidad de calcio disminuyó de 0.800 a 0.375 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo cuando aumentó la intensidad de labranza, observándose la misma tendencia con potasio y magnesio. El porcentaje de saturación de aluminio intercambiable disminuyó de 42.1% sin encalado a 23.1% con encalado. Todos los tratamientos de encalado presentaron porcentajes de saturación de aluminio intercambiable menores que 40%, que es el valor crítico establecido para el cultivo de maíz. El encalado incrementó 50 y 24% el rendimiento de grano y rastrojo, respectivamente. La intensidad de labranza empobreció la fertilidad del suelo, mientras que el encalado la mejoró y abatió el porcentaje de saturación de aluminio intercambiable. La asociación maíz-mucuna más encalado afectó negativamente el rendimiento de maíz por competencia y acame.

*Palabras clave:* labranza, mucuna, abono verde, encalado.

### SUMMARY

In the spring and summer season of 1997 a field experiment was established in the southern part of Veracruz to study the long term effect of liming, green manure (*Mucuna pruriens*) and three intensities of tillage on soil sustainability and corn yield. After four years of continuous treatment and crop yield evaluations, soil sampling and chemical analysis were performed to determine bases and exchangeable acidity for each of the treatments; these values were correlated with corn yield. The results indicate that the calcium availability decreased from 0.800 to 0.375 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> soil when tillage intensity increased, and the same tendency was observed with potassium and magnesium. The percentage of exchangeable aluminum saturation decreased from 42.1% without liming to 23.1% with liming. All treatments with lime presented exchangeable aluminum saturation less than 40% which is the critical value for corn production. Liming increased corn grain and stover yield by 50 and 24%, respectively. It was observed that tillage intensity impoverished soil fertility but liming improved it, lowering the exchangeable aluminum saturation. The treatment maize-mucuna association plus liming negatively affected corn yield because of competition and fallen stalks.

*Index words:* tillage, mucuna, green manure, liming.

### INTRODUCCIÓN

En los llanos de Isla y Rodríguez Clara, ubicados en el sur del estado de Veracruz, México, existen alrededor de 330 000 ha de suelos cultivados con maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y piña (*Ananas sativa* Merr) (Zetina-Lezama et al., 2002).

<sup>1</sup> Campo Experimental Papaloapan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 95030 Isla, Veracruz, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (zetinalr@yahoo.com.mx)

<sup>2</sup> Instituto de Recursos Naturales, <sup>3</sup> Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Estado de México.

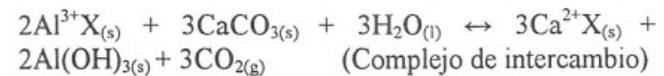
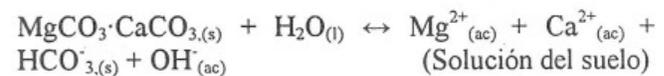
Los suelos se clasifican como Cambisoles y Acrisoles, y reciben al año hasta 2500 mm de precipitación pluvial (Soto y García, 1989). Esta condición climática, aunada a pendientes pronunciadas, texturas arenosas, laboreo excesivo y la quema de residuos orgánicos, dan lugar a un fuerte proceso erosivo en el que se pierden, en promedio, 30 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de suelo (Zetina-Lezama *et al.*, 2005). Esta situación ha provocado que los suelos dedicados a la agricultura de temporal presenten una acentuada reducción de su capacidad productiva (SEMARNAP, 1996) que conducen, en casos extremos, a una actividad agrícola incosteable.

La baja capacidad amortiguadora de estos suelos, por el bajo contenido de materia orgánica (1 a 1.5%), y el tipo de coloides inorgánicos de naturaleza caolinitica no ofrece resistencia a la lixiviación de bases ni al cambio de pH por el uso constante de fertilizantes de reacción ácida, como lo reporta Paul *et al.* (2003). La acidez puede alcanzar valores de pH que afectan el desarrollo adecuado de las especies agrícolas que se cultivan en esta región. Zetina-Lezama *et al.* (2002) encontraron que los valores de pH en los suelos de la región oscilan entre 3.8 y 5.5 (H<sub>2</sub>O 1:2), pero tienen valores bajos de aluminio intercambiable (< 1.0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) y de capacidad de intercambio catiónico (< 19.8 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>).

Algunos estudios de caso en Zimbabwe y Zambia (Steiner, 1998) y en Brasil (De Fátima, 2001; Landers, 2001) demostraron que las tecnologías de siembra directa, enalado y abonos verdes pueden reducir las tasas de erosión hasta en 90%, así como la contaminación de los espejos de agua por escurrimientos superficiales y lixiviación (Sorenson y Montoya, 1984). También existen evidencias de que estas tecnologías han mejorado la eficiencia de uso del agua (Berry y Mallet, 1989), contenido de materia orgánica (Lal, 1984; Thomas, 1993) y actividad de los microorganismos del suelo (Derpsch *et al.*, 1986; Römbke *et al.*, 1998). Sin embargo, los cambios más importantes sólo se han observado después de cierto tiempo de enmienda. Calegari y Alexander (1998), después de seguir durante nueve años un patrón de cultivo compuesto por maíz en sucesión con diversas especies de leguminosas en un Oxisol de Paraná, Brasil, observaron que los residuos de cosecha enriquecieron los nutrientes en la capa superficial del suelo (0 a 5 cm) mejorando la disponibilidad de nitrógeno y fósforo e incrementando significativamente el rendimiento de maíz. El uso de leguminosas, como *Lupinus angustifolius* L. y *Vicia villosa* Roth,

representó un ingreso adicional al sistema, equivalente a 90 kg ha<sup>-1</sup> de N. Dos Santos *et al.* (1998) observaron, después de 10 años de rotar el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) con soya (*Glycine max* L.) y otras leguminosas en un sistema de no labranza, cambios significativos en el contenido de materia orgánica, P, K, Ca, Mg y pH en la capa de 0 a 5 cm.

En condiciones tropicales, una dolomita pura con un tamaño de partícula de 80 a 100 mallas, aporta al suelo hasta 21.7% de Ca y 13.8% de Mg y tiende a solubilizarse durante el primer año de acuerdo con las reacciones:



donde: un mol de CaCO<sub>3</sub> o MgCO<sub>3</sub> neutralizan dos moles de acidez, en forma de 2H<sup>+</sup> o como 2/3 Al<sup>3+</sup> (Aguirre, 2001). Una vez disueltos en el suelo, la cantidad de Ca y Mg que ocuparán los sitios de intercambio dependerá de la acidez presente en el suelo y de su capacidad de intercambio catiónico. Dependiendo del tipo de manejo, en Cambisoles y Oxisoles las bases incorporadas y nativas estarán expuestas a pérdidas de 4 a 10% por lixiviación (Soprano y Álvarez, 1989; Ernani *et al.*, 2001).

El presente trabajo se llevó a cabo para evaluar el efecto de la labranza de conservación, enalado, y abono verde sobre el contenido de bases y acidez intercambiable del suelo en relación con el rendimiento de maíz, cuatro años después de haber iniciado el experimento. Se formuló la hipótesis de que el uso combinado de las prácticas anteriores influye en el enriquecimiento progresivo de bases intercambiables y en el incremento de rendimiento de maíz.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en las instalaciones del Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 85 (CBTA 85) de Juan Rodríguez Clara, Veracruz, que se localiza en las coordenadas 18° 01' 59" N y 95° 23' 26" O a una altitud de 144 m. El sitio se encuentra ubicado en un clima cálido subhúmedo (AWo) con una temperatura y precipitación media anual de 24.5 °C y 1462 mm,

respectivamente (García, 1973). El suelo está clasificado como un Cambisol dístrico desarrollado en una llanura con pendiente de 4% y un relieve ondulado. Las principales características físicas y químicas que presenta este suelo se describen en el Cuadro 1.

Los tratamientos de labranza de conservación, encalado y abono verde se iniciaron en el ciclo primavera-verano de 1997. A partir de entonces, año con año se respetó de manera rigurosa la distribución de los tratamientos con el propósito de evaluar los cambios que pudieran ocurrir, tanto en el suelo, como en el cultivo. En este artículo se presentan los resultados obtenidos de rendimiento de maíz, bases y acidez intercambiable del suelo en el cuarto año de estudio (ciclo primavera-verano de 2000). Las principales características edafoclimáticas del sitio se presentan en el Cuadro 1.

El diseño experimental se ajustó a un factorial  $3 \times 2 \times 2$  cuyos tratamientos se distribuyeron en parcelas subdivididas, en bloques al azar con tres repeticiones. En las parcelas grandes de 1200 m<sup>2</sup>, se estudiaron tres sistemas de labranza (NL): barbecho + dos rastreos (B + 2R), dos rastreos (2R) y labranza cero (LC); en las parcelas medianas, de 600 m<sup>2</sup>, se probaron dosis de encalado (ENC): con cal (CC) y sin cal (SC); y, en las parcelas chicas, de 300 m<sup>2</sup>, dos dosis de abono verde (*Mucuna pruriens*) (AV): con abono verde (CAV) y sin abono verde (SAV). La distancia entre parcelas grandes y repeticiones fue de 3 m; con ello, el área experimental efectiva fue de 10 800 m<sup>2</sup>.

Los tratamientos B + 2R y 2R se efectuaron con maquinaria agrícola, utilizando un arado reversible y rastra de discos, según el caso. El tratamiento LC sólo se chapeó y, posteriormente, se aplicó una dosis de 2.5 L ha<sup>-1</sup> de glifosato para controlar la maleza; para el encalado se utilizó cal dolomítica, con 7.2% de Mg, 29.6% de Ca y un tamaño de partícula de 0.15 mm de diámetro (Malla 100) que teóricamente permitió 100% de eficiencia en el primer año de aplicación. La dosis de 2.5 t ha<sup>-1</sup> se aplicó después del primer paso de

rastra, en forma manual y al voleo 15 días antes de la siembra. En el tratamiento LC, la aplicación de cal se hizo sobre la superficie del suelo. Un año después, se midió el pH del suelo en todos los tratamientos y se realizó una aplicación complementaria de 1.0 t ha<sup>-1</sup> de cal, para elevar el pH a 5.5. En total, se aplicaron 3.5 t ha<sup>-1</sup>, que equivalen a 1.23 y 0.49 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de calcio y magnesio, respectivamente, en los tratamientos correspondientes, sin repetir en los años siguientes. Después de la floración del maíz, se sembró la *Mucuna pruriens* (AV) entre los surcos de maíz, a una distancia de 1 m entre planta y planta. A fin de recolectar la semilla necesaria para el siguiente ciclo agrícola, año con año, se dejó que la *Mucuna* finalizara su ciclo normalmente.

Se utilizó el genotipo de maíz VS-536 como planta indicadora, el cual se caracteriza por tener un buen desarrollo en la zona. El manejo y el cuidado del cultivo se llevaron a cabo de acuerdo con las recomendaciones generadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) para la zona (Turrent-Fernández *et al.*, 1991). La siembra se realizó a una separación entre surcos de 0.80 m y 0.2 m entre planta y planta para obtener una densidad de 62 500 plantas ha<sup>-1</sup>. Cuando el maíz alcanzó una altura mayor que 50 cm, la maleza se controló con aplicaciones dirigidas de Paraquat, en dosis de 2 L ha<sup>-1</sup>. Para los tratamientos de fertilización se utilizó la dosis 134-69-60 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O, respectivamente, fraccionada en dos partes: 15 y 45 días después de la siembra (DDS). Las fuentes empleadas para N, P y K fueron urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio, respectivamente. Se evaluaron rendimiento de grano a 12% de humedad, rendimiento de rastrojo seco y porcentaje de sanidad de la mazorca.

En cada una de las tres repeticiones, las muestras de suelo se colectaron de 0 a 20 cm de profundidad, 60 DDS, y se determinó en ellas K, Ca y Mg intercambiables, extraídos con acetato de amonio 1 N pH 7 (Chapman, 1965), y acidez intercambiable extraída con una solución de KCl 1 N (Barnhisel y

Cuadro 1. Algunas características edáficas del sitio experimental de CBTA 85 en Juan Rodríguez Clara, Estado de Veracruz.

Bases cambiables	Textura	MO <sup>†</sup>	CIC <sup>†</sup>	pH <sup>§</sup>	P Bray 1	Saturación de aluminio
cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	----- % -----	me/100 g			mg kg <sup>-1</sup>	%
Ca 0.366	Arena 65.24	0.58	1.4	4.6	1.30	42.66
Mg 0.302	Limo 26.64					
K 0.054	Arcilla 8.12					
Al 0.169	Migajón arenoso					

<sup>†</sup> MO = materia orgánica; <sup>†</sup> CIC = capacidad de intercambio de cationes; <sup>§</sup> En agua relación 1:2 suelo solución.

Bertsch, 1982). Los datos anteriores, como variables dependientes de los tratamientos, se interpretaron mediante el análisis de varianza y la separación de medias, con la prueba de Tukey y Duncan, utilizando el programa MSTAT-C (Freed *et al.*, 1989).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Contenido de Bases Intercambiables en el Suelo

**Calcio.** De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza, el sistema de labranza afectó significativamente la disponibilidad de calcio en el suelo. Como puede observarse en la Figura 1, a medida que se incrementó el nivel de labranza, la disponibilidad de Ca fue menor. El bajo contenido de calcio encontrado en el tratamiento B + 2R infiere que la remoción del suelo por las prácticas de labranza favoreció la pérdida de este nutriente por lixiviación y escurrimiento. Zetina-Lezama *et al.* (2005) reportaron que, bajo este tipo de manejo, este tipo de suelos puede perder hasta  $165 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de este nutriente en los sedimentos que lleva el escurrimiento superficial. Al respecto, la concentración de  $0.375 \text{ cmol}_c \text{ Ca kg}^{-1}$  de suelo en el tratamiento B + 2R es inferior al límite crítico de  $1.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de suelo, reportado por Vicenio *et al.* (2003); en cambio, el Ca en los tratamientos LC y 2R fue mayor que en el B + 2R y ligeramente inferior al límite crítico. En el tratamiento SC (Cuadro 2) se observa la marcada pobreza de estos suelos en su contenido de Ca ( $0.367 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de suelo) en comparación con los valores de  $0.917 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  en los tratamientos encañados, que se aproximaron al límite crítico. Por otra parte, la relación Ca/Mg para los tratamientos CC en promedio fue de 4.3 que es inferior al límite de 10, después del cual la concentración de Ca puede provocar una deficiencia de Mg (Tisdale *et al.*, 1993).

**Magnesio.** Para sistemas de labranza (Cuadro 2) se observó la misma tendencia con Mg que con Ca. La mayor concentración de Mg se encontró en el tratamiento LC ( $0.200 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de suelo), mientras que la más baja fue en el tratamiento B + 2R ( $0.092 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de suelo) con una  $P < 0.0261$ . Sin embargo, en todos los tratamientos, el contenido de Mg en el suelo fue inferior al límite crítico de 0.30 y  $0.410 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de suelo establecido, para maíz en suelos tropicales, por Munson (1982) y Vitosh *et al.* (1995), respectivamente.

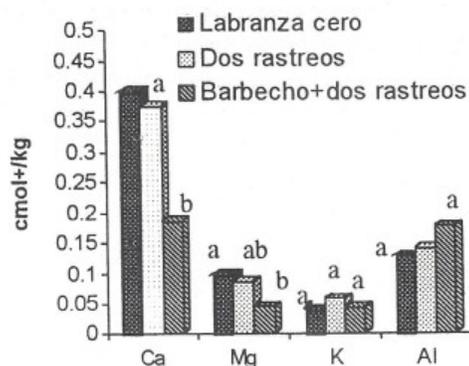


Figura 1. Contenido de bases y aluminio intercambiable en un Cambisol districo cultivado con maíz con tres sistemas de labranza.

La diferencia en el contenido de Mg entre los tratamientos B + 2R y LC está relacionada con el sistema de labranza convencional donde la cal se distribuyó uniformemente en la capa del suelo, favoreciendo su disponibilidad pero también la lixiviación de este elemento.

**Potasio.** El contenido de K intercambiable varió de  $0.043$  a  $0.059 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de suelo del tratamiento B + 2R al tratamiento 2R y no se encontraron diferencias para labranza y encañado. Ambos valores se clasificaron como muy bajos, de acuerdo con Etchevers-Barra *et al.* (1971). La nula acumulación de K en la capa arable, después de cuatro ciclos continuos de fertilización potásica, coincide con los reportes de Uexkull (1986) y Bekker *et al.* (1994) quienes atribuyeron este fenómeno a un proceso de lixiviación y arrastre de K provocado por las fuertes lluvias que ocurren sobre suelos de textura arenosa con presencia de arcillas de tipo 1:1 y la falta de coloides orgánicos en el complejo de intercambio. Por esta razón, resulta indispensable la aplicación de K para nutrir el cultivo y evitar que los valores tan bajos de este nutriente en el suelo provoquen un fuerte desequilibrio en las relaciones iónicas que guarda con el Ca y el Mg (Tisdale *et al.*, 1993).

**Porcentaje de saturación de aluminio (PSA).** Como se aprecia en la Figura 2 y en el Cuadro 2, el incremento de Ca y Mg intercambiable redujo el PSA a 23.1% en los tratamientos con cal, estadísticamente diferentes de los encontrados en los tratamientos sin cal (42.1%). En consecuencia, el PSA (23.1%) en los tratamientos encañados fue marcadamente inferior al límite crítico de 35 y 40%, reportado por

De Mello-Prado (2001) y Núñez-Escobar (1985), respectivamente, para el cultivo de maíz. Asimismo, aunque el análisis de varianza no registró diferencias estadísticas para los tratamientos de labranza, el comportamiento del PSA en los tratamientos encalados y no encalados permitió observar que el sistema de labranza puede llegar a tener un efecto importante sobre esta variable (Figura 3). En ambos tratamientos de encalado, el mayor PSA se encontró con el tratamiento B + 2R. La mayor diferencia entre este tratamiento y los tratamientos 2R y LC se observó en suelos encalados. De acuerdo con Griffith

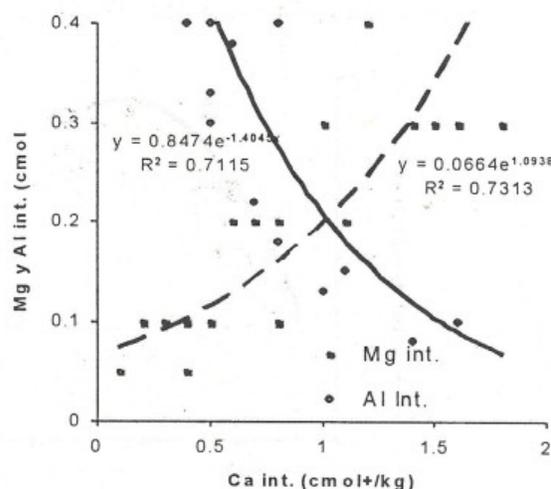
*et al.* (1986), la labranza convencional puede ser un factor limitativo del encalado en los suelos tropicales, porque la remoción constante del suelo rompe los agregados del suelo y elimina los residuos orgánicos que se encuentran sobre la superficie, provocando, a mediano plazo, una mayor compactación y una menor capacidad de intercambio catiónico que incrementan la tasa de lixiviación y de escurrimiento superficial, así como de acidificación del suelo.

Los resultados observados hasta la fecha, en el tratamiento sin cal, contrastan con los reportes de Moschler y Martens (1975), en los cuales se señala

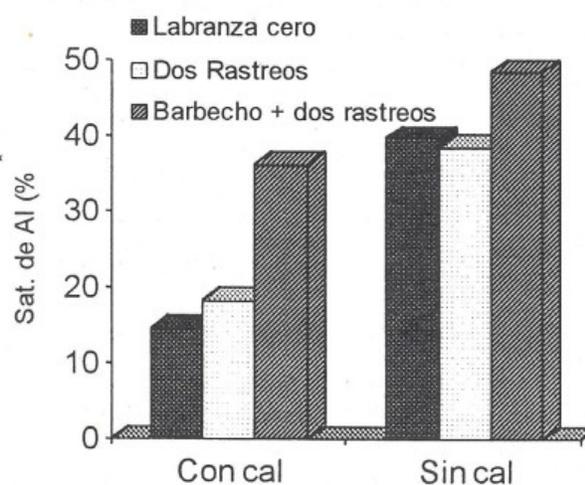
**Cuadro 2.** Contenido de bases cambiabiles y porcentaje de saturación de aluminio para los factores labranza y encalado, cuatro años después del tratamiento correctivo de encalado en un Cambisol dístico del sur de Veracruz.

Tratamiento	Ca	Mg	K	Al	Saturación de
					aluminio
	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> de suelo				%
<b>Labranza<sup>†</sup></b>					
Labranza cero	0.800 a <sup>§</sup>	0.200 a	0.041	0.395	27.03
2 rastreos	0.750 a	0.179 ab	0.059	0.428	28.63
Barbecho+2 rastreos	0.375 b	0.092 b	0.043	0.545	42.24
P > F	0.0494	0.0261	ns	ns	ns
<b>Encalado<sup>‡</sup></b>					
Con cal	0.917 a	0.211 a	0.041	0.397	23.10 b
Sin cal	0.367 b	0.103 b	0.054	0.514	42.16 a
P > F	0.0000	0.0005	ns	ns	0.0003
C.V. (%)	44.4	48.2	110.8	39.1	37.56

<sup>†</sup>nueve repeticiones; <sup>‡</sup>18 repeticiones. <sup>§</sup>Letras iguales en una columna unen medias de tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, 1%). ns = no significativo.



**Figura 2.** Efecto de contenido de Ca intercambiable sobre el comportamiento del Mg y el Al intercambiable (n = 34).



**Figura 3.** Efecto de la labranza en tratamientos encalados y sin encalar, sobre la saturación de Al (%) en un Cambisol dístico del sur de Veracruz.

que, con el paso de los años, los suelos sometidos a un sistema de labranza de conservación tienden a acidificarse, debido a los residuos orgánicos acumulados y al efecto ácido residual que dejan los fertilizantes amoniacales en su capa superficial. Esta situación no se ha observado en los tratamientos sin cal. La diferencia en el PSA, entre sistemas de labranza, no fue significativa, por lo que teóricamente debe atribuirse al reducido tiempo del efecto de los sistemas de labranza y acumulación de los residuos orgánicos. Esta diferencia en PSA sustenta la hipótesis de que en los tratamientos LC y 2R existió una menor pérdida del Ca y Mg nativo del suelo, debido a que estos sistemas promueven una mayor presencia de residuos orgánicos superficiales y una mejor estructura que cumplen con la función de reducir el escurrimiento superficial y la lixiviación de Ca y Mg a capas más profundas del suelo.

**Rendimiento y sanidad de mazorca.** El análisis de varianza registró diferencias altamente significativas para las variables rendimiento de grano, rastrojo y sanidad de mazorca en los tratamientos encalado, abono verde y las interacciones NL x AV y ENC x AV. En el Cuadro 3, se observa que el rendimiento de grano y rastrojo fue similar en los tres sistemas de labranza. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en investigaciones realizadas por Galeana-de la Cruz *et al.* (1999) y Navarro-Bravo *et al.* (2000),

Cuadro 3. Rendimiento de grano, rastrojo y sanidad de mazorca de maíz para los factores labranza, encalado y abono verde, en un Cambisol distrito de Veracruz.

Factores	Rendimiento		Sanidad de mazorca
	Grano <sup>1</sup>	Rastrojo	
	----- t ha <sup>-1</sup> -----		%
<b>Labranza</b>			
Labranza cero	4.58 a <sup>1</sup>	3.63 a	79.02 a
Dos rastreos	4.33 a	4.07 a	81.44 a
Barbecho + dos rastreos	4.57 a	4.34 a	76.41 a
P > F	ns	ns	ns
<b>Encalado</b>			
Con cal	5.38 a	4.45 a	84.35 a
Sin cal	3.60 b	3.58 b	71.56 b
P > F	0.000	0.0006	0.0019
<b>Abono verde</b>			
Con <i>Mucuna</i>	4.22 b	3.84 a	75.02 b
Sin <i>Mucuna</i>	4.76 a	4.20 a	81.06 a
P > F	0.0029	ns	0.0498
CV (%)	10.38	15.80	11.26

<sup>1</sup>a 14% de humedad. <sup>1</sup>Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, P < 0.01). ns = no significativo.

en el sentido de que no es necesario mover el suelo para obtener cosechas similares o mejores que aquellas obtenidas en un suelo labrado. Sin embargo, aunque el encalado incrementó en 50 y 24%, el rendimiento de maíz y de rastrojo, respectivamente, en el tratamiento LC donde se encontró el mayor contenido de calcio intercambiable (0.8 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) se obtuvo un rendimiento estadísticamente igual a los otros tratamientos de labranza. Se ha supuesto que la presencia de una mayor compactación y menores tasas de infiltración en las etapas iniciales del cultivo pudieron haber limitado el desarrollo radical del cultivo y la eficiencia de los fertilizantes químicos, lo que impidió alcanzar rendimientos más altos en los tratamientos con LC. Además, en los tratamientos encalados se encontró 12.8% más de mazorcas sanas que en tratamientos sin encalar. El análisis de regresión entre la variable sanidad de mazorca y contenido de Ca intercambiable en el suelo mostró que existe una buena correlación ( $r = 0.7918^{**}$ ), esto es, a medida que se incrementa el contenido de este nutrimento en el suelo, el número de mazorcas sanas aumenta (Figura 4). Considerando que también el rendimiento de rastrojo fue estadísticamente mayor en los tratamientos encalados, es probable que el efecto del Ca sobre la sanidad de la mazorca se debió a que las plantas que crecieron en tratamientos con cal se desarrollaron con mayor vigor, de tal forma que, en su etapa de madurez fisiológica, el porcentaje de acame fue menor, quedando la mazorca lejos de la humedad presente en el suelo y la maleza y, por lo tanto, menos expuesta a una pudrición apical (Buckles *et al.*, 1999)

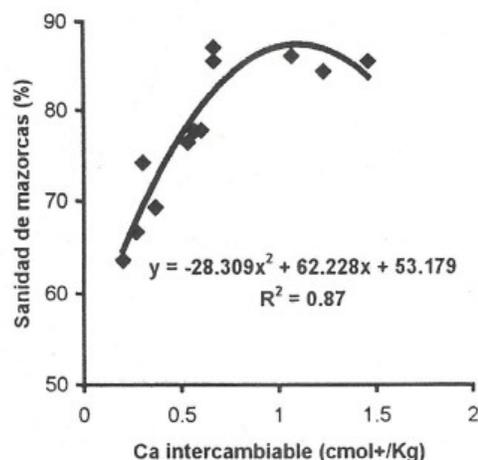


Figura 4. Efecto del contenido de Ca intercambiable en el suelo sobre % de sanidad de mazorca en el cultivo de maíz (n=12).

e indica que la utilización de la *Mucuna* como abono verde incrementa, de manera significativa, el rendimiento de maíz en suelos tropicales. Sin embargo, en el presente trabajo, los resultados obtenidos para el factor abono verde (Cuadro 3) y la interacción ENC x AV dejan en claro que, en los tratamientos encalados, la *Mucuna* ejerció un efecto negativo sobre el rendimiento de grano y la sanidad de la mazorca. En el Cuadro 4, se observa que la media del tratamiento CC-SAV fue estadísticamente superior ( $P < 0.01$ ) al resto de los tratamientos. Esto significa que para las condiciones en que se condujo este experimento, el uso de la *Mucuna* disminuyó el rendimiento de grano en 27% en tratamientos con cal y no afectó significativamente a los tratamientos sin cal. Esta situación se debe a que en los tratamientos sin cal posiblemente la acidez del suelo afectó el desarrollo de la *Mucuna*, por lo que no fue capaz de trepar a la planta para dañar la calidad de la mazorca. En la interacción NL x AV, el análisis de separación de medias (Tukey,  $P < 0.01$ ) de los tratamientos B+2R-CAV, 2R-SAV y LC-SAV resultaron estadísticamente superiores al tratamiento 2R-CAV. Para las variables rendimiento de rastrojo y sanidad de mazorca, no se apreciaron diferencias estadísticas (Cuadro 5). Por otra parte, aunque se observaron diferencias de hasta 2.2 t ha<sup>-1</sup> de grano entre los tratamientos LC+ENC (5.4 t ha<sup>-1</sup>) y 2R-SC (3.2 t ha<sup>-1</sup>), el análisis de varianza no registró diferencias entre tratamientos para la interacción NLxENC, porque la diferencia entre tratamientos se debió más al efecto del encalado que al efecto integrado de esta práctica con el nivel de labranza.

El análisis de correlación mostró el efecto altamente significativo del contenido de Ca ( $r^2 = 0.7014^{**}$ ,

$P < 0.001$ ) y Mg intercambiables ( $r^2 = 0.5374^{**}$ ,  $P < 0.001$ ) sobre el rendimiento. Estos resultados muestran la importancia, en la productividad del suelo, de la relación que debe existir entre el Ca y Mg, con respecto al H y Al intercambiables, como se ha reportado en trabajos (Fassbender y Bornemisza, 1978; Aguirre-Gómez, 2001).

Otras correlaciones altamente significativas fueron: Ca con Al intercambiable ( $r = -0.765^{**}$ ;  $P < 0.001$ ) y Mg con Al intercambiable ( $r = -0.557^{**}$ ,  $P < 0.001$ ), con lo que se corrobora el efecto neutralizante que ejercen estas bases, aportadas mediante el encalado, sobre el Al intercambiable presente en el suelo (Fassbender y Bornemisza, 1978; Núñez-Escobar, 1985; Aguilar-Santelises *et al.*, 1994). Además, la correlación positiva observada entre el Ca y el Mg intercambiable ( $r^2 = 0.847$ ,  $P < 0.0001$ ) puede ser un indicador de un aporte importante (0.49 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) de Mg por la dolomita aplicada y del efecto que ejerce el Ca en la solubilidad del Mg presente en el suelo.

**Cuadro 4.** Rendimiento de grano a 14% de humedad, rastrojo y sanidad de mazorca de maíz, en un Cambisol distrito, del sur de Veracruz, con encalado y *Mucuna* como abono verde.

Tratamientos	Rendimiento		Sanidad de mazorca
	Grano	Rastrojo	
	----- t ha <sup>-1</sup> -----		%
Sin cal - con <i>Mucuna</i>	3.71 c <sup>†</sup>	3.72 b	71.17
Sin cal - sin <i>Mucuna</i>	3.49 c	3.44 b	75.94
Con cal - con <i>Mucuna</i>	4.73 b	3.95 ab	82.53
Con cal - sin <i>Mucuna</i>	6.02 a	4.95 a	86.17
P > F	0.0001	0.0074	ns
CV (%)	10.38	15.80	11.26

<sup>†</sup>Valores con la misma letra en una columna no son significativamente diferentes (Tukey,  $P < 0.01$ ). ns = no significativo.

**Cuadro 5.** Rendimiento de grano a 14% de humedad, rastrojo y sanidad de mazorca para tres tipos de labranza y abono verde, obtenidos en un Cambisol distrito del sur de Veracruz.

Tratamientos	Rendimiento		Sanidad de mazorca
	Grano	Rastrojo	
	----- t ha <sup>-1</sup> -----		%
Labranza cero - con <i>Mucuna</i>	4.22 ab <sup>†</sup>	3.59	76.80
Labranza cero - sin <i>Mucuna</i>	4.93 a	3.68	81.24
Dos rastreos - con <i>Mucuna</i>	3.65 b	3.58	81.59
Dos rastreos - sin <i>Mucuna</i>	5.00 a	4.56	81.27
Barbecho + dos rastreos - con <i>Mucuna</i>	4.79 a	4.34	72.16
Barbecho + dos rastreos - sin <i>Mucuna</i>	4.34 ab	4.35	80.66
P > F	0.0006	ns	ns
CV (%)	10.38	15.80	11.26

<sup>†</sup>Valores con la misma letra en una columna no son significativamente diferentes (Tukey,  $P < 0.01$ ). ns = no significativo.

Además, debido a la capacidad del calcio aplicado al suelo, para desplazar al K de los sitios de intercambio se observó un correlación significativa entre este elemento y el Ca intercambiable ( $r^2 = 0.654$ ,  $P < 0.0001$ ). A medida que se incrementó el contenido de Ca en el suelo, se incrementó la disponibilidad de K, lo que resulta benéfico para el cultivo, pero también puede perderse más rápidamente por lixiviación (Goeder *et al.*, 1975; Bekker *et al.*, 1994) debido a la movilidad de este nutrimento y a la textura arenosa del suelo.

### CONCLUSIONES

- El contenido de Ca, Mg y K intercambiables en la capa arable del suelo fue mayor en la labranza cero y disminuyó éstos al aumentar la intensidad de labranza.
- El suelo encalado con dolomita mostró mayor contenido de Ca, Mg y K intercambiables, y disminuyó el porcentaje de saturación de Al intercambiable; además, en estos tratamientos, se encontró una relación Ca/Mg de 4.3 que favoreció la disponibilidad de estos nutrimentos.
- El contenido de Ca y Mg en el suelo influyó marcadamente en el rendimiento de maíz.
- El mayor rendimiento de maíz en grano y rastrojo se obtuvo en las parcelas encaladas, pero este rendimiento disminuyó con el abono verde.
- La mayor intensidad de labranza y el encalado favorecieron la sanidad de la mazorca, en cambio, el abono verde disminuyó el porcentaje de sanidad, posiblemente por competencia y acame de maíz

### LITERATURA CITADA

- Aguilar-Santelises, A., G. Alcantar-González y J. Etchevers-Barra. 1994. Acidez del suelo y encalado en México. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, estado de México.
- Aguirre-Gómez, A. 2001. Química de los suelos ácidos, templados y tropicales. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Barnhisel, R. y P.M. Bertsch. 1982. Aluminium. pp. 275-300. In: Page, A.L., R.H. Miller y D.R. Keeney. Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. 2nd edition. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Bekker, A.W., N.V. Hue y G.G. Chase. 1994. Effects of liming, K fertilization and leaching on K retention, nutrient uptake and dry matter production of maize grown on a Samoan Oxic Inceptisol. Fert. Res. 38: 123-130.
- Berry, W.A.J. y J.B. Mallet. 1989. The effect of removing maize surface residue from the seed-row on seed zone temperature, soil water and maize development. South African J. Plant Soil 6: 108-112.
- Buckles, D., B. Triomphe y G. Sain. 1999. Los cultivos de cobertura en la agricultura en ladera: innovación de los agricultores con *Mucuna*. CIID Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo /Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo/CATIE Centro de Agricultura Tropical de Investigación y Enseñanza. Ottawa, Canadá.
- Calegari, A. e I. Alexander. 1998. The effects of tillage and cover crops on some chemical properties of an oxisol and summer crop yields in south-western Paraná, Brazil. Adv. Geology 31: 1239-1246.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. pp. 891-901. In: Black, C.A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- De Fátima, R.M. 2001. From conventional to conservation agriculture: experiences on the development of no-tillage for small farms at Paraná State, Brazil. Instituto Agronômico do Paraná. Ponta Grossa, Paraná, Brazil.
- De Mello-Prado, R. 2001. Base saturation and corn hybrids under no-tillage system. Sci. Agric. 58: 391-394.
- Derpsch, R.N., N. Sidiras y C.H. Roth. 1986. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no tillage techniques in Paraná, Brazil. Soil Tillage Res. 8: 253-263.
- Dos Santos, H.P., G.O. Tomm y H.P. Dos Santos. 1998. Crop rotation systems for barley, after ten years: Effects on soil fertility. Ciencia Rural 28: 573-580.
- Ermani, P.R., M. Schurmann y C. Bayer. 2001. Chemical modifications in acid soils caused by addition of gypsum or limestone. Sci. Agric. 58: 825-831.
- Etchevers-Barra, J.D., W. Espinosa-G. y E. Riquelme. 1971. Manual de fertilidad y fertilizantes. 2ª edición corregida. Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
- Fassbender, W.H. y E. Bornemisza. 1978. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). San José, Costa Rica.
- Freed, M., S. Eismenith, S. Goetz, D. Reicosky, V. Smail y P. Wolberg. 1989. User's guide to MSTAT-C. A software program for the design, management, and analysis of agronomic research experiments. Michigan State University. East Lansing, MI.
- Galeana-de la Cruz, M., A. Trinidad-Santos, N.E. García-Calderón y D. Flores-Román. 1999. Labranza de conservación y fertilización en el rendimiento de maíz y su efecto en el suelo. Terra 17: 325-335.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4ª ed. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México. México, D.F.
- Goeder, W.J., R.B. Corey y J.K. Syers. 1975. The effect of potassium equilibrium in soil of Rio Grande do Sul, Brazil. Soil Sci. 120: 107-111.
- Griffith, D.R., J.V. Mannering y J.E. Box. 1986. Soil and moisture management with reduced tillage. pp. 19-57. In: Sprague, M.A. y G.B. Triplett (eds.). No-tillage and surface tillage agriculture. The tillage revolution. John Wiley. New York.
- Lal, R. 1984. Mechanized tillage systems effects on soil erosion from an Alfisol in watersheds cropped to maize. Soil Tillage Res. 4: 349-360.

- Landers, J.N. 2001. Zero tillage development in tropical Brazil. The story of a successful NGO activity. Bulletin 147. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- Moschler, W.W. y D.C. Martens. 1975. Nitrogen, phosphorus and potassium requirements in no tillage and conventionally tilled corn. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39: 886-891.
- Munson, R.D. Potassium, calcium and magnesium in the tropic and subtropic. pp. 15-20. In: Technical bulletin T-23. International Fertilizer Development Center. Muscle Shoals, AL.
- Navarro-Bravo, A., B. Figueroa-Sandoval, V.M. Ordaz-Chaparro y F.V. González-Cossío. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y el frijol. Terra 18: 61-69.
- Núñez-Escobar, R. 1985. Efectos de la acidez del suelo sobre la producción de cultivos y su corrección mediante el encalado. Serie Cuadernos de Edafología 2. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Paul, K.I., A.S. Black y M.K. Conyers. 2003. Development of acidic subsurface layers of soil under various management systems. Adv. Agron. 78: 187-273.
- Römbke, J., R. Förster y R. Derpsch. 1998. Soil quality assessment in remote areas: An example from two sites in Paraguay. Forthcoming.
- SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1996. Programa Forestal de Suelo 1995-2000. México, D.F.
- Soprano, E. y V.H. Alvarez. 1989. Nutrientes lixiviados de columnas de solo tratadas con diferentes saís de calcio. Revista Brasileira de Ciencia do Solo 13: 25-29.
- Sorenson, W.J. y L.J. Montoya. 1984. Implicações econômicas da erosão do solo e de práticas conservacionistas no Paraná, Brasil. Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR). Londrina, Paraná, Brasil.
- Soto E., M. y E. García. 1989. Atlas climático del estado de Veracruz. pp. 25-46. In: Publicación 25. Instituto de Ecología. Xalapa, Veracruz, México.
- Steiner, K.G. 1998. No-Tillage. The Africa case: Introduction of no-tillage and conservation farming in Zimbabwe and Zambia. pp. 50. In: Steiner, K.G. (ed.). Conserving natural resources and enhancing food security by adopting no-tillage. Tropical Ecology Support Program (TÓB). Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Eschborn, Germany.
- Thomas, G.T. 1993. Labranza cero, resultados en EEUU y observaciones en campos Argentinos. Asociación Argentina de Productores de Siembra Directa (AAPRESID). Rosario, Argentina.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson, J.D. Beaton y J.H. Havlin. 1993. Soil fertility and fertilizers. MacMillan. New York.
- Turrent-Fernández, A., J.L. Aguilar-Acuña, J.L. Zúñiga-González, J. Villanueva-Barrada y V. Esqueda Esquivel. 1991. Manual de diagnóstico recomendación para siembras de maíz en el estado de Veracruz. Publicación Especial 1. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Veracruz, México.
- Uexkull, R.H. 1986. Efficient fertilizer use and acid upland soil of the humid tropics. Fertilizer and plant nutrition bulletin 10. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- Viceno, M., M. Arienzo, P. Adamo y P. Violante. 2003. Availability of potassium, calcium, magnesium, and sodium in bulk and rhizosphere soil of field-grown corn determined by electro-ultrafiltration. J. Plant Nutr. 26: 1149-1168.
- Vitosh, M.L., J.W. Johnson y D.B. Mengel. 1995. Tri-state fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat and alfalfa. Extension Bulletin E-2567. Michigan State University Extension. East Lansing, MI.
- Zetina-Lezama, R., L. Pastrana-Aponte, J. Romero-Mora y J.A. Jiménez-Chong. 1999. Manejo de suelos ácidos para la región tropical húmeda de México. pp. 19-34. In: Libro Técnico 10. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Veracruz, México.
- Zetina-Lezama, R., A. Rebolledo-Martínez y D.E. Uriza-Ávila. 2005. Soil characterization of pineapple producing regions of Mexico. ISHS Acta Hort. 666: 51-58.

# REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ POR LA EROSIÓN DEL SUELO EN YANHUITLÁN, OAXACA, MÉXICO

Reduction of Maize Yield by Erosion in Yanhuítlan, Oaxaca, Mexico

José Contreras-Hinojosa<sup>1‡</sup>, Víctor Volke-Haller<sup>2</sup>, José Oropeza-Mota<sup>2</sup>, Carlos Rodríguez-Franco<sup>3</sup>, Tomás Martínez-Saldaña<sup>4</sup> y Ángel Martínez-Garza<sup>4</sup>

## RESUMEN

Diversos estudios realizados en la región Mixteca Oaxaqueña indican que alrededor de 95% de su superficie presenta erosión en grados moderado, alto y muy alto, producto del uso agrícola del suelo, del sobrepastoreo y de la deforestación. Parte de esta región lo constituye el municipio de Yanhuítlan, en el cual se realizó el presente estudio con el objetivo de evaluar la reducción del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) debido a la erosión del suelo, con base en características y propiedades del suelo relacionadas con ella. Se establecieron 31 lotes experimentales de maíz en suelos con erosión ligera, moderada y severa, con los tratamientos: sin fertilización y con la fertilización 80-40-40 kg ha<sup>-1</sup> de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O. Se colectó información sobre factores de suelo y de manejo del cultivo, precipitación y humedad del suelo durante el ciclo de cultivo, así como el rendimiento de grano y de paja del cultivo. Las funciones de producción para grano y paja obtenidas mediante análisis de regresión indican que el rendimiento fue afectado por los factores de suelo: pendiente, profundidad, materia orgánica y humedad aprovechable; humedad disponible en el suelo durante 45 días antes de la floración femenina; precipitación en el primer mes después de la siembra; y fertilización inorgánica. De los factores de suelo que se asociaron con las clases de erosión ligera, moderada y severa, la disminución de la profundidad, de 99 a 61 y 26 cm,

presentó el mayor efecto de reducción del rendimiento de maíz; y el incremento de la pendiente, de 2.1 a 3.0 y 10.0%, presentó un efecto intermedio; en cambio, la materia orgánica, que no se asoció con la erosión, no causó mayores reducciones del rendimiento entre clases de erosión, aunque sí entre sus valores extremos observados.

*Palabras clave:* *Zea mays* L., materia orgánica del suelo, profundidad del suelo, pendiente del suelo.

## SUMMARY

In the Mixteca Oaxaqueña region several studies have shown that about 95% of its surface is affected by moderate, high, and very high erosion. The causes of this situation are deforestation, overgrazing, and land tillage. The present study was carried out in the county of Yanhuítlan, Oaxaca, Mexico, to determine the reduction of maize yield due to the effect of erosion on some soil properties. Thirty-one experimental plots were established on low eroded, moderately eroded and severely eroded soils, without and with fertilizer rates of 80-40-40 kg ha<sup>-1</sup> N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O. Information on soil and crop management factors, rainfall and soil humidity during the growing season, as well as on grain and straw yield was collected. Production functions for grain and straw yield were obtained and it showed that the yield of grain and straw were affected by soil factors such as slope, depth, organic matter, and available water, available water in the soil during 45 days before feminine flowering, rainfall in the first month after sowing date, and inorganic fertilization. Among the soil factors associated with the soil erosion classes low, moderate and severe, 99 to 61 and 26 cm decrease in soil depth caused the greatest reduction in maize yield, and the increase of soil slope of 2.1 to 3.0 and 10.0% caused a medium reduction in maize yield; whereas, soil organic matter, which was not associated with soil erosion classes, did not cause reduction of maize yield among soil erosion classes, but did between its extreme values observed.

<sup>1</sup> Campo Experimental Yanhuítlan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 69660 Yanhuítlan, Oaxaca, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (contrerasraf@hotmail.com)

<sup>2</sup> Instituto de Recursos Naturales, <sup>4</sup> Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Texcoco, estado de México.

<sup>3</sup> Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, Texcoco, México.

**Index words:** *Zea mays L., soil organic matter, soil depth, soil slope.*

## INTRODUCCIÓN

El uso de los recursos naturales por el hombre para satisfacer sus diversas necesidades ha dado lugar a su deterioro, debido a que se ha realizado con base en criterios económicos de beneficios inmediatos, sin considerar la conservación de ellos a mediano y largo plazo. Esto ha originado que grandes superficies de suelo agrícola se encuentren en estado avanzado de degradación, o bien, ya se hayan perdido totalmente (Dregne *et al.*, 1991).

Diversos procesos causan la degradación del suelo, como: erosión hídrica, erosión eólica, salinización, sodización, acidificación, compactación, encostramiento, pérdida de materia orgánica, pérdida de nutrientes y acumulación de sustancias tóxicas; sin embargo, la erosión, por su impacto destructivo y por ser de un carácter irreversible, se ha convertido en el principal proceso de degradación del suelo (Dragne, 1987).

La erosión causa: 1) la remoción de los horizontes superficiales del suelo, con la consecuente pérdida de materia orgánica y nutrientes, el deterioro de las propiedades físicas, la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos delgados y, finalmente, la disminución de la productividad de los agroecosistemas; 2) en estados más avanzados, la pérdida de superficies importantes de suelo por la formación de cárcavas o pérdidas totales; y 3) la disminución de los ingresos de los productores, por menor rendimiento de los cultivos y mayor costo de producción por incrementos de los requerimientos de fertilización y de la labranza del suelo (USDA-SCS, 1990; Kidd y Pimentel, 1992; Huitzhunsen, 1993).

La información acerca del efecto de la erosión sobre las características y propiedades del suelo y, en consecuencia, sobre la productividad de los agroecosistemas, es numerosa. Frausto *et al.* (1991), con base en la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) estimaron las pérdidas de suelo por erosión en Cambisoles con pendientes de 2 a 19% con uso agrícola y pecuario de la zona de Nochixtlán, región Mixteca Oaxaqueña, durante el período de 1950 a 1988 y determinaron que la erosión afectó la profundidad del suelo, de tal forma que pérdidas del orden de 40 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> redujeron, en promedio, la profundidad de más de 90 cm a 65 cm y pérdidas del orden de 125 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> la redujeron a 30 cm. López

y Anaya (1994), en un Cambisol con 65% de pendiente de la región de La Fraylesca, Chiapas, encontraron que las pérdidas de suelo por erosión redujeron la materia orgánica en 0.0186%, el potasio intercambiable en 0.0030 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> y la conductividad hidráulica a saturación en 0.0011 cm h<sup>-1</sup>, e incrementaron la densidad aparente en 0.0040 Mg m<sup>-3</sup>, por 1.0 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de suelo perdido. Uribe *et al.* (2002), en Entisoles con 15% de pendiente con uso agrícola y labranza tradicional de la región de Los Tuxtlas, Veracruz, midieron pérdidas promedio de suelo del orden de 199 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en el período 1995-1999, equivalentes a una disminución de 1.37 cm año<sup>-1</sup> de la profundidad, y causantes de pérdidas de materia orgánica de 3388 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, de 279 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de N, y de diversas cantidades de P, K, Ca y Mg. González *et al.* (2003) estudiaron la relación entre la erosión y algunas características del suelo en el área de la cuenca de la laguna de Tuxpan, Guerrero y encontraron que ella se asoció con la profundidad ( $r = -0.885$ ) y la pendiente ( $r = 0.647$ ); en cambio, no mostró relación con otras características del suelo. López y Anaya (1994), en un Cambisol con 65% de pendiente y 15 cm de profundidad de la región La Fraylesca, Chiapas, determinaron una reducción del rendimiento de maíz de 0.0024 t ha<sup>-1</sup> por 1.0 t ha<sup>-1</sup> de suelo perdido por erosión, lo que, considerando pérdidas de suelo de 49.67 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, equivale a una pérdida anual de maíz de 0.119 t ha<sup>-1</sup>, y para un rendimiento observado de 3.07 t ha<sup>-1</sup>, a 3.9% anual. Pérez *et al.* (1998), en la zona de Nochixtlán, región Mixteca Oaxaqueña, encontraron reducciones del rendimiento de maíz por remoción de suelo superficial simulando la erosión, del orden de 40% para una remoción de 20 cm en un Faeozem profundo, y de 99.2% para una remoción de 10 cm en un Leptosol de 25 cm de profundidad, a la vez que, en el primer suelo, ocurrieron pocos cambios en las propiedades físicas y químicas con la remoción, mientras que, en el segundo, ocurrieron disminuciones importantes en el contenido de materia orgánica, P y K, además de la profundidad. Villar *et al.* (2003), en un Acrisol de 60 cm de profundidad y 6% de pendiente de la zona de La Fraylesca, Chiapas, determinaron, para un rendimiento de 3.7 t ha<sup>-1</sup>, una disminución anual del rendimiento de maíz del orden de 18.9% para remociones de 15 cm de suelo, que simulan la erosión. González *et al.* (2003), estudiando el efecto de reducción del rendimiento de maíz por la erosión, expresada en las clases de erosión de Morgan (Morgan, 1997) y su equivalente por clase de erosión

de FAO (FAO, 1980), en el área de la cuenca de la laguna de Tuxpan, Guerrero, encontraron disminuciones del rendimiento de hasta 53.0 y 70.7% para las clases de erosión de Morgan, respectivamente, o muy severa de FAO.

En México, diversas estimaciones indican que entre 79 y 86% de su superficie territorial presentan algún grado de erosión (INEGI-SEMARNAP, 1998). Para la región Mixteca Oaxaqueña, se menciona que 59% de su superficie presenta erosión del suelo en grado alto y muy alto (Martínez *et al.*, 1986), a la vez que otros estudios señalan que 36.0% de la superficie presenta erosión moderada, 46.1% erosión alta y 13.3% erosión muy alta (Romero *et al.*, 1986).

El presente estudio tiene por objetivo evaluar la reducción del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) debido a la erosión del suelo, con base en características y propiedades del suelo relacionadas con ella, en la zona de Yanhuatlán, región Mixteca Oaxaqueña.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio corresponde al municipio de Santo Domingo Yanhuatlán, en la región denominada Mixteca Oaxaqueña (17° 28' y 17° 31' N y 97° 16' y 97° 20' O), mismo que comprende una superficie de 6838 ha y presenta una altitud que varía de 1950 a 2800 m. Según la clasificación de Köppen, modificada por García (1987), el clima de la región corresponde a un BS<sub>1</sub>kw(w)igw", presentando una precipitación media anual de 420 mm, con régimen de lluvias de verano y picos máximos en los meses de junio (20%) y septiembre (18%), y una temperatura media anual de 16.9 °C, con valores medios mínimo de 6.5 °C en enero y máximo de 22.0 °C en mayo. Los suelos se clasifican como Faeozem calcárico (INEGI, 1981), los cuales presentan un color dominante castaño rojizo (5YR5/3), textura arcillosa, profundidades de 10 a más de 100 cm, y se ubican en terrenos desde planos hasta montañosos. La superficie agrícola comprendió, a principios de la década de los noventa, 758 ha de maíz como cultivo principal (INEGI, 1994).

En el área agrícola del municipio de Santo Domingo Yanhuatlán, se evaluó la erosión del suelo de manera semicuantitativa mediante la metodología FAO (FAO, 1980) y se definieron las clases de erosión ligera, moderada y severa. En estas clases de erosión se ubicaron 31 sitios, en parcelas de agricultores cooperantes, distribuidos en las tres clases

de erosión: 13 en la clase ligera, 10 en la clase moderada y 8 en la clase severa. En cada sitio se tomaron muestras compuestas de suelo a las profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, en las cuales se determinaron: pH, en relación suelo:agua de 1:2; conductividad eléctrica, en relación suelo:agua de 1:5; materia orgánica, por combustión húmeda mediante el método de Walkley y Black; P extractable, por el método de Olsen; K intercambiable, en acetato de amonio 1 N a pH 7.0; carbonato de calcio, utilizando ácido clorhídrico como neutralizante; textura, por el método de Bouyoucos, con solución de Calgón como dispersante; humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, en la olla y membrana de presión a -30 y -1500 kPa, respectivamente (CSTPA, 1980); y, también se determinaron, con base en cuatro muestras: la densidad aparente del suelo, por el método de la parafina; el color del suelo, mediante la carta de colores Munsell; la profundidad del suelo, hasta la ubicación del "tepetate", considerando valores máximos de hasta 100 cm; y la pendiente, utilizando un clisímetro y estadal graduado.

Con fines de determinar la relación entre las características y propiedades del suelo y las clases de erosión del suelo, se realizó un análisis discriminante (SAS Institute, 1982), mismo que indicó una relación significativa ( $P = 0.5$ ) entre pendiente y profundidad del suelo y el color del suelo de 0 a 20 cm, y las clases de erosión; en cambio, no indicó relación con otras características o propiedades del suelo, como: materia orgánica, densidad aparente, arcilla, limo, arena y humedad aprovechable de 0 a 20 cm (Cuadro 1).

En el ciclo primavera-verano de 1994, se establecieron lotes experimentales de maíz en las 31 parcelas de los agricultores seleccionados. Ellos incluyeron dos tratamientos de fertilización: un control sin fertilización y, otro, con una dosis de fertilización de 80-40-40 kg ha<sup>-1</sup> de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O, de acuerdo con la recomendación dada por el INIFAP para la zona (INIA, 1984). Las unidades experimentales tuvieron un tamaño de ocho surcos de 10 m de largo, sin repeticiones y, en cada lote, los tratamientos se distribuyeron al azar en el sentido perpendicular a la pendiente. En todos los lotes se utilizó maíz criollo del agricultor y el arreglo topológico fue de tres plantas por mata a una distancia de 0.75 m y una separación entre surcos de 0.80 m, lo que correspondió a una población de 50 000 plantas ha<sup>-1</sup>. Durante el ciclo del cultivo, se midió la precipitación en períodos semanales mediante

**Cuadro 1. Relación entre la erosión y algunas características y propiedades del suelo en la zona de Yanhuatlán, región Mixteca Oaxaqueña.**

Característica o propiedad del suelo	Valores promedio por clase de erosión de FAO			Nivel de probabilidad
	ligera	moderada	Severa	
Pendiente (%)	2.1	3.0	10.0	0.01
Profundidad (cm)	99	61	26	0.01
Color de 0 a 20 cm	2.50	2.8	3.25	0.04
Materia orgánica de 0 a 20 cm (%)	0.95	0.8	0.66	0.29
Densidad aparente (Mg m <sup>-3</sup> )	1.65	1.66	1.80	0.09
Arcilla (%)	57.1	58.9	63.1	0.34
Limo (%)	29.1	27.4	30.1	0.56
Arena (%)	13.8	13.7	6.8	0.22
Humedad aprovechable (%)	12.3	11.1	12.1	0.23

† Valor medio para los valores de color 10YR = 1, 7.5YR = 2, 5YR = 3 y 2.5YR = 4.

pluviómetros distribuidos en el área de estudio y se determinó la humedad del suelo a las profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, a intervalos quincenales en el período de 45 días antes y de 45 días después de la floración femenina, y se tomaron cuatro submuestras por sitio, para estimar la humedad disponible media en el suelo. Al final del ciclo del cultivo, se midió la infiltración en el fondo del surco, para lo cual se utilizó un infiltrómetro de doble cilindro, en un tiempo de 120 min. Por otra parte, se consideró la fecha de siembra y de floración femenina, la densidad de plantas del maíz medida a la cosecha y el rendimiento de grano y de paja del maíz en una parcela útil de seis surcos de 8 m de largo, y se consideró al grano con 14% de humedad y a la paja en peso seco en el momento de la cosecha.

Con toda la información colectada, se procedió a determinar funciones de producción del rendimiento de grano y de paja en relación con las características y propiedades del suelo, los factores de manejo del cultivo, la precipitación, expresada en diferentes periodos a partir de la siembra y de la fecha de floración femenina, la humedad del suelo en el período de 45 días antes y 45 días después de la floración femenina y los dos tratamientos de fertilización en conjunto, mediante variables auxiliares, para lo cual se siguió el procedimiento indicado por María y Volke (1999).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características y Propiedades del Suelo, Precipitación, Humedad del Suelo y Manejo

Los valores mínimo, máximo y medio de las características y propiedades de suelo, la

precipitación, los factores de manejo del cultivo y la humedad del suelo 45 días antes y 45 días después de la floración femenina, observados en los lotes experimentales, se presentan en el Cuadro 2.

Algunas características y propiedades relevantes de los suelos, de acuerdo con la capa superficial de 0 a 20 cm, son: pH alcalinos, que varían de 8.1 a 8.3, asociados con el alto contenido de carbonato de calcio, mayor que 16.9%; contenido de materia orgánica menor que 0.50%, 25.8%, entre 0.51 y 1.00%, 48.4%, y entre 1.01 y 1.61%, 25.8%; contenido de P Olsen bajo (< 5.5 mg kg<sup>-1</sup>), 77%, medio (5.5 a 11 mg kg<sup>-1</sup>), 16%, y alto (> 11 mg kg<sup>-1</sup>), 6% (CSTPA, 1980); contenido alto de K intercambiable, mayor que 2.1 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>; textura arcillosa; y densidad aparente mayor que 1.47 Mg m<sup>-3</sup>. Por otra parte, 29.0% de los suelos presentaron profundidades menores que 45 cm, 35.5% entre 46 y 90 cm y 35.5% mayor que 90 cm; y 87% de los suelos tienen pendientes menores que 8%, y 13% entre 9% y 24%.

Las siembras se realizaron en el período del 13 de junio al 2 de julio, con el establecimiento del temporal y cuando el suelo llegó a tener una profundidad de humedecimiento de 20 a 30 cm. La precipitación durante el ciclo de cultivo varió de 407 a 493 mm entre los lotes experimentales y, debido a la distribución deficiente y presencia de suelos someros y delgados, se observaron síntomas de deficiencia de humedad del cultivo en varios lotes experimentales.

### Rendimiento de Maíz

El rendimiento obtenido de grano y paja del maíz para los tratamientos sin y con fertilización, excluyendo el Lote 14, en el cual el tratamiento sin

**Cuadro 2. Características y propiedades del suelo, precipitación, humedad del suelo y manejo del cultivo, en los 31 lotes experimentales.**

Variable	Valor		
	mínimo	máximo	promedio
pH de 0 a 20 cm	8.1	8.3	8.2
Conductividad eléctrica de 0 a 20 cm (dS m <sup>-1</sup> )	0.14	0.19	0.17
Materia orgánica de 0 a 20 cm (%)	0.13	1.61	0.78
Materia orgánica de 20 a 40 cm (%)	0.07	1.47	0.61
Fósforo de 0 a 20 cm (mg kg <sup>-1</sup> )	1	20	4
Fósforo de 20 a 40 cm (mg kg <sup>-1</sup> )	1	11	3
Potasio intercambiable de 0 a 20 cm (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	2.1	37.3	7.0
Potasio intercambiable de 0 a 40 cm (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	1.8	34.4	6.3
Carbonato de calcio de 0 a 20 cm (%)	16.9	28.0	25.1
Carbonato de calcio de 0 a 40 cm (%)	19.6	28.5	25.3
Arena de 0 a 20 cm (%)	1	39	11.5
Arena de 20 a 40 cm (%)	1	49	10.4
Limo de 0 a 20 cm (%)	21	40	28.6
Limo de 20 a 40 cm (%)	12	38	28.3
Arcilla de 0 a 20 cm (%)	39	72	59.6
Arcilla de 20 a 40 cm (%)	31	77	61.2
Capacidad de campo de 0 a 20 cm (%)	18.3	34.0	27.2
Capacidad de campo de 20 a 40 cm (%)	18.9	35.4	28.6
Punto de marchitez permanente de 0 a 20 cm (%)	8.8	20.5	15.4
Punto de marchitez permanente de 20 a 40 cm (%)	9.1	22.1	16.6
Humedad aprovechable de 0 a 20 cm (%)	8.6	15.3	11.7
Humedad aprovechable de 20 a 40 cm (%)	7.9	15.7	12.0
Densidad aparente de 0 a 20 cm (Mg m <sup>-3</sup> )	1.47	2.03	1.69
Densidad aparente de 20 a 40 cm (Mg m <sup>-3</sup> )	1.54	2.00	1.76
Color del suelo de 0 a 20 cm	2.5 YR	10YR	
Color del suelo de 20 a 40 cm	2.5 YR	10YR	
Profundidad del suelo (cm)	16	> 100	67.9
Pendiente (%)	1	24	4.7
Infiltración básica (cm h <sup>-1</sup> )	1.2	22.8	6.7
Infiltración a los 30 minutos (cm h <sup>-1</sup> )	0.6	36.0	6.3
Infiltración a los 60 minutos (cm h <sup>-1</sup> )	0.9	42.0	8.1
Precipitación durante el ciclo del cultivo (mm)	407	493	450
Humedad disponible media del suelo de 0 a 20 cm, en tres quincenas antes de la floración femenina (%)	8.6	16.2	11.4
Humedad disponible media del suelo de 0 a 20 cm, en tres quincenas después de la floración femenina (%)	2.2	15.5	11.0
Fecha de siembra (días julianos)	164	183	175
Densidad de plantas (plantas ha <sup>-1</sup> ):			
sin fertilización	22 135	50 000	41 150
con fertilización	20 182	50 347	41 878

fertilización dio un rendimiento muy alto (atípico), varió, en el tratamiento sin fertilización, de 0 a 2994 kg ha<sup>-1</sup> para grano y de 21 a 6562 kg ha<sup>-1</sup> para paja; y en el tratamiento con fertilización, de 0 a 5512 kg ha<sup>-1</sup> para grano y de 62 a 9149 kg ha<sup>-1</sup> para paja. El bajo rendimiento, tanto de grano como de paja, observado en algunos lotes experimentales, se asoció, en mayor o menor medida, con la sequía que se presentó en ellos.

### Relación entre Rendimiento de Maíz y Características y Propiedades del Suelo, Precipitación, Humedad del Suelo y Manejo

La relación entre el rendimiento de grano y de paja de maíz y las características y propiedades del suelo, precipitación, humedad del suelo y manejo del cultivo se estimó mediante una función de producción de manera conjunta para los tratamientos sin y con

fertilizante. En estos términos, las funciones de producción obtenidas para grano y paja son:

- Función de producción para grano:

$$YG = - 869.17 - 393.93 D^{0.25} + 0.86902 (P-16)^{1.5} + 0.83478 (M-0.13) + 171.24 (A-8.6) + 187.61 (H-8.6) + 16.949 (L-16) + 71.384 V + 1.2088 (M-0.13) (P-16)^{1.5} V$$

(CME = 257 161, Pr.F = 0.01, R<sup>2</sup> = 0.846)

donde: YG es el rendimiento de grano de maíz (kg ha<sup>-1</sup>), D es la pendiente del suelo (%), P es la profundidad del suelo (cm), M es la materia orgánica del suelo de 0 a 20 cm (%), A es la humedad aprovechable del suelo de 0 a 20 cm (% en peso), H es la humedad disponible media del suelo durante 45 días antes de la floración femenina de 0 a 20 cm (% en peso), L es la precipitación en el primer mes después de la siembra (mm), V es una variable auxiliar para fertilización inorgánica, y los valores numéricos de las variables dentro del paréntesis son los valores mínimos observados de la variable en cuestión. CME = cuadrado medio del error, Pr.F = probabilidad de F, R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación múltiple.

- Función de producción para paja:

$$YP = 121.54 - 1483.2 D^{0.25} + 7.5972 (P-16) + 8.4933 (M-0.13)(P-16) + 493.15 (A-8.6) + 358.49 (H-8.6) + 27.610 (L-16) + 213.99 V + 11.169 (M-0.13)(P-16) V$$

(CME = 665 373, Pr.F = 0.01, R<sup>2</sup> = 0.871)

donde: YP es el rendimiento de paja de maíz (kg ha<sup>-1</sup>) y las demás variables son las mismas que para la función de producción de grano.

Las variables que quedaron incluidas en las funciones de producción de grano y de paja son las mismas y, de acuerdo con las funciones, aquellas que afectaron al rendimiento del maíz fueron: pendiente del suelo, profundidad del suelo, interacción entre la profundidad y la materia orgánica del suelo, humedad aprovechable del suelo, humedad disponible del suelo durante 45 días antes de la floración femenina, precipitación en el primer mes después de la siembra, fertilización inorgánica, e interacción entre la profundidad y materia orgánica del suelo y la fertilización inorgánica.

De estas variables interesa el análisis de aquellas que tienen relación con la erosión del suelo, esto es, la pendiente y profundidad del suelo (Cuadro 1), a la vez que la materia orgánica del suelo que, aunque no

presentó relación con la erosión del suelo (Cuadro 1), también se consideró en términos de que esta relación suele presentarse en muchas condiciones, la interacción que resultó entre la materia orgánica y profundidad del suelo, y los valores extremos de la materia orgánica del suelo observados. Por su parte, debido a la interacción entre la materia orgánica y profundidad del suelo y la fertilización inorgánica, el análisis se hace en función de esta fertilización inorgánica.

La pendiente del suelo corresponde a una variable que interviene en la erosión de los suelos con cultivo, como fue en el presente caso (Cuadro 1), y su efecto sobre el rendimiento de los cultivos puede deberse al mayor escurrimiento del agua de lluvia que causa, y, por lo tanto, menor infiltración de ella en el suelo, lo que puede favorecer la deficiencia de agua para los cultivos de temporal en suelos delgados. En el presente caso, la pendiente presentó una correlación negativa con la humedad disponible del suelo durante 45 días antes de la floración femenina ( $r = -0.530$ ,  $P = 0.01$ ). Otro posible efecto de la pendiente del suelo puede ser a través de su relación con la erosión, ya que los suelos con mayor pendiente se encontraron más erosionados (Cuadro 1) y, por lo tanto, tendieron a presentar menores valores de materia orgánica (Cuadro 1) y probablemente de fertilidad, como normalmente ocurre.

La profundidad del suelo puede afectar el rendimiento de los cultivos a través de un menor almacenamiento de agua en los suelos delgados. En el presente caso, 35.5% de los suelos tuvieron profundidades mayores que 90 cm, 35.5% entre 46 y 90 cm y 29.0% menores que 46 cm, que se relacionaron con la erosión (Cuadro 1), lo que pudo afectar el rendimiento, aunque no se observó alguna interacción entre la profundidad del suelo y las variables relacionadas con la humedad para el cultivo. Otro efecto de la profundidad del suelo sobre el rendimiento puede deberse a la menor erosión y pérdida de horizontes superficiales en los suelos más profundos y, en consecuencia, a una mayor fertilidad de ellos, puesto que se observó una estrecha relación entre una mayor profundidad del suelo y una menor erosión de éste (Cuadro 1).

Las variables pendiente y profundidad del suelo, que tienen relación con la erosión (Cuadro 1), presentan alguna correlación entre ellas ( $r = -0.656$ ,  $P = 0.01$ ), por lo que el hecho de que ambas afecten al rendimiento significaría que este efecto sería a través de mecanismos diferentes.

La interacción positiva entre la profundidad del suelo y la materia orgánica del suelo, mayor en el tratamiento con fertilización, se debería a que la materia orgánica muestra su mayor efecto positivo sobre el rendimiento a medida que la profundidad del suelo se va haciendo mayor y, por lo tanto, menos limitativa.

La fertilización inorgánica, de N, P y K en el presente caso, suele tener efecto sobre el rendimiento de los cultivos en prácticamente todos los suelos, de tal manera que su efecto era esperado, aunado a que muchos de los suelos considerados se encuentran erosionados y son de baja fertilidad; sin embargo, el efecto positivo de la fertilización con N, P y K se manifestó en mayor medida a través de la interacción entre la profundidad y materia orgánica del suelo.

Las demás variables incluidas en las funciones de producción de grano y de paja, como la humedad aprovechable del suelo, la humedad disponible del suelo durante 45 días antes de la floración femenina, la precipitación en el primer mes después de la siembra, aunque afectan el rendimiento del maíz y permitieron el mejor ajuste de las funciones de producción, no presentan relación con la erosión del suelo, por lo cual no se analizarán.

### Efecto de Pendiente, Profundidad y Materia Orgánica del Suelo sobre el Rendimiento

A partir de las funciones de producción de grano y de paja, se estimó la reducción del rendimiento del maíz debida a la pendiente, profundidad y materia orgánica del suelo, a sus valores medios por clase de erosión del suelo, y para con y sin fertilización

inorgánica, a los valores medios de las demás variables que se encontrasen incluidas en las funciones de producción (Cuadros 3, 4 y 5). En el caso de la materia orgánica, cuya relación con la erosión es no significativa, se consideraron, además, los valores más altos y más bajos observados en los suelos estudiados, con la finalidad de estimar el efecto potencial de la pérdida de ella sobre el rendimiento del maíz.

El efecto de reducción del rendimiento del maíz de la pendiente del suelo se hace notorio para la pendiente media de 10% de la clase de erosión severa, para la cual, en relación con la pendiente media de 2.1% de la clase de erosión ligera, llega a ser del orden de 29 y 20% para grano y los tratamientos con y sin fertilización, respectivamente; y 35 y 28% para paja y los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente.

La disminución de la profundidad del suelo presentó un efecto importante de reducción del rendimiento del maíz, siendo de 53 a 54% y de 85% para la profundidad de 61 y 26 cm de las clases de erosión moderada y severa, respectivamente, con respecto a la profundidad de 99 cm de la clase de erosión ligera, para grano y los tratamientos sin y con fertilización; y para paja, las correspondientes reducciones fueron de 21 a 24% y de 40 a 46% para los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente.

El efecto de reducción del rendimiento del maíz de la pérdida de materia orgánica del suelo resultó de ligera magnitud para el contenido medio de 0.80 y 0.65% de las clases de erosión moderada y severa, respectivamente, en comparación con el contenido medio de 0.95% de la clase de erosión ligera, con valores de: para grano, 7 y 13% y 10 y 19% para

**Cuadro 3.** Reducción estimada del rendimiento de maíz por efecto de la pendiente del suelo, asociada a las clases de erosión del suelo: ligera, moderada y severa.

Pendiente media %	Grano			Paja		
	Rendimiento medio kg ha <sup>-1</sup>	Reducción <sup>†</sup> kg ha <sup>-1</sup>	%	Rendimiento medio kg ha <sup>-1</sup>	Reducción <sup>†</sup> kg ha <sup>-1</sup>	%
Sin fertilizante						
2.1	774			2415		
3.0	730	44	6	2249	166	7
10.0	547	227	29	1563	852	35
Con fertilizante						
2.1	1149			3019		
3.0	1105	44	4	2852	167	6
10.0	923	226	20	2167	852	28

<sup>†</sup> Reducción con respecto a la clase de erosión ligera.

**Cuadro 4. Reducción estimada del rendimiento de maíz por efecto de la disminución de la profundidad del suelo, asociada a las clases de erosión del suelo: ligera, moderada y severa.**

Profundidad media cm	Grano			Paja		
	Rendimiento medio kg ha <sup>-1</sup>	Reducción <sup>†</sup> kg ha <sup>-1</sup>	%	Rendimiento medio kg ha <sup>-1</sup>	Reducción <sup>†</sup> kg ha <sup>-1</sup>	%
Sin fertilizante						
99	1212			2429		
61	564	648	53	1924	505	21
26	178	1034	85	1459	970	40
Con fertilizante						
99	1896			3264		
61	879	1017	54	2475	789	24
26	275	1621	85	1748	1516	46

<sup>†</sup> Reducción con respecto a la clase de erosión ligera.

**Cuadro 5. Reducción estimada del rendimiento de maíz por efecto de la pérdida de materia orgánica del suelo, asociada a las clases de erosión del suelo: ligera, moderada y severa, y valores extremos de ella.**

Materia orgánica media %	Grano			Paja		
	Rendimiento medio kg ha <sup>-1</sup>	Reducción <sup>†</sup> kg ha <sup>-1</sup>	%	Rendimiento medio kg ha <sup>-1</sup>	Reducción <sup>†</sup> kg ha <sup>-1</sup>	%
Sin fertilizante						
0.95	715			2083		
0.80	668	47	7	2017	66	3
0.66	624	91	13	1955	128	6
1.60	918			2370		
0.20	480	438	48	1752	618	26
Con fertilizante						
0.95	1158			2774		
0.80	1043	115	10	2620	154	6
0.66	936	222	19	2477	297	11
1.60	1656			3438		
0.20	583	1073	65	2007	1431	42

<sup>†</sup> Reducción con respecto a: la clase de erosión ligera; y entre el valor máximo y mínimo de materia orgánica observados.

ambos tratamientos de fertilización, respectivamente; y, para paja, 3 y 6% y 6 y 11% para los mismos tratamientos de fertilización, respectivamente.

La variación del contenido medio de materia orgánica entre las clases de erosión resulta ser del orden de 0.15%, lo que, en gran parte, puede explicar la baja reducción del rendimiento debido a su pérdida por la erosión. Sin embargo, al considerar los valores extremos de disminución de materia orgánica del suelo, del orden de 1.60 a 0.20%, la reducción fue de: para grano, 48 y 65% para ambos tratamientos de fertilización, respectivamente; y, para paja, 26 y 42% para los mismos tratamientos de fertilización, respectivamente.

El efecto de la erosión sobre las características y propiedades del suelo, y de reducción del rendimiento de los cultivos, se ha reportado en numerosos trabajos en el mundo y también, aunque en menor medida, en México, como se mencionó previamente,

observándose diferencias de acuerdo con las condiciones propias de cada caso. En los aspectos en que existen menos resultados reportados es sobre las características y propiedades del suelo que son afectadas por la erosión, que pueden explicar el efecto de reducción del rendimiento de los cultivos de ésta. En el presente caso, el efecto de reducción del rendimiento del maíz por la erosión en la zona de Yanhuitlán, región Mixteca Oaxaqueña, se debería fundamentalmente a la disminución de la profundidad del suelo que ha originado, en cambio no se debería a la ligera pérdida de la materia orgánica. Por su parte, el efecto de reducción del rendimiento del maíz de la pendiente del suelo, que es causal de la erosión y se asoció con ella, tendría una explicación propia a través de reducir la infiltración de agua en el suelo o indirecta a través de su asociación con una menor fertilidad de los suelos más erosionados.

De acuerdo con la importancia que tienen las variables profundidad y pendiente del suelo, asociadas con la erosión, en el rendimiento del maíz en los suelos con cultivo en el área del municipio de Yanhuitlán, región Mixteca de Cárdenas, una medida sería evitar la siembra en terrenos con pendientes elevadas; sin embargo, ante la necesidad que muchos productores tienen de sembrarlos, debido a su escasez de tierra, sería necesario implementar la práctica de construcción de terrazas, que muchos productores ya han desarrollado. No obstante, esto requeriría de un programa de apoyo a los productores con menor disponibilidad de tierra debido a que usualmente realizan actividades extrapredio o no disponen del capital que implicaría la construcción de terrazas.

### CONCLUSIONES

- La pendiente media del suelo, relacionada con las clases de erosión ligera con 2.1%, moderada con 5.0%, y severa con 10.0%, causó reducciones del rendimiento de maíz de ésta última con respecto a la primera, de 29 a 20% para grano y de 35 a 28% para paja, para los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente.
- La disminución de la profundidad media del suelo, en relación con las clases de erosión ligera con 99 cm, moderada con 61 cm, y severa con 26 cm, llegó a ser del orden de: para grano, 53 a 54% y 85%, y, para paja, 21 a 24% y 40 a 46%, para las clases de erosión moderada y severa, respectivamente, y los tratamientos sin y con fertilización.
- La materia orgánica del suelo presentó un efecto ligero sobre el rendimiento del maíz, de acuerdo con sus valores medios en las clases de erosión moderada de 0.80%, y severa de 0.66, en relación con un valor medio de 0.95% de la clase ligera, aunque al considerar los valores extremos de materia orgánica observados, de 1.60 y 0.20%, se estimó un efecto de reducción de 48 a 65% para grano y de 26 a 42% para paja, para los tratamientos sin y con fertilización.
- Considerando la presencia de erosión de ligera a severa en el área del municipio de Yanhuitlán, y el efecto de ésta sobre en especial la profundidad y el contenido de materia orgánica del suelo, se observa el gran efecto que ella puede tener sobre el rendimiento del maíz.

### LITERATURA CITADA

- CSTPA (Council on Soil Testing and Plant Analysis). 1980. Handbook on reference methods for soil testing. Athens, GA.
- Dregne, H.E. 1987. Soil erosion: cause and effect. *Land Use Policy* 4: 412-418.
- Dregne, H.E., M. Kassas y B. Rosanov. 1991. A new assessment of the world status of desertification. *UNEP Desertification Control Bull.* 20: 6-18.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.
- Frausto-Reyes, J.V., V. Volke-Haller, B. Figueroa-Sandoval, N. Estrella-Chulín y H. Vaquera-Huerta. 1991. Estimación de la erosión hídrica laminar. Caso: Paraje Zaayucuanino, del Distrito de Nochixtlán, Oax. *Agrociencia, Serie Agua-Suelo-Clima* 2(3): 83-96.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Cuarta edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- González-Mateos, R., C.A. Ortiz-Solorio, V. Volke-Haller, J. González-Ríos y F. Manzo-Ramos. 2003. Conocimiento local de pequeños productores sobre la erosión del suelo en el Ejido El Tomatal, Guerrero, México. *Terra* 21: 245-258.
- Huitzhunsen, F.J. 1993. Land degradation and sustainability of agricultural growth: some economic concepts and evidence from selected developing countries. *Agric. Ecosyst. Environ.* 46: 69-79.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1981. Carta Edafológica: México. Escala 1:1 000 000. pp. 152-169. *In: Atlas Nacional del Medio Físico.* Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1994. XI Censo de Población y Vivienda, 1990. Resumen General. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) - SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1998. Estadísticas del medio ambiente. México, 1997. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas). 1984. Guía para la asistencia técnica agrícola. Área de influencia del Campo Experimental Mixteca Oaxaqueña. Nochixtlán, Oaxaca, México.
- Kidd, C. y D. Pimentel. 1992. *Integrated resource management.* Academic Press. New York.
- López-Martínez, J. y M. Anaya-Garduño. 1994. Efecto de tres prácticas agronómicas sobre la conservación y productividad de suelos de ladera de La Fraylesca, Chiapas. *Agric. Téc. en México* 20: 113-132.
- María-Ramírez, A. y V. Volke-Haller. 1999. Estratificación del potencial productivo del maíz en la región oriente del estado de Tlaxcala. *Terra* 17: 131-138.
- Martínez-Calleja, M.D., E. Sierra-Cortés, G. Narváez-Carbajal, J.W. Estrada-Berg, N. Ramírez-Pérez, M. Vázquez-Guzmán y J. Romero-Peñaloza. 1986. Levantamiento fisiográfico y evaluación de la erosión de las Mixtecas Oaxaqueñas Alta y Baja. Universidad Autónoma Chapingo-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Chapingo, estado de México.
- Morgan, R.P.C. 1997. *Erosión y conservación del suelo.* Trad. al español por P. Urbano-Terrón y J. de M. Urbano-López de Meneses. Mundi-Prensa. México, D.F.

- Pérez-Nieto, J., V. Volke-Haller, M. Martínez-Menes y N. Estrella-Chulín. 1998. Erosión, productividad y rentabilidad de dos suelos del estado de Oaxaca. *Agrociencia* 32: 113-118.
- Romero-P., J., L. García-B., D. Martínez-C., J.C. Ramírez-G. y C. Ramírez-M. 1986. Diagnóstico de la producción agrícola de las Mixtecas Oaxaqueñas Alta y Baja. *Rev. Chapingo* 50-51: 52-57.
- SAS Institute, Inc. 1982. *SAS User's guide: statistics*. Cary, NC.
- Uribe-Gómez, S., N. Francisco-Nicolás y A. Turrent-Fernández. 2002. Pérdida de suelo y nutrientes en un Entisol, con prácticas de conservación en Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36: 161-168.
- USDA (United States Department of Agriculture) – SCS (Soil Conservation Service). 1990. *Soil erosion by water*. Agriculture Information Bulletin 513. Washington, DC.
- Villar-Sánchez, B., J. López-Martínez, J. Pérez-Nieto y R. Camas-Gómez. 2003. Aplicación del modelo de simulación EPIC en la predicción del efecto de sistemas de labranza del suelo. *Terra* 21: 381-388.

# RESPUESTA DEL PAPAYO A LA FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN UN LUVISOL

Response of Papaya Tree to Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilization in a Luvisol

J. Emilio Bueno-Jáquez<sup>1‡</sup>, Alejandro Alonso-López<sup>1</sup>, Víctor Volke-Haller<sup>2</sup>, Felipe Gallardo-López<sup>3</sup>, M. Miguel Ojeda-Ramírez<sup>4</sup> y Raúl Mosqueda-Vázquez<sup>1</sup>

## RESUMEN

En condiciones de campo, se evaluaron tratamientos de fertilización con N, P y K, para determinar la respuesta del papayo (*Carica papaya* L.) en términos de crecimiento, rendimiento y dosis óptima económica en un Luvisol de la región Central Costera del estado de Veracruz, México. Los factores y dosis de estudio fueron: nitrógeno (N), 0, 150, 300 y 450 kg ha<sup>-1</sup>; fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 0, 65, 130 y 195 kg ha<sup>-1</sup>; y potasio (K<sub>2</sub>O), 0, 150, 300 y 450 kg ha<sup>-1</sup>. Los factores y sus dosis se combinaron en un diseño de tratamientos San Cristóbal, que comprende 12 tratamientos distribuidos en un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. Las variables en estudio fueron: altura de planta, ancho del dosel, circunferencia de tallo y rendimiento de fruto con valor comercial acumulado de 23 cosechas. Los análisis de varianza para las variables de crecimiento, indican efecto significativo de tratamientos para altura de planta, ancho del dosel y circunferencia de tallo a 142 días, para ancho del dosel y circunferencia de tallo a 262 días, y para circunferencia de tallo a 382 días después del trasplante. La respuesta anterior se debió a que las aplicaciones de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), en general, superaron las variables de crecimiento en comparación con aquellos tratamientos que no recibieron fertilización fosfatada. El análisis de regresión determinó una función de respuesta con efecto del nitrógeno y fósforo sobre el rendimiento de fruto. Se concluyó que

el rendimiento óptimo económico fue de 91.787 t ha<sup>-1</sup>, con una fertilización de 220 kg ha<sup>-1</sup> de N y 145 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que generó un ingreso neto de \$ 112 853.10 ha<sup>-1</sup> y una tasa de retorno al capital total de 454%.

**Palabras clave:** *Carica papaya* L., fertilizantes, función de producción.

## SUMMARY

Under field conditions, fertilization treatments with N, P, and K were evaluated to determine the response of papaya tree (*Carica papaya* L.) in terms of growth, yield, and optimum economic dose in a Luvisol in the central coastal region of Veracruz, Mexico. In this study, the factors with their respective levels were nitrogen (N), 0, 150, 300, and 450 kg ha<sup>-1</sup>; phosphorus (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 0, 65, 130, and 195 kg ha<sup>-1</sup>; and potassium (K<sub>2</sub>O), 0, 150, 300, and 450 kg ha<sup>-1</sup>. The factors and their respective levels were combined in a design of San Cristobal treatments, which comprised 12 treatments distributed at random in an experimental design of blocks with three replicates. The variables under study were plant height, canopy width, stem circumference, and fruit yield with accumulated commercial value of 23 harvests. The variance analyses for growth variables showed significant treatment effect for plant height, canopy width and stem circumference in 142 days after transplant; for canopy width and stem circumference in 262 days after transplant, and for stem circumference in 382 days after transplant. Such a response was due to the fact that phosphorus applications (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) in general were above the growth variables in comparison to those treatments which did not include phosphorus fertilization. The regression analysis determined a response function with nitrogen and phosphorus effect on fruit yield. It was concluded that 91.787 t ha<sup>-1</sup> was the optimum economic yield obtained with a fertilization of 220 kg ha<sup>-1</sup> N and 145 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, generating \$112 853.10 ha<sup>-1</sup> as net income and 454% as total capital rate of return.

<sup>1</sup> Campus Veracruz, Colegio de Postgraduados. Veracruz, Veracruz, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (bujemx@yahoo.com.mx)

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

<sup>3</sup> Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. Cárdenas, Tabasco, México.

<sup>4</sup> Facultad de Estadística e Informática, Universidad Veracruzana. Jalapa, Veracruz, México.

Recibido: Abril de 2003. Aceptado: Octubre de 2004.

Publicado como nota de investigación en

Terra Latinoamericana 23: 409-415.

*Index words:* Carica papaya L., fertilizers, yield functions.

## INTRODUCCIÓN

En México, el papayo (*Carica papaya* L.) ocupa el vigésimo tercer lugar entre los cultivos perennes con una superficie cosechada de 17 156 ha y una producción de 672 377 t. El estado de Veracruz es el productor más importante con una superficie cosechada de 5194 ha y una producción de 160 454 t, lo que da un promedio de 30.892 t ha<sup>-1</sup>, rendimiento que es inferior a la media nacional, con un valor de 33.319 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA, 2000). El papayo se produce en Veracruz en condiciones principalmente de temporal (91.3%), en las cuales se tiene una producción promedio de 30.387 t ha<sup>-1</sup>, que puede considerarse baja. Para incrementar esta producción se requiere mejorar el manejo en número de plantas, fertilización nitrogenada, fosfórica y potásica, entre otros factores.

El N es esencial para la utilización de los carbohidratos, además de estimular el desarrollo y crecimiento de la planta; el P tiene su efecto más importante en la fotosíntesis, floración, fructificación, formación de semilla, maduración del fruto y desarrollo de raíces; el K es un activador de las enzimas responsables de la síntesis de almidón, reducción de nitratos y degradación de azúcares, también incrementa la resistencia del cultivo a las enfermedades y aumenta el número de frutos (Brady, 1990).

Muchos trabajos se han realizado para determinar cómo afecta el N, P y K al cultivo del papayo. Con relación a N, Reddy *et al.* (1990) encontraron que este elemento adelanta la floración e incrementa, de una manera significativa, la producción de frutos y concluyeron que 250 g planta<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de N es la dosis óptima para tener una producción de 56.640 t ha<sup>-1</sup> en un periodo de 12 meses. En cambio, Werner (1992), en un intervalo de aplicación de 50 a 150 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de N, encontró un incremento en la producción del cultivo de papayo en forma lineal. Por su parte, Purohit (1977), en un suelo limo-arenoso, encontró que 191 y 382 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aumentaron significativamente la producción en comparación con las plantas testigo. En cambio, Awada *et al.* (1975) encontraron, en un suelo ácido en Poamoho, Hawai, que la fertilización con P incrementó la velocidad de crecimiento de la circunferencia de los tallos en la etapa inicial de crecimiento; sin embargo,

el incremento en producción de frutos comerciales no fue significativo por el aporte de los fertilizantes fosfatados. En relación con K, una aplicación de 72 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O dio una producción de 100 kg planta<sup>-1</sup> en Puna, Hawai (Awada, 1977).

La cantidad y el tipo más adecuado de fertilizante por utilizar depende del cultivo, del clima, de los factores económicos y de las prácticas agronómicas (Thompson y Troeh, 1980). Un plan de fertilización para plantaciones de papayo de 2000 plantas ha<sup>-1</sup> entre seis y 12 meses es entre 40-60, 80-120 y 30-60 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O, respectivamente (Chirinos, 1999). En tanto que De los Santos-de la Rosa *et al.* (2000), en plantaciones de temporal para el estado de Veracruz, recomendaron aplicar al suelo el tratamiento de fertilización 115-65-100 (kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O). Sin embargo, debido a las condiciones agronómicas variables en las cuales debe desarrollarse el cultivo del papayo, es necesario determinar para cada condición, la dosis óptima de fertilización que maximice el rendimiento del cultivo.

Por lo anterior, y ante la falta de una dosis óptima económica para papayo Maradol cuya superficie cultivada se ha incrementado, es necesario determinar la dosis óptima, pues las recomendaciones sobre fertilización para la región central costera del estado de Veracruz se han realizado básicamente para la variedad de papayo tipo Cera.

El objetivo de esta investigación fue determinar la respuesta del papayo a N, P y K, en términos de crecimiento, rendimiento y dosis óptima económica, en un Luvisol de la región central costera del estado de Veracruz, México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en una parcela del ejido Paso San Juan, Veracruz, México, ubicada en el km 20 de la carretera nacional libre Veracruz-Jalapa, en la región central costera del estado de Veracruz, localizada a 19° 11' N y 96° 17' O, con una altitud de 18 m.

El suelo es un Luvisol (INEGI, 1988) y el clima, según la clasificación de Köppen, modificada por García (1987), es del tipo Aw<sub>1</sub>(w)(i)g, que corresponde a un clima cálido húmedo, con una relación P/T que varía de 43.2 a 55.3, un porcentaje de lluvia invernal menor que 5, oscilación anual de las temperaturas medias mensuales de 5 a 7 °C, el mes más caliente se presenta en mayo, con lluvias anuales del orden de 1050 a 1200 mm. Los valores medios

anuales para temperatura, evaporación y humedad relativa son del orden de 27.8 °C, 1600 mm y 82%, respectivamente. En el sitio experimental, del trasplante a la última cosecha, se tuvo una temperatura promedio de 22.1 °C con una precipitación y evaporación de 1226 y 1543 mm, respectivamente.

Después de la preparación del terreno y antes del trasplante, se realizó el muestreo del suelo a una profundidad de 30 cm en cinco puntos del área experimental, para posteriormente obtener una muestra compuesta. En el Cuadro 1, se encuentran los resultados del análisis físico-químico del suelo. De acuerdo con lo señalado por Vázquez (1996), se trata de un suelo con textura arena migajosa, ligeramente ácido, medianamente pobre en materia orgánica y N total, alto en P y K, sin problemas de sales. De acuerdo con Viets y Lindsay (1973), el Fe y Mn resultaron altos, Zn adecuado y Cu deficiente.

La variedad de papayo utilizada fue Maradol Roja, sembrada para germinación el 19 de diciembre de 2000 en invernadero en vasos de plástico Número 14, utilizando como sustrato germinaza y lombricomposta en proporción de 75 y 25%, respectivamente. Antes de iniciar la emergencia y durante el desarrollo de las plántulas, se proporcionaron riegos diarios. Cuando la mayoría de las plántulas tuvieron dos o más hojas se iniciaron aplicaciones de Captan cada siete días y del fertilizante foliar Gro-Green a razón de 1 y 0.5 g L<sup>-1</sup> de agua, respectivamente. Para el control de hormigas, gusanos y otros insectos, se realizaron en el almácigo aspersiones de Malation cada 15 días, utilizando 1.5 mL L<sup>-1</sup> de agua.

Los factores en estudio y sus dosis fueron: nitrógeno, 0, 150, 300 y 450 kg ha<sup>-1</sup>; fósforo, 0, 65, 130 y 195 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; y potasio, 0, 150, 300 y 450 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, los cuales se definieron considerando las recomendaciones de fertilización, reportadas por De los Santos *et al.* (2000), para papayo tipo Cera y, además, como referencia, los valores de extracción de N y K indicados por Cunha y Haag (1980), que correspondieron a 150 kg ha<sup>-1</sup> de N y 140 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, realizando los ajustes por el número de plantas ha<sup>-1</sup>, definiendo así los niveles de los factores para determinar una superficie de respuesta en función de NPK. Los factores y sus dosis se combinaron en un diseño de tratamientos San Cristóbal (Rojas, 1981; Martínez-Garza, 1988), con 12 tratamientos (Cuadro 2). En el sitio experimental, los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones.

**Cuadro 1. Resultados del análisis físico-químico del suelo del sitio experimental.**

Determinación	Valor	Método de análisis
pH	6.07	Potenciómetro (Jackson, 1964) (relación suelo-agua 1:2)
MO <sup>†</sup> (%)	1.56	Walkley-Black (Jackson, 1964)
N total (%)	0.073	Macrokjeldahl (Bremner, 1965)
P (mg kg <sup>-1</sup> )	25.0	Morgan (Jackson, 1964)
K (mg kg <sup>-1</sup> )	112.5	Morgan (Jackson, 1964)
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	21.7	DTPA (Lindsay y Norvell, 1978)
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	0.19	DTPA (Lindsay y Norvell, 1978)
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	0.70	DTPA (Lindsay y Norvell, 1978)
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	21.51	DTPA (Lindsay y Norvell, 1978)
Conductividad eléctrica (dS m <sup>-1</sup> )	0.01	Puente de Wheatstone (Richards, 1990) (relación suelo-agua 1:2)
Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	1.42	Método del petróleo (Anaya, 1978)
CC <sup>‡</sup> (%)	11.88	Olla de presión (Aguilera-Contreras y Martínez-Elizondo, 1996)
PMP <sup>§</sup> (%)	8.55	Membrana de presión (Aguilera-Contreras y Martínez-Elizondo, 1996)
Arena (%)	85.66	Bouyoucos (Bouyoucos, 1936)
Arcilla (%)	8.16	Bouyoucos (Bouyoucos, 1936)
Limo (%)	6.18	Bouyoucos (Bouyoucos, 1936)

<sup>†</sup>MO = materia orgánica, <sup>‡</sup>CC = capacidad de campo, <sup>§</sup>PMP = punto de marchitez permanente.

El experimento se estableció mediante trasplante el 19 de abril de 2001. El marco de plantación fue de 2.8 m entre hileras y de 1.6 m entre matas para tener una densidad de población de 2232 plantas ha<sup>-1</sup>. La unidad experimental estuvo conformada por tres hileras de 11.2 m de longitud, generando un área de 94.08 m<sup>2</sup> con 21 plantas; la parcela útil consistió de una hilera con cinco plantas y una superficie de 22.4 m<sup>2</sup>.

**Cuadro 2. Tratamientos considerando los factores y niveles de estudio.**

Tratamiento	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
1	0	0	0
2	0	0	300
3	0	130	0
4	0	130	300
5	300	0	0
6	300	0	300
7	300	130	0
8	300	130	300
9	150	65	150
10	450	65	150
11	150	195	150
12	150	65	450

La aplicación de los fertilizantes se realizó en forma fraccionada: la urea y el sulfato de potasio fueron aplicados 37.5, 37.5 y 25%, el 9 de mayo, 19 de julio y 29 de agosto de 2001, respectivamente, a 21, 92 y 133 días después del trasplante (DDT); el superfosfato triple de calcio, se aplicó 50 y 50%, el 9 de mayo y 19 de julio de 2001, a 21 y 92 DDT, respectivamente.

Como variables de respuesta, se consideraron el crecimiento de la planta y el rendimiento de fruto comercial. El crecimiento del cultivo se expresó en términos de la altura de planta (ALTP), medida desde la base del tallo hasta la parte terminal de las hojas superiores; el ancho del dosel (ADOS), midiendo la máxima amplitud del follaje perpendicular a las hileras de las plantas de papayo; y la circunferencia de tallo (CIRT), medida 10 a 15 cm arriba de la superficie del suelo; todas estas variables se evaluaron a 142, 262 y 382 DDT. La cosecha de fruto con valor comercial (rendimiento) se realizó semanalmente, del 5 de noviembre de 2001 al 8 de abril de 2002, durante un periodo de 157 días, acumulando 23 cortes.

Para determinar el efecto del N, P y K sobre las variables de respuesta, se practicó el análisis de varianza y la comparación de medias de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

Para el rendimiento de fruto, también se estimó una función de producción mediante análisis de regresión (Draper y Smith, 1998), considerando un modelo cuadrático como lo señaló Rojas (1981), para un diseño San Cristóbal. Con esta función de producción, se determinaron las dosis óptimas económicas de N, P y K, y el rendimiento óptimo

económico, el máximo ingreso neto y la tasa de retorno considerando el criterio económico de capital ilimitado. Para esto, se utilizó la ecuación de ingreso neto (Martínez y Martínez, 1999), la cual considera la diferencia entre los beneficios brutos y los costos fijos y variables de producción, y se expresa con la función multivariada:

$$IN = YP_Y - (P_1X_1 + P_2X_2 + P_3X_3 + C_0)$$

donde:  $IN$  es el ingreso neto;  $Y$  es el rendimiento de fruto;  $P_Y$  es el precio medio de mercado durante el periodo de cosecha;  $P_1X_1$ ,  $P_2X_2$  y  $P_3X_3$  son los precios unitarios de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente, los cuales incluyen costo, transporte y aplicación;  $C_0$  son los costos fijos de producción.

La tasa de retorno del capital total se determinó con la ecuación:

$$TRC = IN/(CV + C_0)$$

donde:  $TRC$  es la tasa de retorno al capital;  $CV$  son los costos variables dados por las aplicaciones de nitrógeno, fósforo y potasio y  $C_0$  son los costos fijos los cuales consideran preparación del terreno, trasplante, prevención de enfermedades y control de plagas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 3, se presentan los resultados de los tratamientos para las variables de crecimiento y

Cuadro 3. Efecto de tratamientos sobre las variables de crecimiento y rendimiento de papayo Maradol Roja.

Tratamiento	Variables de crecimiento <sup>†</sup>									Rendimiento t ha <sup>-1</sup>
	142 <sup>‡</sup>			262			382			
	ALTP	ADOS	CIRT	ALTP	ADOS	CIRT	ALTP	ADOS	CIRT	
	cm									
1	155.1 b <sup>§</sup>	227.9 bc	26.0 cd	178.6 a	167.0 ab	28.5 cd	184.8 a	87.8 a	29.4 b	36.086 de
2	154.5 b	234.4 abc	27.7 bcd	179.5 a	183.2 ab	29.6 bcd	185.2 a	90.0 a	29.9 b	40.825 cde
3	175.7 ab	247.7 abc	33.9 ab	205.1 a	203.7 ab	35.7 abc	209.1 a	93.2 a	39.1 a	56.618 abcde
4	172.5 ab	253.7 abc	33.7 ab	196.9 a	189.5 ab	35.0 abcd	185.7 a	77.0 a	35.1 ab	48.474 bcde
5	162.7 ab	228.8 bc	29.4 abcd	189.9 a	200.2 ab	32.6 abcd	189.1 a	80.3 a	33.0 ab	42.232 cde
6	150.1 b	215.9 c	24.9 d	162.2 a	152.7 b	26.7 d	174.1 a	87.8 a	29.8 b	32.641 e
7	180.1 ab	266.8 abc	35.2 a	201.3 a	187.1 ab	37.5 ab	202.3 a	78.1 a	37.4 ab	87.764 a
8	191.1 ab	281.0 ab	36.4 a	212.7 a	213.7 a	40.5 a	210.7 a	76.6 a	39.2 a	86.778 ab
9	201.7 a	288.2 a	35.5 a	214.7 a	201.4 ab	38.0 ab	196.9 a	78.4 a	35.2 ab	68.396 abcde
10	183.9 ab	271.3 ab	32.3 abc	203.3 a	192.9 ab	36.3 abc	185.4 a	68.2 a	33.6 ab	68.712 abcde
11	180.9 ab	269.5 abc	34.9 ab	198.0 a	203.2 ab	36.8 abc	197.4 a	85.4 a	37.2 ab	78.433 abc
12	191.2 ab	269.8 abc	33.0 abc	212.1 a	205.1 ab	36.9 abc	218.0 a	94.1 a	36.3 ab	73.180 abcd

<sup>†</sup> ALTP = altura de planta, ADOS = ancho del dosel, CIRT = circunferencia de tallo. <sup>‡</sup> Días después del trasplante.

<sup>§</sup> Medias con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

rendimiento de papaya, incluyendo la prueba de comparación de medias de Tukey.

Para altura de planta (ALTP), se encontró efecto significativo de tratamientos sólo a 142 días; efecto que fue debido a que el Tratamiento 9 superó la altura de planta de los Tratamientos 1, 2 y 6 sin aplicación de P, con excepción del Tratamiento 5, el cual presentó igual altura que los Tratamientos 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 fertilizados con P (Cuadro 3).

En relación con el ancho del dosel (ADOS), se encontró efecto significativo de tratamientos a 142 y 262 días. El efecto a 142 días es debido a que los Tratamientos 1, 5 y 6, sin aplicación de P, presentaron menor ancho del dosel que el Tratamiento 9 con aplicación de P, siendo los demás tratamientos iguales a este último. El efecto a 262 días es debido a que el Tratamiento 6 sin P, presentó menor ancho del dosel que el Tratamiento 8 con P (Cuadro 3).

En cuanto a la circunferencia de tallo (CIRT), se encontró efecto significativo de los tratamientos a 142, 262 y 382 días. El efecto a 142 días es debido a que los Tratamientos 1, 2, y 6 sin P, presentaron menor circunferencia de tallo que los Tratamientos 7, 8 y 9, con aplicación de P. El efecto a 262 días es debido a que los Tratamientos 1, 2 y 6 sin aplicación de P, presentaron menor circunferencia de tallo que el Tratamiento 8. El efecto a 382 días es debido a que los Tratamientos 1, 2 y 6 sin aplicación de P presentaron menor circunferencia de tallo que los Tratamientos 3 y 8 con aplicación de P (Cuadro 3).

De las comparaciones anteriores, puede señalarse que el efecto de los tratamientos sobre las variables ALTP, ADOS y CIRT está relacionado con los tratamientos que no recibieron P, en comparación con aquellos tratamientos con fertilización fosfatada. Singh y Sharma (1996) encontraron respuestas similares con aplicaciones de N y P en dosis de 0, 200, 250 y 300 g planta<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, para ambos nutrimentos. En tanto que Purohit (1977), en un suelo limo arenoso, encontró que las aplicaciones de N y P influyeron significativamente sobre la altura y diámetro del tallo, mientras que el K sólo lo hizo sobre el diámetro de tallo.

Para el rendimiento de fruto, si bien se tiene la comparación de medias, el análisis se realizó mediante regresión. En la Figura 1, de manera aproximada, se presentan las curvas de respuesta para el rendimiento del fruto del papayo al N, P y K para el diseño de tratamientos San Cristóbal, suponiendo que las respuestas son cuadráticas, como lo indicó Rojas (1981).

El modelo de regresión para el rendimiento como función del N, P y K obtenido es:

$$RF = 38.456 + 6.880 R1 - 2.208 R2 - 0.101 N + 0.481 P + 0.000327422 N^2 - 0.002870747 P^2 + 0.003398389 NP - 0.000008273 N^2P$$

(Prob. F = 0.0001, R<sup>2</sup> = 0.771, CME = 147.912749532, CV = 20.3%)

donde: RF es el rendimiento de fruto con valor comercial (kg ha<sup>-1</sup>), R1 y R2 son variables auxiliares para repeticiones, N y P son N y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicados en kg ha<sup>-1</sup>.

Del modelo de regresión obtenido se observa la siguiente respuesta: para N, lineal negativa y cuadrática positiva; para P, lineal positiva y cuadrática negativa; y una mayor respuesta lineal y cuadrática a N en presencia de P (interacción).

Con base en el modelo de regresión, se determinaron las dosis óptimas económicas, el rendimiento óptimo, el ingreso neto y la tasa de retorno. Para la determinación de las dosis óptimas económicas se consideraron: costo por unidad de fertilizantes: N, \$ 7.35; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, \$ 8.02; y K<sub>2</sub>O, \$ 9.34; costo fijo, \$ 22 048.85 ha<sup>-1</sup>; y el precio del fruto (papaya), \$1.50 kg<sup>-1</sup>.

Las dosis óptimas económicas de N, P y K que maximizan los ingresos netos, el rendimiento óptimo económico, el ingreso neto y la tasa de retorno del capital total se presentan a continuación:

Dosis óptimas económicas: N, 220 kg ha<sup>-1</sup>; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 145 kg ha<sup>-1</sup>; y K<sub>2</sub>O, 0 kg ha<sup>-1</sup>.

Rendimiento óptimo económico: 91.787 t ha<sup>-1</sup>

Ingreso neto: 112 853.10 pesos ha<sup>-1</sup>

Tasa de retorno del capital total: 454%

El valor de la tasa de retorno resulta superior a lo indicado por De la Cruz y Santiago (1990), quienes establecieron un valor mínimo de 40%; por lo tanto, de acuerdo con la tasa de retorno obtenida, resulta económica la aplicación de nitrógeno y fósforo sin el aporte de potasio.

Por lo tanto, para rendimiento de fruto y en las condiciones de estudio, se encontró respuesta a N y P, pero no a K. Para el caso del N y P, otros investigadores han reportado respuestas similares. Así, Awada y Long (1978), en Puna, Hawái, detectaron buena respuesta al evaluar niveles bajos, medios y altos de fertilización nitrogenada y fosfórica en papaya "Solo" y que la aplicación de estos fertilizantes incrementaron el rendimiento de fruto. La mejor respuesta la obtuvieron con 686 kg ha<sup>-1</sup> de N

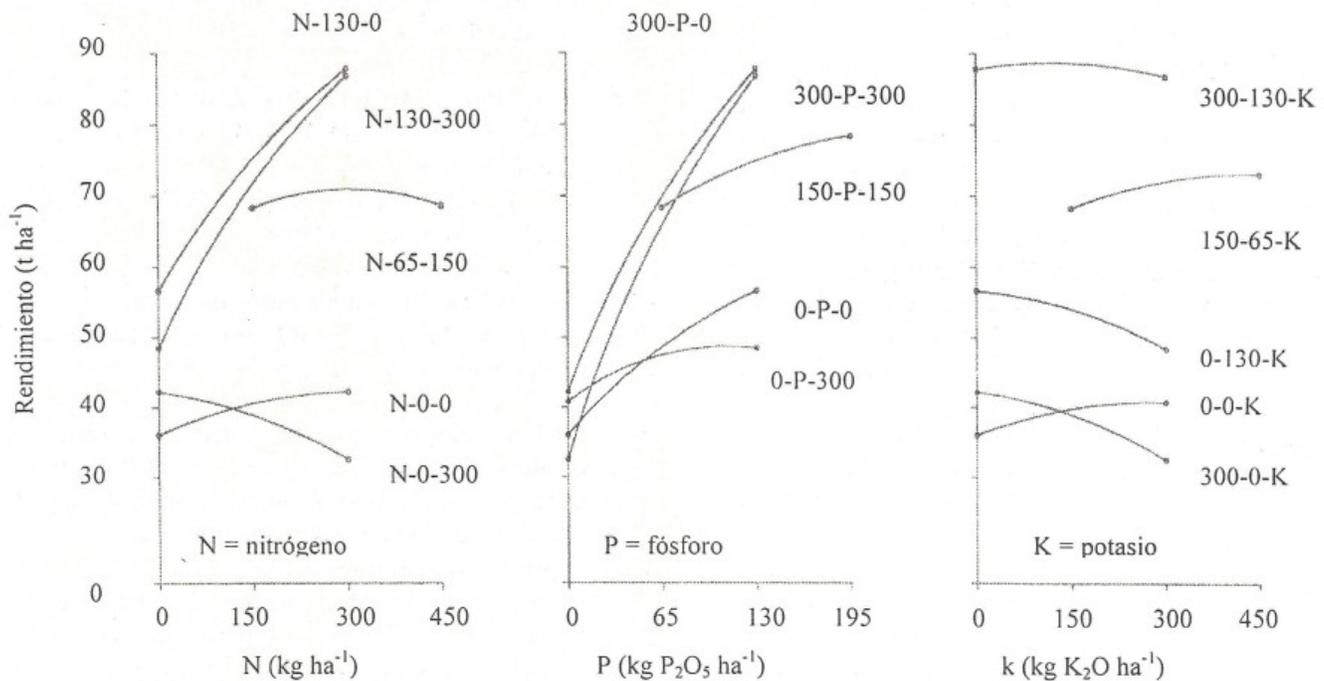


Figura 1. Respuesta del papayo a nitrógeno, fósforo y potasio sobre el rendimiento de fruto.

y con valores entre 41 y 186 kg ha<sup>-1</sup> para las aplicaciones de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. En cambio, la no-respuesta a K, no concuerda con lo reportado por otros investigadores. Por ejemplo, Awada y Long (1971), Awada (1977), Chirinos (1999) y De los Santos *et al.* (2000) han detectado respuesta positiva para las aplicaciones de K.

En general, para el cultivo del papayo De los Santos *et al.* (2000) recomendaron las aplicaciones de K. Sin embargo, la no-respuesta obtenida en este ensayo para dicho elemento, probablemente sea debido al contenido alto de K en el suelo (112 mg kg<sup>-1</sup>).

### CONCLUSIONES

- Con relación a las variables de crecimiento, se encontró que el fósforo incrementó la altura de planta a 142 días, el ancho del dosel a 142 y 262 días, y la circunferencia del tallo a 142, 262 y 382 días del trasplante, en comparación con aquellos tratamientos que no recibieron fertilización fosfatada.

- Con base en la función respuesta, se determinaron óptimos económicos de 220 kg ha<sup>-1</sup> de N y 145 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, rendimiento óptimo de 91.787 t ha<sup>-1</sup>, ingreso neto de 112 853 pesos ha<sup>-1</sup> y una tasa de retorno al capital total de 454%.

### LITERATURA CITADA

- Aguilera-Contreras, M. y R. Martínez-Elizondo. 1996. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Anaya-Garduño, M. 1978. Manual de prácticas de física de suelos. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, estado de México.
- Awada, M. 1977. Relations of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization to nutrient composition of the petiole and growth of papaya. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 102: 413-418.
- Awada, M. y C. Long. 1971. The selection of the potassium index in papaya tissue analysis. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 96: 74-77.
- Awada, M. y C. Long. 1978. Relation of nitrogen and phosphorus fertilization to fruiting and petiole composition of 'Solo' papaya. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 103: 217-291.
- Awada, M., R. Suehisa y Y. Kanehiro. 1975. Effects of lime and phosphorus on yield, growth, and petiole composition of papaya. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 100: 294-298.
- Bouyoucos, G.L. 1936. Direction for making mechanical analysis of soils by the hydrometer method. *Soil Sci.* 42: 3.
- Brady, N.C. 1990. The nature and properties of soils. MacMillan. New York.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. In: Black, C.A. (ed.). *Methods of soil analysis*. Agronomy 9. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Chirinos-Urbina, H. 1999. Fertilización de papayo (*Carica papaya* L.). *Info Agro* 1(5): 1-4.
- Cunha, R.J.P. y H.P. Haag. 1980. Mineral nutrition of papaya (*Carica papaya* L.). Nutrient uptake under field conditions. *Abstracts on Tropical Agric.* 8(4): 86.

- De la Cruz-Isidro, V. y M.J. Santiago-Cruz. 1990. La microempresa agropecuaria como instrumento de la modernización del agro. *Comercio Exterior* 42: 653-858.
- De los Santos-de la Rosa, F., E.N. Becerra-Leor, R. Mosqueda-Vázquez, A. Vásquez-Hernández y A.B. Vargas-García. 2000. Manual de producción de papaya en el estado de Veracruz. Campo Experimental Cotaxtla. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Veracruz. Veracruz, México.
- Draper, N.R. y H. Smith. 1998. Applied regression analysis. John Wiley. New York.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1988. Síntesis geográfica, nomenclátor y anexo cartográfico del estado de Veracruz. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Trad. al español por J. Beltrán M. Editorial Omega. Barcelona, España.
- 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.
- Martínez-Garza, M.A. 1988. Diseños experimentales: métodos y elementos de teoría. Trillas. México, D.F.
- Martínez-Garza, M.A. y M.A. Martínez-Damián. 1999. Optimización: análisis marginal. Departamento de Economía, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Purohit, A.G. 1977. Response of papaya (*Carica papaya* L.) to nitrogen, phosphorus and potassium. *Indian J. Hort.* 34: 350-353.
- Reddy, Y.T.N., R.R. Kohli y B.S. Bhargava. 1990. Growth, yield and petiole nutrient composition of papaya as influenced by different levels of nitrogen. *Abstracts on Tropical Agric.* 16(4-6): 80.
- Richards, T.L. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Limusa. México, D.F.
- Rojas-Martínez, B.A. 1981. Planeación y análisis de los experimentos de fertilizantes. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2000. pp. 670-775. *In: Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos*. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. México, D.F.
- Singh, I.P. y C.K. Sharma. 1996. Response of papaya to N and P applications on tilla land in Tripura India. *J. Hill Res.* 9: 96-98.
- Thompson, L.M. y F.R. Troeh. 1980. Los suelos y su fertilidad. Trad. al español por J. Puigdefábregas. Editorial Reverté. Barcelona, España.
- Vázquez-Alarcón, A. 1996. Guía para interpretar el análisis químico del agua y del suelo. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Viets, F.G. y W.L. Lindsay. 1973. Testing soils for zinc, copper, manganese and iron. pp. 153-172. *In: Walsh, L.M. y J.D. Beaton (eds.). Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Werner, H. 1992. Response of papaya cv Tainung 2 at different sources, levels and application intervals of nitrogen. *Proc. Interamer. Soc. Trop. Hort.* 37: 94-98.

# ESQUEMA DE ORGANIZACIÓN DE SITIOS FORESTALES RECREATIVOS DESDE LA PERSPECTIVA DE LA POBLACIÓN LOCAL

## Framework of Forest Recreation Sites from Local Perspective

Eliseo Cantellano-de Rosas<sup>1†</sup> y Carlos A. Ortiz-Solorio<sup>2</sup>

### RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la percepción local de la recreación forestal en los parques nacionales "El Chico", estado de Hidalgo y "Desierto de los Leones", Distrito Federal, con base en los motivos de visita de los turistas y los servicios recreativos que ahí se ofrecen. El esquema de organización de sitios recreativos más empleado a escala internacional es el Espectro de Oportunidades Recreativas (EOR) desarrollado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América, sin embargo, es necesario realizar una investigación para evaluar su pertinencia y aplicación local. Se efectuaron encuestas a visitantes y entrevistas a los prestadores de servicios en ambos parques, así como análisis exploratorio y multivariado de datos, para conocer la relación entre los sitios y sus características físicas. Los resultados contrastan con el esquema de planeación EOR, porque no existe una clara distinción entre los motivos de visita ni un gradiente de tipo de uso recreativo. Los visitantes perciben elevado grado de conservación de la naturaleza incluso en lugares con gran número de servicios. Con base en las características de los lugares y los servicios que se ofrecen, se propone un esquema de organización de sitios en tres grupos, con dimensiones ligadas al espacio recreativo, cuerpos de agua, grado de afluencia y tipo de actividades. Un grupo destacó por su gran cantidad de actividades físicas y campismo, otro por la ausencia de agua y la mayor heterogeneidad de usos, mientras que el tercero se caracterizó por la presencia de cuerpos de agua y escasa afluencia de visitantes.

**Palabras clave:** ecoturismo, conocimiento local, áreas naturales protegidas.

<sup>1</sup> Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. 09230 México, D.F.

<sup>†</sup> Autor responsable (cantellano@correo.unam.mx)

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

Recibido: Febrero de 2002. Aceptado: Diciembre de 2004.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 417-425.

### SUMMARY

The objective of this research was to evaluate the local knowledge related to forest recreation in the National Parks "El Chico", State of Hidalgo and "Desierto de los Leones", Federal District, in terms of visitor goals and recreational services. The Recreational Opportunity Spectrum (ROS) developed by the US Forest Service is the most used international framework. However, it is necessary to evaluate its local application. A visitor survey and provider interviews were conducted in both parks, and exploratory and multivariate analysis data were performed in order to identify the relationship between site and physical characteristics. The results contrast with the ROS framework planning because there is neither a distinction among visitor goals nor a recreation use gradient. Visitors perceive a high degree of wilderness, even in sites with a large number of recreational facilities. Based on site and service characteristics, a three-group framework is proposed with dimensions related to recreational space, water bodies, degree of affluence and types of activity. One group was prominent for the large number of physical activities and camping, another for the absence of water and the greater heterogeneity in uses, while the third group was characterized by presence of water bodies and scarce affluence of visitors.

**Index words:** ecotourism, local knowledge, protected natural areas.

### INTRODUCCIÓN

Las actividades recreativas ligadas a la naturaleza (ecoturismo, turismo de aventura, safaris, montañismo o campismo) se han incrementado en los años recientes en los países en vías de desarrollo, representando más de 7% del turismo internacional (Pleumarom, 1994; SECTUR, 1994). Brockman y Merriam (1973) y Hammit y Cole (1987) destacaron el contraste entre el trabajo y la recreación, por el carácter recompensante y restaurativo de esta última,

cuando se realiza a través de actividades al aire libre en lugares con cierto grado de conservación, como los que se encuentran en las áreas naturales protegidas. Sin embargo, es necesaria una planeación adecuada de esta actividad para evitar mayor deterioro de los sistemas naturales de los cuales depende.

Existen algunas propuestas de planeación recreativa que difieren mucho en cuanto su nivel de profundidad e integración metodológica. Hendee *et al.* (1976) identificaron diversos aspectos físicos del área, como accesos y caminos, además de atractivos, como caza, pesca, apreciación del paisaje y paseos. Kiemstedt, citado por Vink (1975) propuso un mecanismo para identificar la aptitud por tipo de recreación, pero empleó clases de Tierra muy generales. Finalmente, con un enfoque muy específico, se han dado recomendaciones sobre las condiciones hidrológicas y edáficas requeridas para áreas de juego y bosque, sin embargo, éstas están aisladas de un enfoque de planeación más amplio (Vink, 1975).

Una de las propuestas más empleadas a escala mundial es el método del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA-FS, 1982), denominado Espectro de Oportunidades Recreativas (EOR), el cual se ha incorporado a otros métodos más recientes, como el Límite de Cambio Aceptable (LCA) (McCool y Christensen, 1996). El Espectro establece un espacio continuo basado en el grado de conservación del lugar donde se realiza la actividad recreativa. Se divide en segmentos o clases, de acuerdo con el grado de modificación del carácter natural del sitio, desde lugares muy conservados (hábitats silvestres) hasta los que se han acondicionado de manera artificial, sobre todo por la presencia de vehículos automotores o servicios urbanos. A partir del gradiente se asocian una serie de actividades y experiencias recreativas que corresponden a cada tipo de conservación de la naturaleza o infraestructura (Figura 1).

Sin embargo, Martin *et al.* (1989) y Roggenbuck *et al.* (1993) han encontrado diferencias sobre la percepción del grado de conservación de la naturaleza entre manejadores, académicos y usuarios. Kliskey (1998) modificó el esquema de selección de sitios, identificando y localizando, en campo, diversas variables para definir los tipos de usos, a través de un sistema de información geográfica. Las variables seleccionadas son infraestructura de servicios turísticos, senderos, actividades comerciales, forestales, mineras o hidroeléctricas, accesos,

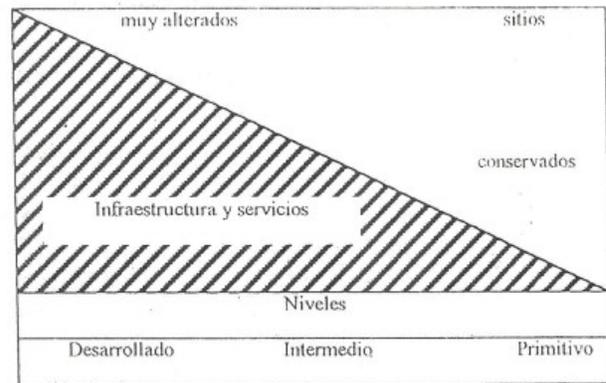


Figura 1. Espectro de oportunidades recreativas basado en USDA-FS (1982).

distancia de accesos, especies exógenas y tamaño del área.

Por otro lado, existe gran complejidad y falta de integración conceptual, metodológica y teórica, en torno a la recreación forestal. Las definiciones incorporan, de manera heterogénea, diversos componentes biofísicos y humanos, por lo que falta una adecuada planeación de la recreación en áreas silvestres (Whelan, 1991; Pleumarom, 1994). Además, los esquemas de organización de sitios recreativos no consideran adecuadamente el punto de vista de la población local que presta ese tipo de servicios. En los parques nacionales "El Chico" y "Desierto de los Leones", la planeación se ha concentrado en zonificaciones generales, sin incorporar un esquema de organización de sitios recreativos (Vargas-Márquez, 1984; Melo-Gallegos y López-García, 1994). Por otro lado, empiezan a generarse algunas experiencias notables como la del parque ejidal San Nicolás Totolpan, D.F. (Suárez-Bonilla e Ibarra-Poullot, 2000) que pueden enriquecerse con esquemas explícitos de planeación de sitios recreativos.

Para poder conceptualizar la recreación forestal, el objetivo del presente estudio fue conocer los motivos de visita de los usuarios, la manera en que perciben los ambientes recreativos y la forma en que los prestadores de servicios organizan dichos sitios, en los parques nacionales "El Chico" y "Desierto de los Leones", así como contrastarlo con el esquema del Espectro de Oportunidades Recreativas (USDA-FS, 1982).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en los parques nacionales "El Chico", estado de Hidalgo y "Desierto de los Leones", Distrito Federal. En ambos, se presenta un bosque templado subhúmedo con predominio de *Abies religiosa* y diversas asociaciones entre *Pinus* y *Quercus*. La investigación de campo se dividió en dos componentes. Uno, enfocado hacia usuarios y, otro, con prestadores de servicios. A los visitantes se les aplicó una encuesta centrada en los motivos de visita y la percepción del grado de conservación de la naturaleza. Por otro lado, se realizaron entrevistas a las personas que tienen alguna relación con el diseño, manejo y uso de los sitios recreativos, directamente en los lugares donde desarrollan sus actividades.

Se efectuaron 20 visitas durante el periodo comprendido entre agosto de 2000 y julio de 2001, para realizar un total de 50 encuestas y 15 entrevistas, de acuerdo con los lineamientos establecidos por Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena (1999). Se solicitó la información de las personas de manera libre, espontánea y no remunerada. Los aspectos que

guiaron a la encuesta y a la entrevista se refieren a los motivos de visita y actividades (ejercicio físico, descanso, aventura, eventos sociales, disfrute de la naturaleza y contemplación del paisaje), opinión sobre las características del lugar, grado de belleza y conservación de los lugares. El trabajo se realizó en ocho lugares, cuatro en el parque nacional "Desierto de los Leones" (DL) y cuatro en el parque nacional "El Chico" (CH): DL Entrada, DL Comedores, DL Laureles, DL Puente, CH Ventanas, CH Mineral, CH Cedral y CH Valle (Figura 2).

La información obtenida en las encuestas se procesó mediante el método de comparación en pares (Saaty, 1994), para establecer la jerarquía de preferencia de los distintos motivos de visita. Se realizó un análisis exploratorio de datos con ViSta (Young, 2001). La información correspondiente a las entrevistas se analizó en términos cualitativos, elaborando un cuadro comparativo para el total de sitios. Posteriormente, se realizó un análisis de conglomerados y de componentes principales (Gabriel, 1971; Everit, 1993; McAleece, 1997), para lo cual se empleó la herramienta de dilucidación

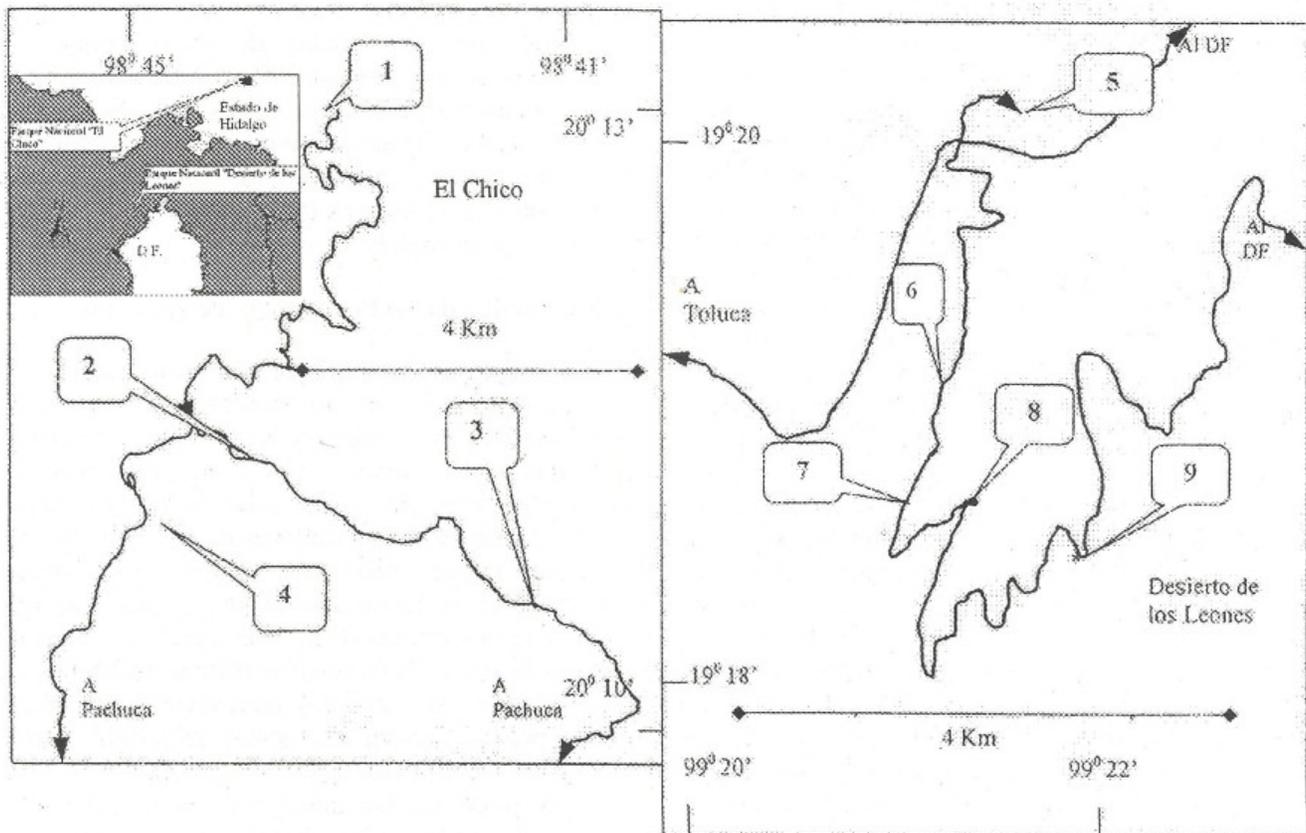


Figura 2. Localización de sitios de trabajo. CH Mineral (1), CH Ventanas (2), CH Valle (3), CH Cedral (4), DL Laureles (5), DL Entrada (6), DL Comedores (7), DL Convento (8) y DL Puente (9).

del conocimiento denominada rejilla (Kelly, 1977) para establecer la relación entre sitios recreativos y características distintivas de dichos sitios. Para realizar los cálculos, se hicieron pruebas con el programa de cómputo Enquire Whithin (Gaines *et al.*, 1997) y la solución final se efectuó vía internet (WebGrid III) con el servidor establecido por la Universidad de Calgary, Canadá.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Perspectiva de los Visitantes

En ambos parques, el mayor motivo de visita fue el disfrute de la naturaleza (Figura 3), pero en términos porcentuales en "El Chico" equivale a un 37% comparado con el resto, que varía entre 13.5 y 16.7%. Para el "Desierto de los Leones", existe un segundo grupo (diversión, aventura y descanso) con valores intermedios, mientras que la actividad ejercicio presenta el valor más bajo, en términos porcentajes equivalen a 32.7%, entre 17.8 y 21.6%, además de 6.8%, respectivamente. Lo anterior significa que la percepción basada en la categoría de disfrute de la naturaleza es el motivo predominante en los dos parques y que ejercicio tiene la menor importancia.

Sin embargo, un análisis exploratorio básico de cajas muestra que si bien los valores de la categoría disfrute de la naturaleza son más altos, no existen diferencias estadísticas con el resto de los motivos. Además, se observa mayor dispersión de datos en el caso de "El Chico" (Figura 4). Por otro lado, es importante señalar que los valores del cociente de inconsistencia en la comparación de pares, son en particular altos (mediana de 0.49 y promedio de 0.65) cuando lo recomendado (Saaty, 1994) es de 0.15 y hasta 0.23. Esto denota cierta confusión en los usuarios en la percepción de la importancia de los motivos de visita, quizás por la complejidad en las combinaciones de los conceptos, porque pueden estar estrechamente relacionados, o bien, por la homogeneidad en el tipo de usuarios encuestados.

Un aspecto relacionado con lo anterior es que las valoraciones sobre el grado de conservación de la naturaleza y apreciación estética que realizan los visitantes, acerca de los parques, son superiores a 7 en una escala de 1 a 10. Esto ocurre incluso en lugares con una gran cantidad de estructuras de servicios como son estacionamiento, restaurantes, carreteras y lugares con bancas y mesas para tomar alimentos. Por

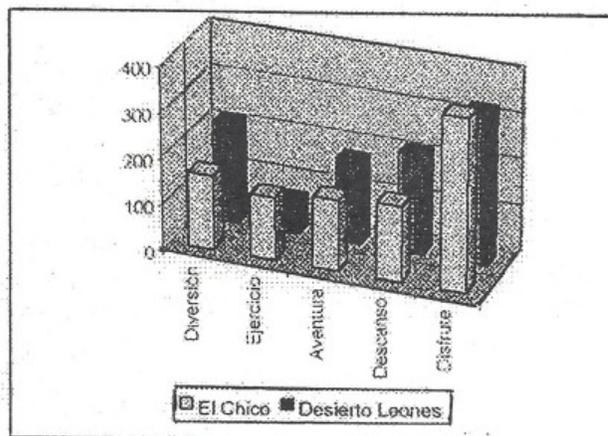


Figura 3. Motivos de visita en los parques nacionales.

esta razón, se considera que el motivo disfrute de la Naturaleza si tiene relevancia como el más importante en la visita a los sitios recreativos. Una observación relevante realizada durante las visitas a los parques es que en el "Desierto de los Leones" existe una mayor cantidad de accesos mediante vehículos particulares y un uso relevante de la carretera de asfalto para atletismo y ciclismo. Este aspecto seguramente tiene relación con la ubicación de dicho parque (corta distancia de la gran ciudad de México) e ingresos económicos relativamente altos de la población aledaña. Fue notable observar a una gran cantidad de visitantes cuya actividad se limitaba a tomar alimentos, en cortos periodos de tiempo y en lugares con una gran cantidad de servicios.

### Perspectiva de los Prestadores de Servicios

Las personas entrevistadas no realizan un solo tipo de actividad y son muy diferentes en cuanto a su responsabilidad y relación con el manejo creativo del bosque. A continuación se mencionan las características de dichas personas: dirigentes de organizaciones de prestadores de servicios turísticos; Presidente de Vigilancia de Bienes Comunales; cobradores en la entrada de los parques; encargados de la administración de la zona recreativa; encargados de la limpieza de la zona recreativa; ejidatarios de la zona que presta servicios recreativos y arrendatarios que prestan servicios turísticos (alimentos, renta de caballos y estacionamiento).

A pesar de las diferencias en el perfil de las personas entrevistadas, destaca un conocimiento muy uniforme en cuanto a las características de los sitios recreativos. Esto se debe a que existe una rotación en

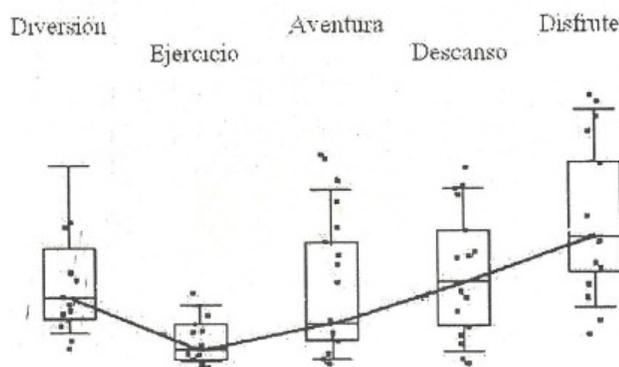


Figura 4. Diagrama de caja para los valores de los motivos de visita del parque nacional "El Chico".

las responsabilidades o funciones realizadas en los parques, además de su participación en asambleas, en las cuales se deciden muchos aspectos de manejo de los sitios recreativos. En este sentido destaca la distinción de ejidatarios y comuneros con respecto a pequeños propietarios y prestadores de servicios o arrendatarios. En el primer caso, resalta la realización de diferentes actividades por diferentes personas, mientras que, en el segundo, existe una mayor dedicación y especialización en la prestación de servicios turísticos. La uniformidad en el conocimiento se debe al contacto y a la realización de actividades relacionadas no sólo con la prestación de servicios recreativos, sino también con respecto a la realización de labores de conservación ecológica, como: limpieza, reforestación y resguardo de los lugares dedicados a la recreación u otra actividad.

Al igual que lo señalado por Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena (1999), para el caso de la clasificación de tierras, el conocimiento relacionado con la organización de los sitios recreativos se ha desarrollado con la experiencia práctica a través de un proceso de ensayo y error, sin tener relación con el conocimiento científico y de manera inductiva. No se cuenta con un esquema previamente definido de organización. Han existido acercamientos de instituciones académicas y gubernamentales con propuestas de manejo, pero no se han consolidado en la práctica ni la población local las ha adoptado (la excepción es el sitio DL Convento, donde existe una fuerte presencia gubernamental). La población local ha diseñado, organizado y ejecutado sus actividades de servicios recreativos a través de adecuaciones, analizadas y definidas de manera comunitaria y a lo largo de mucho tiempo.

## Esquema de Organización de Sitios Recreativos

A partir del Cuadro 1 se destacan los elementos comunes y distintivos de los sitios recreativos visitados. El aspecto más frecuente consiste en la presencia de infraestructura dedicada a la ingestión de alimentos; en algunos casos (DL Convento, DL Laureles y CH Mineral) existen lugares bien desarrollados en cuanto a servicios (restaurantes), mientras que en otros (DL Comedores, DL Puente) sólo se tienen algunos elementos básicos (bancas, mesas y asadores). En general, abundan los lugares con servicio de comida preparada y en casi todos los lugares (a excepción de DL Entrada) existe espacio para colocar y preparar alimentos que llevan los visitantes. Otro elemento común consiste en que todos los sitios tienen acceso para vehículos y, en la mayoría de ellos, se llega hasta el lugar donde pernoctan los visitantes; en algunos casos se llega a través de asfalto, en otros con camino empedrado y en pocos sobre el piso natural. También es común en los sitios la tendencia a concentrar los servicios y la estancia de los visitantes, mientras que la parte forestal sirve sólo como escenario.

Se pueden señalar como elementos comunes el tipo de vegetación (bosque de coníferas) y el tipo de asociación predominante (bosque de *Abies*), aunque en el caso de CH Cedral, además se tiene una comunidad de *Cupressus*. Las visitas al interior de las zonas arboladas están determinadas por la iniciativa de los visitantes y, en pocos casos, dependen de un servicio explícito ofrecido por los administradores del lugar. Esto sucede cuando se tiene servicio de caballos con recorridos hacia el bosque. En este sentido destacan los dos tipos de rutas ofrecidas en DL Convento, ya que, en general, este servicio se da con pequeños recorridos y en espacios reducidos que casi no penetran hacia el bosque (CH Valle y CH Ventana). Tres de los sitios visitados, DL Convento, CH Ventanas y CH Cedral, se caracterizan por presentar recorridos bien establecidos; el primero tiene como atractivo a las ermitas, y los dos últimos a las caminatas hacia las salientes rocosas.

Los elementos más distintivos se refieren a los siguientes usos y características físicas:

1. Cantidad de servicios: Muchos (DL Convento, DL Laureles y CH Mineral) contra pocos (DL Entrada y DL Comedores).

Cuadro 1. Características de los sitios recreativos.

Sitio	Parque Nacional "Desierto de los Leones"					Parque Nacional "El Chico"			
	Entrada	Convento	Comedor	Laureles	Puente	Ventanas	Mineral	Cedral	Valle
Conservación	Regular	Regular	Regular	Mucha	Mucha	Regular-Mucha	Poca	Mucha	Regular-Mucha
Cuerpos de agua	No	No	No	Si	Si	No	No	Si	No
Afluencia de visitantes	Mucha	Mucha	Poca	Muy poca	Muy poca	Mucha	Mucha	Mucha	Regular
Caminata de aventura	No	Corta	Corta	No	Si	Si	No	Si	No
Servicio de leña	No	No	No	No	No	Si	No	Si	No
Tipo de participación	Comunitaria	Arrendatarios	Gubernamental	Comunitaria	Gubernamental	Propietarios	Arrendatarios	Comunitaria	Comunitaria
Escalada en roca	No	No	No	No	No	Si	No	No	Muy poca
Espacio Campamento	Poco	Mucho	Poco	Mucho	Regular	Regular	Mucho	Mucho	Regular
Días de campo	Nulo	Muy poco	Poco	Casi nulo	No	Mucho	No	Mucho	Regular
Servicios†	C,CA	CA,E,S,R,CO,M,OF	CB,CO,BA	E,R,CE,SF,AU,V,B,OF,TE	CA,CO,B,A,S	AL,CA,E	CA,CE,BA,SF,B	CT,LA	C,ACB
Renta de caballos	No	Si	No	No	No	Si	No	Si	Si
Grupos escolares	No	Si	No	Si	No	Si	No	No	No

† C = caseta; CA = carretera con asfalto; E = estacionamiento; R = restaurante; S = sendero; CO = convento; M = museo; CE = camino empedrado; CB = cabañas; CO = comedores; BA = bancas; SF = salón de fiestas; AU = aula; AL = albergue; CT = camino terracería; V = vivero; B = bodega; OF = oficina; TE = temascal; LA = lanchas.

2. Tamaño y ángulo visual del lugar: Grande y abierto (CH Cedral y CH Valle) contra reducido y cerrado (DL Comedores y DL Entrada).

3. Campismo: Áreas para grupos de turistas bien definidos con servicio de leña o vigilancia (juveniles, familiares, aislados o comunitarios), por ejemplo en CH Ventanas contra áreas con poca o ninguna infraestructura (DL Entrada y DL Comedores).

Con los anteriores elementos es posible señalar la diferencia con lo reportado para el conocimiento botánico y edafológico. Berlin *et al.* (1973) señalaron, como requisitos fundamentales de un esquema formal, la existencia de una estructura jerárquica y nombres en más de una clase. En este caso, no existe una organización taxonómica porque la población local (campesinos, ejidatarios, comuneros y pequeños propietarios) no ha desarrollado un sistema con diferentes niveles jerárquicos y su nomenclatura no tiene relación con su conocimiento tradicional de la flora, fauna o aprovechamiento agrícola. La organización del espacio recreativo se ha establecido mediante ensayo y error pero en un tiempo relativamente corto (10 a 30 años), además de que los sitios y experiencias sobre recreación desarrollados

por la población local en los dos parques nacionales son pocos. Destaca el caso del sitio DL Laureles porque es el único donde se realizan actividades de propagación de especies arbóreas con fines de reforestación, además de acciones de educación ambiental.

De igual manera, no existe una nomenclatura asociada al lenguaje de la población local, sino que muchas expresiones dependen de aportaciones tomadas del exterior de la comunidad, incluso se manejan palabras de origen extranjero, como "camping" y "pic-nic". En algunos casos, como en CH Ventanas, existe una mayor diferenciación de sitios al discriminar lugares para estacionamiento, áreas para diferentes tipos de campamento y distintos tipos de pasto en cuanto a su resistencia al juego de pelota. También destaca el sitio DL Convento por la prestación de servicios de renta de caballos en dos tipos de rutas (cortas y largas). Sin embargo, en general, se tiende a concentrar los servicios en áreas reducidas. A partir del conjunto de sitios estudiados, inicialmente se puede proponer que el esquema de organización consiste en una zona núcleo con elevada concentración de visitantes, infraestructura y

servicios, rodeado de áreas que varían en función del desarrollo de la recreación forestal. Esta organización no corresponde al esquema EOR y para entender mejor dicho esquema se requiere conocer, de manera formal, sus similitudes y diferencias, mediante métodos multivariados y proponer una nueva forma de organización.

El análisis de conglomerados (Sokal y Sneath, 1963; De Queiroz y Norton, 1992; Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 1999) del Cuadro 1 produce tres grupos: Uno formado por CH Ventanas y CH Cedral, otro DL Puente y DL Laureles, además de DL Convento, CH Valle, DL Comedores, CH Mineral y DL Entrada. El análisis de componentes principales permite destacar cuatro grupos de características físicas que explican la organización de los sitios. Primero, hay un gran grupo (disponibilidad de leña, visitas de escuelas, renta de caballos, establecimiento de campamentos, presencia de agua y realización de caminatas). Un segundo grupo está conformado por conservación, tipo de participación, posibilidad de realizar días de campo y amplitud de espacio. Además, hay los grupos cantidad de visitantes y cantidad de infraestructura. Al relacionar los grupos con las características, el primer grupo de sitios (CH Cedral y CH Ventanas) comparte elevada conservación y afluencia de visitantes, además poca infraestructura. El siguiente grupo (DL Puente y DL Laureles) comparte presencia de agua y ausencia de escalada en roca, además de conservación, que lo

acerca al anterior grupo. Sin embargo, estos sitios son muy diferentes en cuanto a cantidad de infraestructura. El último grupo (DL Convento, CH Valle, DL Comedores, CH Mineral y DL Entrada) es especial porque es similar en varios aspectos, pero muy diferente en otros. Por un lado, no tienen cuerpos acuáticos, leña, escalada en roca y caminatas de aventura, pero son diferentes en cuanto a espacio, días de campo, renta de caballos y sobre todo infraestructura.

Con respecto a la elucidación del conocimiento denominada rejilla (Kelly, 1977), se eligieron las características más diferenciadas presentes en los sitios, tanto biofísicas, como de servicios, obteniéndose el dendrograma (Figura 5).

Como puede observarse, se forman tres grupos de sitios recreativos: G1, constituido por CH Cedral, CH Valle y CH Ventanas; G2, formado por DL Comedores, DL Entrada y CH Mineral; y G3, por DL Laureles y DL Puente. De manera similar, se forman tres grupos de características que señalan una relación entre tipos de actividades y campismo, cantidad de afluencia y servicios recreativos, así como tipo de espacio y presencia de cuerpos acuáticos. G1 destaca por presentar actividades de campismo y, en general, condiciones de desempeño físico, mientras que G3 se caracteriza por presentar cuerpos de agua, espacios cerrados y poca afluencia de visitantes. Por otro lado, G2 está bien definido por la ausencia de agua y valores intermedios en el resto de

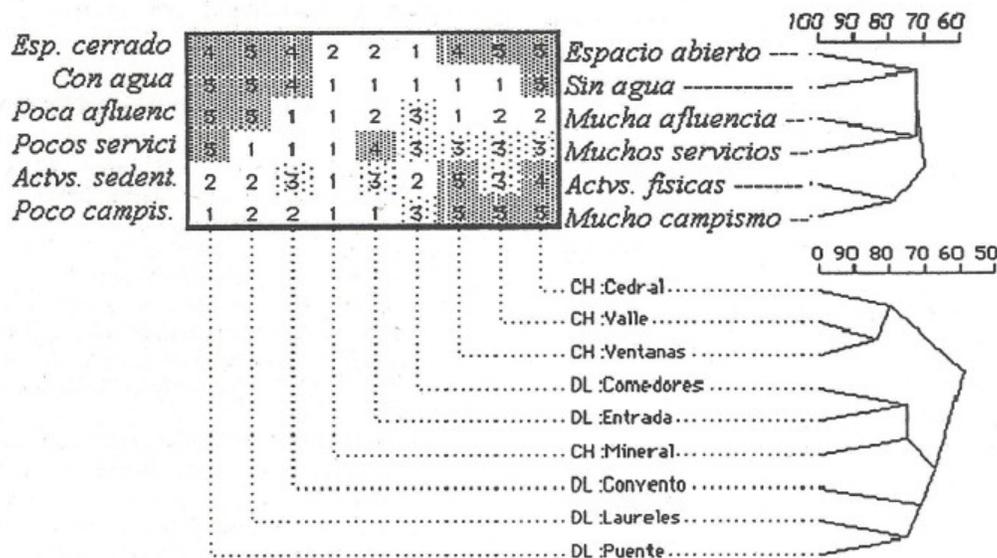


Figura 5. Dendrograma de sitios recreativos y características de "El Chico" y "Desierto de los Leones".

las características. DL Convento presenta características de G3, aunque se asemeja al G2.

La anterior organización no corresponde al esquema del Espectro de Oportunidades Recreativas (EOR) (Figura 1), ya que supone un gradiente continuo que no se presenta en el conjunto de sitios estudiados. Los grupos se presentan en forma discontinua debido a los tipos de actividades o características muy específicas. Otro aspecto relacionado con la falta de adecuación al esquema EOR es que, a pesar de la formación de los anteriores grupos, no es posible encontrar una relación entre el tipo de sitios y motivo de visita del público porque, como se mencionó anteriormente, no existen diferencias significativas.

Por tal motivo, se propone un nuevo esquema de organización de sitios recreativos (Figura 6) compuesto de tres ejes (uno de características físicas y dos de percepción de uso) cada uno con tres variables. Este triángulo de recreación está compuesto por tres triángulos interiores (se ubican los grupos G1, G2 y G3), quedando un espacio para un cuarto triángulo donde precisamente se podrían ubicar sitios como DL Convento, que no están definidos por los vértices del triángulo, sino por situaciones intermedias en los valores de las seis características.

## CONCLUSIONES

- Los turistas no tienen un motivo de visita predominante, a pesar de que destaca el disfrute de la naturaleza. El grado de conservación de la naturaleza percibido es elevado y esto ocurre tanto en sitios con muchos servicios y alteración del medio (DL Convento), como en lugares más conservados y presencia de cuerpos acuáticos (CH Cedral).
- Los prestadores de servicios no tienen una taxonomía formal de organización de sus sitios recreativos debido a que no tienen una estructura jerárquica ni nomenclatura propia. Sin embargo, es posible elaborar un esquema del conjunto de sitios estudiados a partir de la identificación de propiedades que permiten organizarlos.
- El conjunto de sitios no se organiza en un gradiente continuo sino en tres grupos, determinados por tres tipos de características: tamaño del espacio y presencia de agua; afluencia y cantidad de servicios; así como intensidad física de las actividades que realizan los visitantes y el desarrollo del campismo.
- Es posible señalar que el tipo de recreación que se realiza en los sitios estudiados está basado en

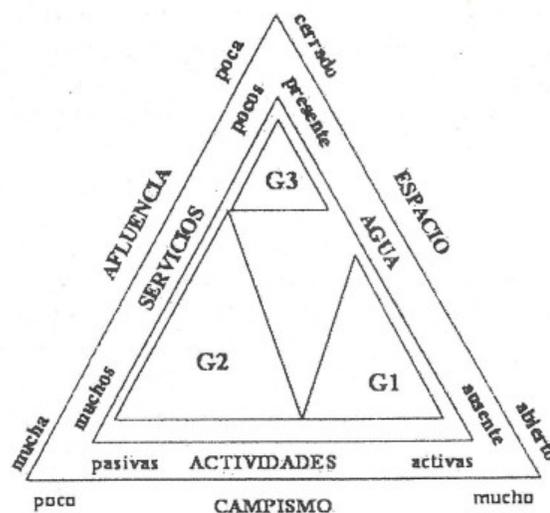


Figura 6. Propuesta de organización de sitios recreativos.

el disfrute de servicios turísticos asociados al consumo de alimentos, con un escenario de ambiente natural determinado por la presencia de masas forestales en distintos grados de conservación, y con facilidades de accesos para vehículos donde la infraestructura para internarse y convivir más intensamente con la naturaleza está limitada.

## AGRADECIMIENTOS

A los ejidatarios, comuneros y pequeños propietarios de los parques nacionales "El Chico" y "Desierto de los Leones". Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por apoyar los estudios de postgrado.

## LITERATURA CITADA

- Berlin, B., D.E. Breedlove y P.H. Raven. 1973. General principles of classification and nomenclature in folk biology. *Am. Anthropologist* 75: 214-242.
- Brockman, C.F. y L.C. Merriam Jr. 1973. *Recreational use of wildlands*. 3rd edition. McGraw-Hill. New York.
- De Queiroz, J.S. y B.E. Norton. 1992. An assessment of an indigenous soil classification used in Coatinga Region of Ceara State, Northeast Brazil. *Agric. Systems* 39: 289-305.
- Everit, B.S. 1993. *Cluster analysis*. 3rd edition. Edward Arnold. London, UK.
- Gabriel, K.R. 1971. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* 58: 453-467.
- Gaines, B.R., L.L.J. Chen y M.L.G. Shaw. 1997. Modeling the human factors of scholarly communities supported through the Internet and World Wide Web. *J. Am. Soc. Information Sci.* 48: 987-1003.
- Hammit, W.E. y D.N. Cole. 1987. *Wildland recreation: Ecology and management*. John Wiley. New York.

- Hendee, J.C., R.N. Clark, M.L. Hongans, D. Wood y R.W. Koch. 1976. Code-A-Site: A system for inventory of dispersed recreational sites in roaded areas, back country, and wilderness. Research. Paper PNW-209. USDA Forest Service. Pacific Northwest Forest and Range Exp. Sta. Portland, OR.
- Kelly, G.A. 1977. The psychology of the unknown. pp. 1-20. *In*: Bannister, D. (ed.). *New perspectives in personal construct theory*. Academic Press. London, UK.
- Kliskey, A.D. 1998. Linking the wilderness perception mapping concept to the recreation opportunity spectrum. *Environ. Manage.* 22: 79-88.
- Martin, S.R., S.F. McCool y R.C. Lucas. 1989. Wilderness campsites: Do managers and visitors see them the same? *Environ. Manage.* 13: 623-629.
- McAleece, N. 1997. *Biodiversity Pro. The Natural History Museum/Scottish Association for Marine Science*. London, UK.
- McCool, S.F. y N.A. Christensen. 1996. Alleviating congestion in parks and recreation areas through direct management of visitor behavior. pp. 67-84. *In*: Lime, D.W. (ed.). *Congestion and crowding in the National Park System*. Minnesota Agricultural Experiment Station. St. Paul, MN.
- Melo-Gallegos, C. y J. López-García. 1994. Parque Nacional "El Chico". Marco geográfico natural y propuesta de zonificación para su manejo operativo. *Investigaciones Geográficas. Bol. Instituto de Geografía* 28: 65-128.
- Ortiz-Solorio, C.A. y Ma. del C. Gutiérrez-Castorena. 1999. Evaluación taxonómica de sistemas locales de clasificación de tierras. *Terra* 17: 277-286.
- Pleumarom, A. 1994. The political economy of tourism. *The Ecologist* 24(4):142-148.
- Roggenbuck, J.W., D.R. Williams y A.E. Watson. 1993. Defining acceptable conditions in wilderness. *Environ. manage.* 17: 187-197.
- Saaty, T.L. 1994. *Fundamentals of decision-making and priority theory with the analytic hierarchy process*. RWS Publications. Pittsburgh, PA.
- SECTUR (Secretaría de Turismo). 1994. *Estrategia Nacional de Ecoturismo para México*. México, D.F.
- Sokal, R.R. y P.H.A. Sneath. 1963. *Principles of numerical taxonomy*. Freeman. London, UK.
- Suárez-Bonilla, A. y J.C. Ibarra-Poullot. 2000. *Manual para la planeación de un turismo responsable en áreas naturales y ejidales*. Parque Ejidal San Nicolás Totolpan. Balan Consultores S.C. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. México, D.F.
- USDA-FS (US Department of Agriculture-Forest Service). 1982. *Recreation opportunity spectrum*. Washington, DC.
- Vargas-Márquez, F. 1984. *Parques Nacionales de México y Reservas Equivalentes, pasado, presente y futuro*. Colección: Grandes Problemas Nacionales. Serie: Los bosques de México. Instituto de Investigaciones Económicas. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Vink, A.P.A. 1975. *Land use in advancing agriculture*. Springer-Verlag. New York.
- Young, F.W. 2001. *ViSta Version 6.4 (Beta)*. UNC Psychometric Laboratory. University of North Carolina. Chapel Hill, NC.
- Whelan, T. 1991. *Nature tourism: Managing for the environment*. Island Press. Washington, DC.

**Revisores de este número**  
**Reviewers of this number**

427

Aguirre Gómez, Arturo	Cuautitlán, estado de México
Alcántar González, Gabriel	Montecillo, estado de México
Almaguer Vargas, Gustavo	Chapingo, estado de México
Améndola Massiotti, Ricardo D.	Chapingo, estado de México
Anaya Garduño, Manuel	Montecillo, estado de México
Becerra Moreno, Antonio	Chapingo, estado de México
Bravo Lozano, Ángel G.	Morelia, Michoacán, México
Catalán Valencia, Ernesto Alonso	Torreón, Coahuila, México
Cram H., Silke	México, D.F.
Estrada Ávalos, Juan	Ciudad Lerdo, Durango, México
Fimbres Fontes, Adán	Caborca, Sonora, México
García Calderón, Norma	México, D.F.
Granados Sánchez, Diódoro	Chapingo, estado de México
Guízar Nolazco, Enrique	Chapingo, estado de México
Luna Cavazos, Mario	Montecillo, estado de México
Maldonado Torres, Ranferi	Chapingo, estado de México
Mazzarino, María Julia	Bariloche, Argentina
Méndez Natera, Jesús Rafael	Maturín, Monagas, Venezuela
Mora Gutiérrez, Manuel	Querétaro, México
Palerm Viqueira, Jacinta	Montecillo, estado de México
Parra Quezada, Rafael	Geneva, NY, EEUU
Pérez Nieto, Joel	Chapingo, estado de México
Rodríguez Rodríguez, Orlando	Cabudare, Lara, Venezuela
Román Calleros, Jesús A.	Mexicali, Baja California, México
Saval, Susana	México, D.F.
Tijerina Chávez, Leonardo	Montecillo, estado de México
Uribe Gómez, Sergio	San Andrés Tuxtla, Veracruz, México
Vázquez Alvarado, Rigoberto E.	San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
Velázquez Mendoza, Juan	Montecillo, estado de México
Villalpando Barriga, Omar K.	Montecillo, estado de México
Villarreal Romera, Manuel	Culiacán, Sinaloa, México

**Editores Técnicos de este número**  
**Technical Editors of this number**

Acevedo Sandoval, Otilio A.	Pachuca, Hidalgo, México
Alvarado López, Jorge	Montecillo, estado de México
Becerril Román, A. Enrique	Montecillo, estado de México
Coras Merino, Pablo M.	Chapingo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
Maldonado Mendoza, Ignacio E.	Ithaca, NY, EEUU
Palerm Viqueira, Jacinta	Montecillo, estado de México
Pérez Nieto, Joel	Chapingo, estado de México
Pineda Pineda, Joel	Chapingo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Tijerina Chávez, Leonardo	Montecillo, estado de México
Villalpando Barriga, Omar K.	Montecillo, estado de México



# TERRA *Latinoamericana*

## FORMATO PARA LA SUSCRIPCIÓN ELECTRÓNICA A LA REVISTA TERRA *Latinoamericana*

Para el envío de todos los números de un año (a partir de 2003), el costo de suscripción electrónica es de \$200.00 pesos o su equivalente en dólares.

### a) Pago con de tarjeta de crédito

Envíe su solicitud con los siguientes datos:

Nombre: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Numero de tarjeta: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_ Monto (pesos): \_\_\_\_\_

Ciudad: \_\_\_\_\_ Estado: \_\_\_\_\_

País: \_\_\_\_\_ e-mail<sup>1</sup>: \_\_\_\_\_

Teléfono: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_

<sup>1</sup> A esta dirección le enviaremos su pedido.

### b) Pago con deposito en la cuenta de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Usted deberá depositar el monto correspondiente en la cuenta bancaria que se describe a continuación y enviar el comprobante del deposito por fax o por correo electrónico.

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.  
Cuenta 044 657115  
BBVA-Bancomer Plaza 001, sucursal 3441  
Texcoco, Estado de México

Universidad Autónoma Chapingo Departamento  
de Suelos  
km 38.5 Carr. México -Texcoco Chapingo, Méx.  
Apartado Postal 45 y Código Postal 56230  
Tel. y Fax: 01 595 95 2 17 21  
e-mail: [terra@correo.chapingo.mx](mailto:terra@correo.chapingo.mx)

Esta Publicación consta de 400 Ejemplares y  
se imprimió en el mes de Mayo del 2005  
en los Talleres de :

*Publicaciones Diamante*

Av. Hidalgo No. 46 Esq. Galeana  
San Vicente Chicoloapan. Edo. de México  
Tels.: (01 55) 59 21 65 08  
59 21 56 02

### **AGRADECIMIENTO**

*El Editor de la revista Terra Latinoamericana expresa su agradecimiento y reconocimiento al Dr. Enrique Mejía Saénz (Colegio de Postgraduados, Especialidad de Hidrociencias) y al Dr. Adalberto Benavides Mendoza (Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro), por haber donado una computadora personal de escritorio cada uno.*

*Muchas Gracias*