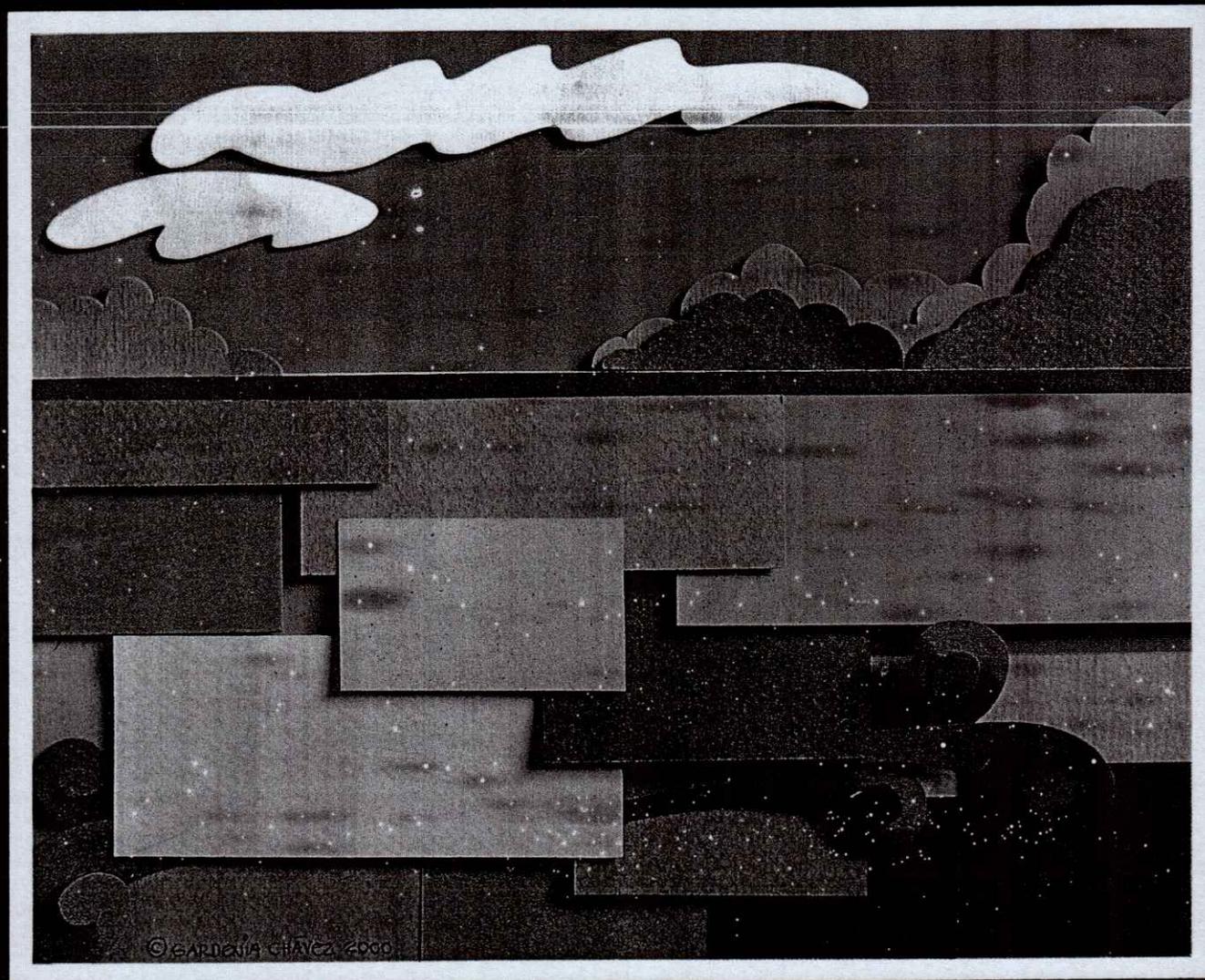


ISSN 0187-5779

TERRA

ABRIL - JUNIO DE 1999 • VOLUMEN 17 • NUMERO 2



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

TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 1997-1999

Presidente

Vicepresidente

Secretario General

Tesorero

Secretario Técnico

Secretario de Relaciones Públicas

Secretario de Eventos Nacionales

e Internacionales

Vocal

Vocal

Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro

M.C. José Cisneros Domínguez

Dr. Prometeo Sánchez García

Dr. Fernando de León González

Dra. Edna Álvarez Sánchez

M.C. Ricardo Torres Cossío

M.C. Francisco Gavi Reyes

Blól. Rogelio Oliver Guadarrama

M.C. Gaspar Romero Hernández

EDITOR EN JEFE

EDITOR ADJUNTO

EDITORES TECNICOS

EDITOR DE ESTILO

Dr. Andrés Aguilar Santelises

Dr. Javier Z. Castellanos

Dr. Gabriel Alcántar González

Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro

Dr. Juan José Peña Cabriales

Dr. Xavier X. Uvalle Bueno

Dra. Edna Álvarez Sánchez

M.C. Jorge Alvarado López

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

- Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos
- Física de Suelos
- Química de Suelos
- Contaminación

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

- Nutrición Vegetal
- Relación Agua - Suelo - Planta - Atmósfera
- Biología del Suelo
- Tecnología y Uso de Fertilizantes
- Uso y Manejo del Agua

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

- Conservación del Suelo
- Drenaje y Recuperación
- Fertilidad
- Productividad de Agrosistemas

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- Educación
- Crédito y Asistencia Técnica

TERRA registro en trámite.

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Abril - Junio de 1999 Volumen 17 Número 2

ISSN 0187 - 5779

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta revista, citándola como fuente de información. Las contribuciones a esta revista deben enviarse, en original y dos copias, redactadas conforme a las Normas para Publicación en la Revista **TERRA** a:

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

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

Teléfono: +(595) 4 60 24 **Fax:** +(595) 4 80 76

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

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

Diseño de portada

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

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

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

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

TERRA

ABRIL - JUNIO DE 1999 • VOLUMEN 17 • NUMERO 2

DIVISION I

- 87 Desarrollo estructural en un entisol bajo el sistema de labranza de conservación y tradicional.
Ma. del C. Gutiérrez C., J. Reyes Ch. y B. Figueroa S.
- 97 Intemperismo en tepetates y en cenizas volcánicas y su influencia en la formación de andisoles.
Silvia Rodríguez Tapia, Ma. del Carmen Gutiérrez C., Claudia Hidalgo M. y C. A. Ortiz S.

DIVISION II

- 109 Crecimiento de *Sesbania emerus* (Aubl) Urban inoculada con *Glomus* sp. en presencia de vermicomposta.
Abdul Khalil Gardezi, R. Ferrera-Cerrato, J. L. Aguilar Acuña y M. Larqué Saavedra
- 115 Pérdidas de agua de riego por percolación profunda durante el proceso de infiltración.
José Nicolás Ortiz, Iourii Nikolskii Gavrilov, Oscar Palacios Vélez y Rafael Acosta Hernández
- 125 Transpiración, potencial hídrico y prolina en zarzamora bajo déficit hídrico.
Rafael A. Parra Quezada, José L. Rodríguez Ontiveros (qepd) y Víctor A. González Hernández

DIVISION III

- 131 Estratificación del potencial productivo del maíz en la región oriente del estado de Tlaxcala.
Andrés María Ramírez y Victor Volke Haller

139 Materia orgánica y caracterización de suelos en proceso de recuperación con coberturas vegetativas en zonas templadas de México.

*Pedro Betancourt Yanez, Jesús González Ríos,
Benjamín Figueroa Sandoval y Félix González Cossio*

149 Area foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno.

J. Alberto Escalante Estrada

ENSAYO

159 Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano.

*Randy H. Adams Schroeder, Verónica I. Domínguez Rodríguez y
Leonardo García Hernández*

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

President
Vicepresident
Secretary
Treasurer
Technical Adviser
Public Relations
National and International Events
Secretary
Voter
Voter

Dr. Victor M. Ordaz Chaparro
M.C. José Cisneros Domínguez
Dr. Prometeo Sánchez García
Dr. Fernando de León González
Dra. Edna Alvarez Sánchez
M.C. Ricardo Torres Cossío

Dr. Francisco Gavi Reyes
Biól. Rogelio Oliver Guadarrama
M.C. Gaspar Romero Hernández

EDITOR-IN-CHIEF
ASSOCIATE EDITOR
TECHNICAL EDITORS

Dr. Andrés Aguilar Santelises
Dr. Javier Z. Castellanos
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Xavier X. Uvalle Bueno
Dra. Edna Alvarez Sánchez
M.C. Jorge Alvarado López

STYLE EDITOR

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Advise

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
April - June, 1999 Volume 17 Num. 2

ISSN 0187 - 5779

The authors take full responsibility for the articles published. Partial or total reproduction of the content of this journal is authorized, as long as this publication is cited as the information source. When submitting articles to this journal, an original and two copies must be sent to:
Editor de la Revista TERRA, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México, México.

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

Telephone: +(595) 4 60 24 **Fax:** +(595) 4 80 76

EDITORIAL STAFF

Cover design

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

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

TERRA

APRIL - JUNE, 1999 • VOLUME 17 • NUMBER 2

DIVISION I

- 87 Structural development of an entisol under zero and traditional tillage.
Ma. del C. Gutiérrez C., J. Reyes Ch., and B. Figueroa S.
- 97 Weathering of tepetates and volcanic ashes and their influence on the formation of andisols.
Silvia Rodríguez Tapia, Ma. del Carmen Gutiérrez C., Claudia Hidalgo M., and C. A. Ortiz S.

DIVISION II

- 109 *Sesbania emerus* (Aubl) Urban inoculated with *Glomus* sp. in the presence of vermicompost.
Abdul Khalil Gardezi, R. Ferrera-Cerrato, J. L. Aguilar Acuña, and M. Larqué Saavedra
- 115 Irrigation water losses by deep percolation during infiltration process.
José Nicolás Ortiz, Iouri Nikolskii Gavrilov, Oscar Palacios Vélez, and Rafael Acosta Hernández
- 125 Transpiration, water potential and proline in blackberry under hydric stress.
Rafael A. Parra Quezada, José L. Rodríguez Ontiveros (qepd), and Victor A. González Hernández

DIVISION III

- 131 Stratification of the productive potential of maize at the Eastern region of the State of Tlaxcala.
Andrés María Ramírez and Victor Volke Haller

- 139 Organic matter and soil characterization during restoration processes with cover crops on temperate areas of Mexico.
Pedro Betancourt Yanez, Jesús González Ríos, Benjamín Figueroa Sandoval, and Félix González Cossio
- 149 Leaf area, senescence and yield of sunflower grown with residual moisture, as affected by nitrogen fertilization.
J. Alberto Escalante Estrada

ESSAY

- 159 Bioremediation potential of oil impacted soil and water in the Mexican tropics.
Randy H. Adams Schroeder, Verónica I. Domínguez Rodríguez, and Leonardo García Hernández

DESARROLLO ESTRUCTURAL EN UN ENTISOL BAJO EL SISTEMA DE LABRANZA DE CONSERVACION Y TRADICIONAL

Structural Development of an Entisol under Zero and Traditional Tillage

Ma. del C. Gutiérrez C.¹, J. Reyes Ch.² y B. Figueroa S.¹

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue estudiar el desarrollo estructural de un suelo clasificado como un **Typic ustifluent**, manejado durante cinco años bajo labranza de conservación y labranza tradicional. Mediante mediciones micromorfológicas y morfométricas en secciones delgadas se detectaron diferencias significativas ($\alpha=0.05$) en ambos sistemas de labranza con respecto al tipo de estructura, tipo de agregados y de poros. La implementación del sistema de labranza de conservación está contribuyendo a la formación de un epipedón móllico, lo cual es atribuible al incremento de la materia orgánica por la alta actividad biológica (principalmente lombrices). Se encontró además, que no existen diferencias estadísticas ($\alpha=0.05$) entre las densidades aparentes del suelo con respecto al desarrollo radical del trigo o del maíz en el sistema de cero-labranza.

Palabras clave: Estructura no-labranza, micromorfología.

SUMMARY

The objective of the present research was to study the structural development of a soil classified as **Typic ustifluent**, managed during five years under no-tillage and traditional tillage. Micromorphological and morphometric measurements, carried out in thin sections, showed no differences ($\alpha=0.05$) between the soils as related to types of the structure, of aggregates, and voids. The no-tillage system is contributing to the development of the mollic epipedon, which can be due to a higher concentration of organic matter and enhanced biological activity (mainly

earthworms). Also, the results showed no differences ($\alpha=0.05$) between bulk densities of the soil in relation to the development of the roots of wheat or corn under no-tillage.

Index words: Structure, no-tillage, micromorphology.

INTRODUCCION

Desde el punto de vista agronómico, la estructura del suelo y su estabilidad en tiempo y espacio gobiernan las relaciones hídricas suelo-planta, es decir, el almacenamiento, transporte y disponibilidad de agua, así como la aireación y flujo de gases, de tal forma que se considera como una propiedad del suelo que sirve para evaluar su aptitud debido a que influye en su potencial productivo. Mientras que la textura de los suelos no puede ser fácilmente modificada, la estructura de los suelos puede ser manipulada por los sistemas de labranza y de cultivo y puede deteriorarse y modificarse con repercusiones negativas o positivas en la productividad (Pape y Legger, 1994).

El uso intensivo de sistemas de labranza mecanizada tiende a deteriorar la estructura del suelo, y, por lo tanto, es en parte responsable de la erosión y degradación del suelo; por ejemplo, la maquinaria y los animales de trabajo compactan el suelo, y la labranza, aunque rompe los agregados en tamaños deseados, también afecta adversamente la estructura en la medida en que expone a los agregados a la acción de las gotas de lluvia (Marshall y Holmes, 1979).

Como alternativas de solución se han propuesto diversos sistemas de labranza de conservación (cero-labranza, mínima, etc.) para preservar la estructura del suelo en un estado productivo, reducir la erosión y degradación y conservar la humedad.

La labranza de conservación es un sistema que reduce las pérdidas de suelo y agua en relación con la labranza convencional, y a menudo corresponde a una forma de labranza de no-inversión, que mantiene una cantidad adecuada de residuos sobre la superficie. Más específicamente, se puede considerar a la labranza de conservación como un sistema de

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Texcoco, México.

² CIFAP-Comarca Lagunera, Apartado postal 247, 27000 Torreón, Coah.

Recibido: Junio de 1998.

Aceptado: Mayo de 1999.

labranza en el cual los residuos de cosecha son retenidos en o cerca de la superficie, y/o se mantiene una rugosidad superficial en el suelo, con el objeto de controlar la erosión y lograr una buena relación suelo-agua (Mannering y Fenster, 1983; Allmaras y Dowdy, 1985).

Por otro lado, hay suelos que sin la influencia negativa del hombre presentan estructuras desfavorables para el desarrollo de los cultivos, como la de grano simple y laminar (de origen geológico por procesos de depositación) y bloques angulares y prismáticos (de origen físico por procesos de expansión contracción en materiales arcillosos) (Pape y Legger, 1994). Estas estructuras son comunes en los suelos donde la influencia de la actividad biológica ha sido escasa y se encuentran en sedimentos lacustres o aluviales (Gutiérrez, 1997); además, pueden afectar negativamente al crecimiento de las plantas a través de su influencia sobre el movimiento del agua y del aire del suelo, su resistencia a la penetración de las raíces y sus relaciones con la temperatura del suelo (Taylor y Ashcroft, 1972). De tal manera que se requiere que se desarrolle otro tipo de estructura, por ejemplo, la granular o migajosa (de origen biológico), la cual se caracteriza por permitir que los factores que influyen positivamente en el crecimiento de las plantas funcionen con óptima eficiencia.

Los suelos del ex-lago de Texcoco, estado de México, se formaron por procesos aluviales y lacustres y presentan estructuras de origen geológico o físico por su carácter de depósito y por el tipo de partícula; como consecuencia, presentan un epipedón ócrico (Gutiérrez, 1997), el cual se caracteriza por colores claros, consistencia firme o suelta cuando seco y poca capacidad de retención de humedad (Soil Survey Staff, 1994). Todas estas propiedades están relacionadas con un contenido de materia orgánica bajo (<1 %) y cuando ésta llega a influir no alcanza los 18 cm de profundidad para que pueda cambiar a un epipedón móllico, cuyas características físicas, químicas y biológicas son excelentes para el crecimiento de los cultivos.

Tradicionalmente, los suelos del ex-lago se han estado trabajando con labranza tradicional sin que estas prácticas de manejo influyan positivamente en la estructura del suelo y en la formación de un epipedón móllico y poco se conoce sobre el impacto de la labranza de conservación en materiales recientemente depositados, específicamente en los suelos del ex-lago

de Texcoco, donde los procesos pedogenéticos son escasos para heterogeneizar a los sedimentos y la influencia de la materia orgánica, por incorporación o sedimentación, ha sido escasa.

Una disciplina que puede ser útil para detectar cambios incipientes en la estructura del suelo originados por labranza, es la micromorfología de suelos, que según Bisdorf *et al.* (1990) constituye una herramienta única para el estudio de la estructura del suelo, debido a que se realiza *in situ* y se puede relacionar con otros niveles de observación (ultra, micro, macro o megascópico) utilizando las técnicas apropiadas (microscopio electrónico de barrido, estudio de perfiles de suelos y de paisajes).

Por lo anterior, los objetivos de la presente investigación fueron clasificar al suelo con base en la taxonomía de suelos, determinar el impacto de la labranza de conservación y tradicional sobre la estructura y porosidad de un mismo tipo de suelo y si los cambios resultantes son significativos; así como evaluar los efectos de la densidad aparente sobre el crecimiento radical del trigo y maíz en un suelo de cero labranza.

MATERIALES Y METODOS

Localización de la Zona de Estudio

El presente estudio se realizó de enero a agosto de 1997, en los terrenos del Colegio de Postgraduados (Figura 1b), cuya ubicación se encuentra a una latitud de 19° 29' norte y a 98° 53' de longitud oeste, en la parte central del valle de México, en el km 35.5 de la carretera México-Texcoco (Figura 1a).

El área se encuentra a una altitud promedio de 2230 m rodeada por montañas formadas por rocas andesíticas, basálticas y riolíticas; su geología corresponde a depósitos del período cuaternario (Mooser, 1961); geomorfológicamente se considera como una planicie aluvial y lacustre. Los suelos presentan en general un régimen de temperatura isotérmico (temperatura media anual de 19.6 °C) y un régimen de humedad ústico (Van Wambeke, 1987), con un régimen de lluvias en verano (Ortiz y Cuanalo, 1977). El suelo del lugar en el que se desarrolló el trabajo ha estado bajo cero-labranza por un período de cinco años y se ha sembrado año con año con cultivos diversos como maíz (*Zea mays* L.), alfalfa (*Medicago sativa*), trigo (*Triticum aestivum* L.), veza (*Vicia faba* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor*), sin aplicaciones de estiércol pero dejando residuos de cosecha.

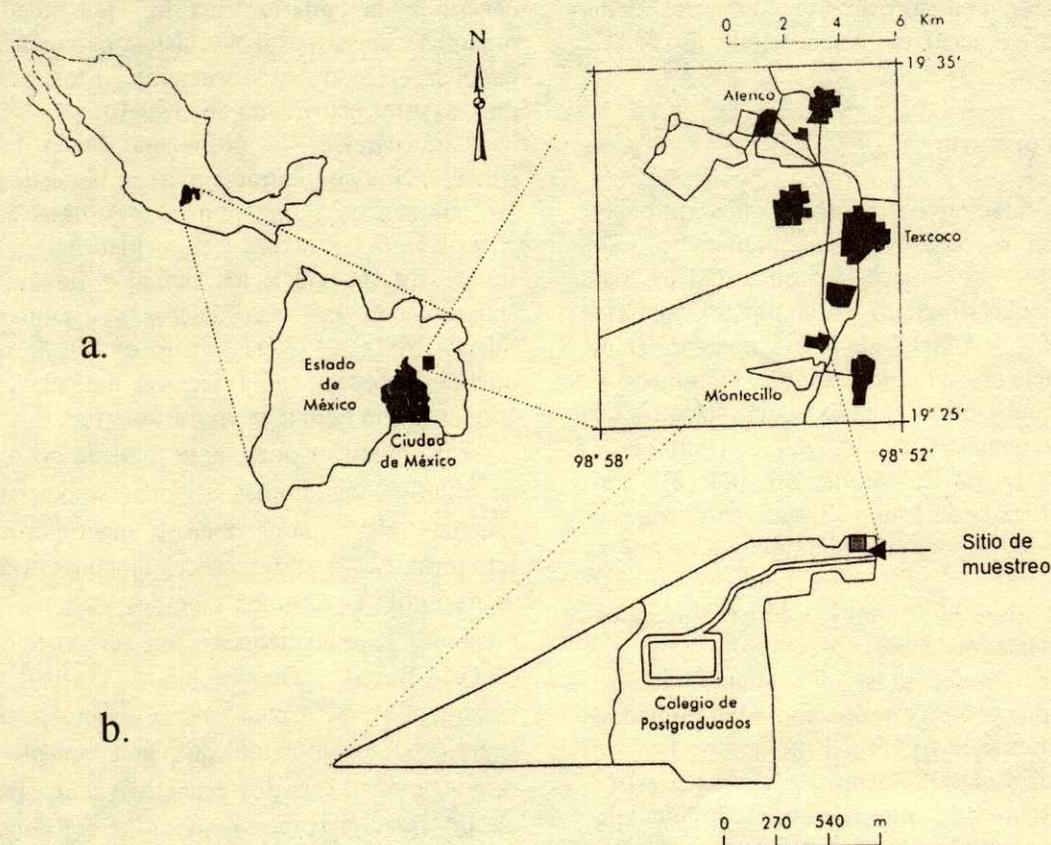


Figura 1. Localización del área de estudio.

Trabajo de Campo

Para la caracterización del suelo sometido a diferentes sistemas de labranza, se excavó un pozo pedológico y se describió su morfología de acuerdo con el manual de Cuanalo (1990). Se colectaron muestras alteradas (aproximadamente 2 kg) e inalteradas (cajas de latón de 4 x 4 x 10 cm) por cada horizonte del suelo con labranza tradicional y de conservación. Además, se tomaron diez bloques inalterados en la superficie del suelo utilizando cajas de aluminio de 20 x 9 x 5 cm, se colectaron ocho bloques en el suelo con labranza de conservación (cuatro en el trigo y cuatro en la alfalfa) y dos en el de labranza tradicional. Estos bloques fueron introducidos al suelo verticalmente abarcando una profundidad de 20 cm.

Para evaluar si existe influencia de la densidad aparente (estructura del suelo) en el crecimiento

radical del trigo y del maíz en un sistema de cero-labranza, estos cultivos se sembraron en franjas alternas. Las dimensiones de las franjas fueron de 100 m de largo por 3.0 m de ancho, siendo un total de 10 franjas de cada cultivo; entre las franjas se mantuvo la alfalfa presente ya en el sistema. Se extrajeron plantas completas incluyendo la parte de suelo correspondiente a la zona donde se efectúa el crecimiento radical y se realizaron muestreos para el maíz a los 10, 35 y 111 días y para el trigo a los 14, 28 y 68 días después de la siembra. A las plantas recolectadas se les determinó el grado de desarrollo de los cultivos, como son: longitud, peso en seco y húmedo de la planta; longitud, diámetro, número y peso en húmedo y en seco de las raíces, además del número de las hojas. La densidad aparente del suelo se determinó utilizando el método de la barrena de volumen conocido (cilindros de aluminio con un diámetro de 4.86 cm y con un volumen de muestra de

104 cm). Las muestras se colectaron a una equidistancia de 5 x 6 cm en los primeros 10 cm del suelo y posteriormente se secaron en una estufa a 105 °C hasta peso constante.

Trabajo de Laboratorio

Para la clasificación del suelo las metodologías que se utilizaron se basaron en el manual de Van Reeuwijk (1995), las cuales fueron: análisis del tamaño de partículas (método de la pipeta), materia orgánica (Walkley y Black), densidad aparente (con parafina), capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables (método de acetato de amonio, pH 7), conductividad eléctrica, con cationes y aniones solubles (pasta de saturación), pH (2:1 con agua:suelo), carbonato de calcio. El valor *n* se obtuvo de la relación entre el porcentaje de agua en campo y los porcentajes de arcilla inorgánica y humus. Además, se determinó la estabilidad de los agregados (Montenegro y Malagón, 1990).

Los bloques inalterados de suelos fueron sometidos a un proceso de eliminación de la humedad presente en la muestra a través del método de fase de vapor (FitzPatrick y Gudmundson, 1978), que consiste en el desplazamiento de la humedad intercambiándola con acetona. Este método tiene la ventaja de mantener al suelo en estado húmedo (como se encontró en el campo), sin alterar la microestructura natural del suelo, como cuando la muestra se seca para poder impregnarla con resina. Enseguida, las muestras se sometieron al proceso de impregnación, para lo cual se utilizó resina poliéster insaturada cristalina debido a que reúne las características recomendadas (FitzPatrick y Gudmundson, 1978). Una vez que las muestras estuvieron impregnadas, se procedió al corte de las secciones delgadas. Los bloques que se colectaron en cada horizonte (muestreo vertical), se cortaron en forma vertical y horizontal con el fin de determinar si el carbonato es de origen secundario, la forma de depositación de los sedimentos (aluvial o lacustre) y el tipo de poros presentes en el subsuelo. Los bloques que se muestrearon sólo en la superficie en los dos sistemas de labranza, se cortaron en forma horizontal cada dos o tres centímetros a lo largo de la muestra, de tal manera que se obtuvieron un total de cinco a siete cortes por bloque de suelo.

Las secciones delgadas se describieron de acuerdo con Bullock *et al.* (1985) y se usó para su observación un microscopio petrográfico, marca Olympus, con diferentes aumentos 2x, 4x, 10x y 20x. A las

secciones delgadas de tamaño de 6 por 7 cm se les describió la microestructura, porosidad, materia orgánica, masa basal y rasgos pedogenéticos para conocer el modo de formación y los procesos que puedan estar ocurriendo en el suelo

Para conocer la influencia de la labranza de conservación con la tradicional en la fábrica del suelo, las láminas de 9 x 6 cm se describieron haciendo énfasis en la estructura y porosidad del suelo. Con el fin de diferenciar a los tamaños de agregados de acuerdo con las clasificaciones establecidas (Soil Survey Staff, 1951; Hodgson, 1974), se realizó una medición directa en la sección delgada apoyándose con una regla graduada en milímetros.

Para medir el porcentaje total de poros en forma cuantitativa, las láminas delgadas se barrieron con un scanner HP (para medir macroporos), y se fotografiaron a diferentes aumentos (para medir microporos) en campos elegidos aleatoriamente. Las imágenes se analizaron con el sistema IDRISI (A Grid-Based Geographic Analysis System, versión 4.1), el cual tiene como característica cuantificar la reflexión que generan los diferentes rasgos, en este caso los espacios vacíos. Este método da información precisa sobre la frecuencia de los rasgos (en porcentaje) pero no del tipo, tamaño y distribución, por lo cual se procedió a hacer una descripción semicuantitativa que se basó en los diagramas de frecuencia propuestos por Bullock *et al.* (1985) y de tamaño, generado por Stoops (1993). Para realizar esta descripción y que fuera aleatoria los rasgos a medir, se trazaron las láminas para formar una cuadrícula uniforme (con cuadros de 1.0 cm²) y se seleccionaron seis puntos (cuadros) de observación. Se hizo énfasis en la cuantificación de poros canales y cámaras los cuales son el resultado directo de la actividad biológica y de los diferentes tipos de agregados.

Análisis Estadístico

Se realizaron análisis de varianza entre el porcentaje de poros y tipos de agregados en el sistema de labranza de conservación con el tradicional, así como si hay influencia de la estructura en el desarrollo radical del trigo y maíz, además se realizaron pruebas de medias para establecer posibles diferencias entre las mismas.

Cuadro 1. Características morfológicas de un Entisol sometido a labranza de conservación.

Horizonte	Color		Estructura	Consistencia	Raíces	Otros rasgos
	Seco	Húmedo				
Ap	10YR5/3	10YR4/3	B. subangulares	Suelta	Abundantes, finas y medias	Excrementos
A		10YR4/3	"	Firme	Moderadas	Canales
C		10YR3/3	"	Friable	Pocas	"
2Ck		10YR4/3	"	"	Sin	"
2Ck2		10YR4/3	"	"	Sin	"
3C		10YR4/3	"	"	Sin	"

RESULTADOS Y DISCUSION

Clasificación del Suelo

Los resultados de la descripción de campo y los del laboratorio se reportan en los Cuadros 1, 2 y 3. El epipedón, que presenta el suelo con labranza de conservación, reúne los requisitos de saturación de bases (PSB), color, carbón orgánico (CO), consistencia, humedad (valor n), menos de 250 ppm de P_2O_5 como para designarse como móllico, sin embargo, no cumple el requisito de profundidad (12 de 18 cm) o en subgrupo mollic (12 de 15 cm), debido a la consistencia firme del horizonte A influye en la designación del tipo de epipedón. Se compararon las mismas propiedades en el suelo con labranza tradicional y se encontró que reúnen el requisito de consistencia, materia orgánica, de PSB, pero no de humedad (valor n), color y profundidad (limitado también por la consistencia de los agregados), por lo que los dos sistemas se designaron como ócricos. Sin

embargo, hay una diferencia en los dos suelos, el sistema con labranza de conservación ha mejorado algunas propiedades del suelo, se incrementó el porcentaje de MO, lo cual se traduce en un aumento en la retención de humedad (valor n de 0.5 a 0.72) en el cual se establece que los agregados son capaces de retener humedad aun en condiciones de sequía y el color se ha tornado más oscuro, aunque la MO no ha influido en disminuir la consistencia hasta friable. La consistencia suelta en la superficie de los dos sistemas es igual, sin embargo, la estabilidad de los agregados es mayor en el suelo con labranza de conservación (moderadamente estables) que en el tradicional (agregados inestables). Bowen (1981) al respecto señala que la materia orgánica reduce el efecto de compactación del suelo y disminuye la densidad aparente, propicia el desarrollo de agregados de alta estabilidad y aumenta la fauna del suelo principalmente de lombrices.

El suelo no presenta horizontes de diagnóstico, aunque ocurra en el subsuelo más de 15 % de $CaCO_3$

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de un Entisol sometido a labranza de conservación.

Horizonte	Profundidad cm	Arcilla %	Limo %	Arena %	Clase textural	Densidad aparente $g\ cm^{-3}$	pH 1:1 agua	MO %	CO %	CIC cmol (+) kg
A	12-50	17.3	59.10	23.59	Mig. Limoso	1.2	8.0	2.61	1.51	19.91
C	50-74	16.1	58.70	25.19	Mig. Limoso	1.37	8.3	1.79	1.04	13.46
2Ck	74-96	41.35	37.46	21.19	Franco	1.23	8.1	2.1	1.21	35.52
2Ck2	96-118	9.7	73.10	17.19	Mig. Limoso	1.09	8.3	2.07	1.20	6.41
3C	118-150	29.9	49.70	20.39	Franco	< 1	8.1	1.12	0.65	34.90

Horizonte	$CaCO_3$ %	PSB	CE $dS\ m^{-1}$	Valor n	P_2O_5	Estabilidad de agregados
Ap	2.8	82.48	1.64	0.5	110	Moderadamente estables (2.645)
A	3.3	95.88	1.1	0.51	122	Moderadamente estables (2.087)
C	5.3	72.47	1.1	0.34		-----
2Ck	15.6	91.12	1.1	0.35		
2Ck2	9.6	65.02	1.1	0.34		
3C	0.9	66.90	1.1	0.2		

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de un Entisol sometido a labranza tradicional.

Hori- zonte	Profun- didad	Arcilla	Limo	Arena	Clase textural	Densidad aparente	pH 1:1 agua	MO	CO	CIC
	cm	-----	% -----			g cm ⁻³		-----	% -----	cmol (+) kg
Ap	0-10	24.5	61.2	18.2	Migajón limoso	1.3	8.2	2.1	1.1	35.3
A	10-20	16.9	60.2	22.9	Migajón limoso	1.27	8.1	1.8	1.04	17.2

Hori- zonte	Profun- didad	CaCO ₃	PSB	CE	Valor n	P ₂ O ₅	Estabilidad de agregados
	cm	%		dS m ⁻¹			
Ap	0-10	-	83.2	1.56	0.72	122	No estables (0.34)
A	10-20	-	89.3	1.2	0.72	98	No estables (0.32)

pues este es de origen geológico acumulado durante la presencia del lago (Gutiérrez y Ortiz, 1999) y no secundario como lo exige la Taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 1994). Es un suelo formado por diferentes depositaciones lacustres como aluviales y aún son apreciables las características de los depósitos. Con todos los resultados reunidos, el suelo se designó hasta subgrupo como **Typic ustifluent**, que significa que el suelo es joven, formado por diferentes depositaciones, en un régimen de humedad ústico, que no ha desarrollado ningún proceso pedogenético como para que se exprese formando horizontes de diagnóstico.

Análisis Micromorfológico

Existen diferencias en la micromorfología de los dos sistemas de labranza sobre todo en el tipo de materia orgánica, fábrica birrefringente, porosidad y microestructura. En el Cuadro 4, se reportan características morfológicas de los dos sistemas estudiados, obtenidos a través del análisis micromorfométrico.

Materia orgánica. Cuando el sistema de labranza es de conservación, la materia orgánica en los horizontes superficiales (0 a 50 cm) se presenta en diferentes estados de descomposición hasta su completa humificación, la cual se aprecia como material amorfo de color pardo oscuro que impregna a las partículas del suelo y genera una fábrica-b moteada, es decir, enmascara la birrefringencia de algunas arcillas, además, se encuentra estrechamente relacionada con óxidos de Fe. De acuerdo con Miedema (1997), la materia orgánica humificada es la responsable de unir a las partículas primarias y dar estabilidad a los agregados. En el suelo con labranza tradicional hay restos vegetales pero menos de 2 % de materia orgánica humificada, de tal forma que los minerales

exhiben sus características ópticas perfectamente (fábrica-b cristalítica) y no haya gentes enlazantes de tipo orgánico o inorgánico que una a las partículas.

Microestructura y porosidad. En el sistema de labranza de conservación hay diferencias en cuanto a la microestructura y porosidad del suelo. Cuando se cultiva **trigo**, la actividad biológica juega un importante papel; es decir, hasta 20 cm de profundidad dominan los agregados granulares y migajosos (agregados más porosos), de los cuales muchos corresponden a excrementos de fauna del suelo (Figura 2a) y de bloques subangulares, como resultado del redondeo por raíces. El material es poroso (hasta 40 %) dominando los de empaquetamiento compuesto con algunos canales en la masa del suelo.

Cuando se tiene **alfalfa**, cultivo establecido desde hace cinco años, los bloques subangulares (Figura 2b) predominan sobre los granulares, los excrementos disminuyen drásticamente (de 28.7 a 5.4 %) y solamente están relacionados a los poros canales como un rasgo y no como parte de la estructura del suelo, además se presentan fisuras.

Aunque hay diferencias morfológicas (tipos y frecuencia de agregados y poros) en el mismo sistema con respecto al cultivo, en ambos suelos los agregados son moderadamente estables. La diferencia en el comportamiento del trigo con respecto a la alfalfa se puede explicar en parte por el crecimiento radicular que presenta cada planta. El trigo tiene un crecimiento de raíces cercano a la superficie, mientras que la alfalfa su influencia es más hacia los horizontes inferiores, donde se apreció cómo sus raíces redondean a los agregados e inclusive orientan las partículas perpendicularmente (Figura 3).

Los poros canales y de empaquetamiento compuesto son macroporos que favorecen al rápido y

Cuadro 4. Datos promedios de un Entisol laboreado con dos sistemas de labranza.

Labranza de conservación con trigo								
Profundidad	Porosidad	Tipos de poros			Agregados	Tipos de agregados		Excrementos
		Emp C [†]	Fisuras	Canales		Granular	B. subangulares	
cm	%	-----	%	-----	%			%
0-3	40.3	36.3	0.0	4.0	59.7	39.3	20.4	28.7
3-6	35.2	30.1	0.0	5.1	64.8	25.3	39.5	18.3
6-9	35.3	30.4	0.0	4.7	64.7	27.6	37.1	20.1
9-12	33.7	29.6	0.0	8.1	66.3	27.9	38.4	16.9
12-15	35.7	32.1	0.0	3.6	64.3	50.2	14.1	27.9
15-18	34.2	31.9	0.0	2.3	65.8	48.5	17.3	25.8
18-20	34.4	30.8	0.0	3.6	65.6	45.2	20.4	32.1

Labranza de conservación con alfalfa								
Profundidad	Porosidad	Tipos de poros			Agregados	Tipos de agregados		Excrementos
		Emp C [†]	Fisuras	Canales		Granular	B. subangulares	
cm	%	-----	%	-----	%			%
0-3	34.9	10.1	14.8	10.0	65.1	16.2	48.9	5.4
3-6	34.0	14.8	14.2	5.0	66.0	20.8	45.2	4.8
6-9	29.8	15.1	10.2	4.5	70.2	4.8	65.4	4.6
9-12	32.4	10.5	17.8	4.1	67.6	6.9	60.7	4.5
12-15	32.2	10.3	18.0	3.9	67.8	7.6	60.2	4.0

Labranza tradicional								
Profundidad	Porosidad	Tipos de poros			Agregados	Tipos de agregados		Excrementos
		Emp C [†]	Fisuras	Cavidades		Granular	B. subangulares	
cm	%	-----	%	-----	%			%
0-3	21.3	11.0	0.0	10.0	78.7	53.5	25.2	2
3-6	21.9	9.8	0.0	12.1	78.1	53.4	24.7	2
6-9	23.2	10.2	4.8	8.2	76.8	49.0	27.8	0.0
9-12	29.9	5.3	9.8	14.8	70.1	14.9	55.2	0.0
12-15	25.1	6.8	6.2	12.1	74.9	8.9	66.0	0.0

[†] C: compuestos. [‡] C: complejo.

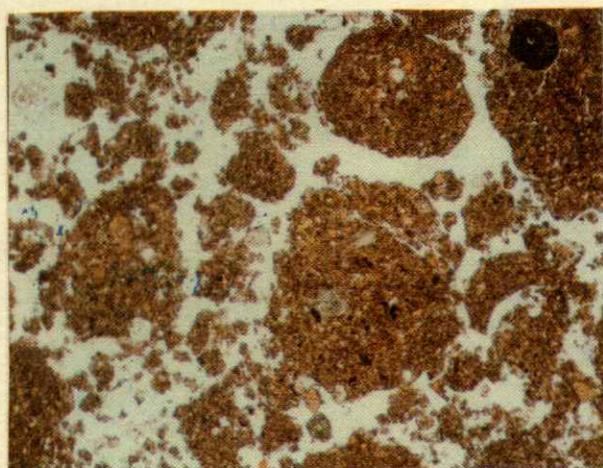
fácil drenaje del agua y disponibilidad de oxígeno, son continuos y permanentes y se forman como resultado de la actividad biológica, sobre todo de lombrices, hormigas y ácaros (excrementos) y por el acomodamiento de agregados granulares y bloques subangulares. Estos últimos agregados aportan nutrientes y retienen agua para hacerla disponible para las plantas, lo que favorece al desarrollo de las plantas (Pape y Legger, 1994).

En el sistema de labranza tradicional, la porosidad disminuye notablemente (con un rango de 21 a 29.9%), con respecto al sistema de labranza de conservación, no hay poros canales, pero sí poros de tipo cavidad que se formaron por el acomodamiento parcial de los bloques subangulares. Los poros de empaquetamiento compuestos y complejo dominan aunque están compactados por lo que disminuye el espacio poroso, además se presentan fisuras. De acuerdo con Brewer y Sleeman (1963), los poros de

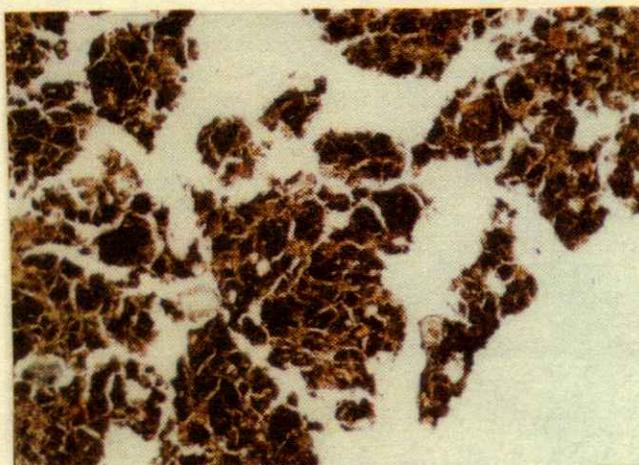
empaquetamiento complejo se forman como resultado del empaquetamiento de partículas primarias (feldespatos, cuarzos, etc.) y fragmentos de agregados.

Los agregados dominantes son los granulares pero éstos son artificiales (Figura 4) originados por la pulverización del suelo superficial como resultado del laboreo, y subangulares los cuales tienen a incrementarse con la profundidad. La característica de este suelo es la actividad biológica baja por la ausencia de poros canales con aislados excrementos de lombrices, además, como ya se mencionó, la materia orgánica no está contribuyendo a unir partículas dando como resultado agregados inestables.

Es importante destacar la importancia que ha tenido el crecimiento radical, así como también la población de lombrices en el desarrollo de poros canales y agregados en el cambio estructural del suelo bajo labranza de conservación, el cual se ha caracterizado por el aporte de residuos y la



a. Agregados granulares



a. Bloques subangulares

Figura 2. Microestructura en el sistema de labranza de conservación.

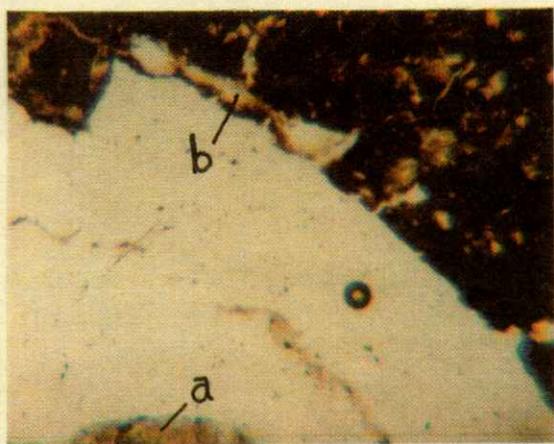


Figura 3. Influencia de las raíces de alfalfa en el redondeo de los agregados

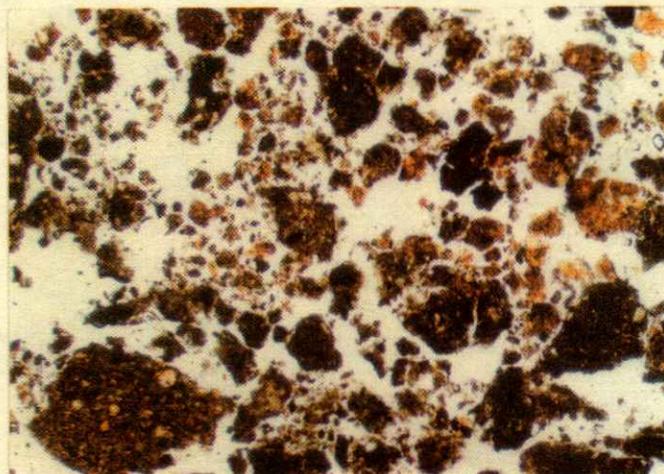


Figura 4. Agregados granulares artificiales.

no-destrucción de la fauna del suelo por maquinaria agrícola. De acuerdo con Marshall y Holmes (1979), con relación a que las prácticas agrícolas alteran la estructura del suelo, en este trabajo se encontró que el manejo como el sistema de cero-labranza puede aportar beneficios al suelo, al incrementar su aptitud en la creación de un sistema poroso continuo y permanente, aumentar el contenido de materia orgánica y actividad de mesofauna hasta el desarrollo de la estructura biogénica, definida por una estabilidad de sus agregados. Estos cambios se aprecian macro y micromorfológicamente en la superficie (20 cm), y han permitido que se esté desarrollando un horizonte ócrico con tendencia a móllico.

La labranza de conservación también está influyendo en los horizontes subsuperficiales y aunque ésta no es significativa como en la superficie, está generando el aumento de la actividad biológica hasta 50 cm de profundidad. Los canales hechos por lombrices son los poros dominantes dentro y transagregados, y domina una estructura de bloques subangulares. Las fisuras no se apreciaron correctamente en el campo debido a que el suelo se encontraba húmedo, sin embargo, a nivel micromorfológico, se pudieron describir con mayor detalle. Estos poros son fisicogénicos como resultado de los procesos de expansión y contracción, las cuales al cerrarse en condiciones húmedas, impiden el flujo del

agua e intercambio de gases, son continuos pero no permanentes, lo cual implica un factor limitativo para el buen crecimiento de los cultivos. Una característica adicional en la descripción de los poros fisura de este suelo fue su rugosidad y acomodamiento de las caras, sobre todo donde se presenta el cultivo de alfalfa, donde las paredes de los agregados se han estado redondeando y aunque se presenten fisuras, su superficie es rugosa de tal forma que sus caras se acomodan parcialmente. Según Bullock *et al.* (1985), la rugosidad cuando hay colapsamiento de las partículas por procesos de humedecimiento, éstas no se unen y quedan poros que favorecen la transmisión de agua.

El tamaño de los poros, ya sea de canales y fisuras fue de 0.5 mm como valor mínimo y hasta 5.0 mm como valor máximo, tamaños que se consideran dentro de los poros clasificados como de transmisión (Hillel, 1980). Pagliai (1994) encontró que los suelos bajo prácticas intensivas de manejo tienen una porosidad total mayor pero presentan una mayor variación a lo largo del año que suelos bajo prácticas de labranza reducida. Estos últimos tienen una mayor proporción de bioporos y poros de transmisión útiles para el transporte de agua, solutos y crecimiento radical. Singh *et al.* (1991), sin embargo, no encontraron que existan diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la porosidad entre cero-labranza y labranza convencional.

Análisis Estadísticos

Diferencias de porosidad y estructura en los sistemas de labranza. Con el análisis de varianza de los datos proporcionados en el Cuadro 2, se encontró que existen diferencias significativas en porosidad y agregados en los dos sistemas de labranza (Cuadro 5). Por ejemplo, el porcentaje de poros, los canales y la ausencia de cavidades distinguen al sistema de labranza de conservación (trigo y alfalfa) y los hace significativamente diferentes respecto al sistema de labranza tradicional, aunque también hay semejanzas entre la labranza de conservación. Hay semejanzas en estos sistemas (alfalfa con tradicional), en cuanto a la frecuencia de excrementos, presencia de bloques subangulares y ausencia de poros de empaquetamiento compuesto.

Influencia del crecimiento radical de la estructura del suelo. Cuando se analizaron los datos obtenidos para determinar si hay influencia de la estructura (densidad aparente) que se presenta en cero labranza

Cuadro 5. Resultados del análisis de varianza de frecuencia y tipo de poros y agregados en dos sistemas de labranza.

Datos	Fc	Nivel de significancia %	Tratamientos semejantes
Porosidad (%)	24.92	1	1-2
Tipos de poros			
Empaquetamiento	115.96	1	2-3
Fisuras	32.25	1	1-3
Canales	10.05	1	1-2
Cavidades	105.83	1	1-2
Agregados (%)	24.92	1	1-2
Tipos de agregados			
Granular	4.37	5	1-3
Bloques sub.	4.44	5	1-3 y 2-3
Excrementos	62.02	1	2-3

con el desarrollo radical del trigo y del maíz, a través de una prueba de Duncan, se encontró que no hay influencia. Bullock (1992) señala que en cualquier sistema de cultivo donde se regrese la mayoría del residuo al suelo, usualmente resulta que la densidad aparente baja, como ocurrió en los dos sistemas trabajados donde la densidad cambió de 1.3 g cm⁻³ (tradicional) a 1.04 g cm⁻³ (conservación). Además, el desarrollo de un sistema más poroso permitió la libre elongación de las raíces en el suelo, tanto del maíz como del trigo, gramíneas que se caracterizan por presentar un desarrollo radicular superficial.

CONCLUSIONES

La labranza de conservación a través de la incorporación de residuos de cosecha y el aumento de la fauna del suelo (lombrices), está contribuyendo a modificar algunas propiedades del suelo en el horizonte superficial (estructura, porosidad, estabilidad de agregados, materia orgánica y retención de humedad), con respecto al sistema de labranza tradicional. Estos cambios están originando que un epipedón ócrico esté desarrollando la mayoría de los requisitos de un móllico a excepción de la consistencia.

Hay diferencias significativas en cuanto al tipo y frecuencia de agregados y poros a una profundidad de 0 a 20 cm, entre el suelo con el sistema de labranza de conservación y tradicional.

No existieron diferencias estadísticas significativas entre las densidades aparentes presentes en el

suelo bajo cero-labranza, con respecto al desarrollo radical del trigo y el maíz.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Carlos Ortiz Solorio, M.C. Lenom Cajuste B. y al Dr. Arturo Galvis S., Profesores Investigadores del Colegio de Postgraduados por la revisión y comentarios del presente trabajo.

LITERATURA CITADA

- Allmaras, R.R. y R.H. Dowdy. 1985. Conservation tillage systems and their adoption in the United States. *Soil & Tillage Res.* 5: 197-222.
- Baver, L.D., W.H. Gardner y W.R. Gardner. 1980. Física de Suelos. 1a Edición en español. UTEHA, México, DF.
- Bisdorn, E.B.A., D. Tessier y J.F.Th. Schoute. 1990. Micromorphological techniques in research and training (submicroscopy). *Dev. Soil Sci.* 19: 581-605.
- Bowen, H.D. 1981. Alleviating mechanical impedance. In: G.F. Arkin and H.M. Taylor (eds.). *Modifying the root properties after 5 years of continuous corn.* *Agron. J.* 69: 383-386.
- Brewer, R. y J.R. Sleeman. 1963. Pedotubules: Their definition, classification and interpretation. *Soil Sci.* 14: 156-166.
- Bullock, D.G. 1992. Crop rotation. *Crit. Rev. Planta. Sci.* 11: 309-326.
- Bullock, P., N. Federoff, A. Jongerius, G. Stoops y T. Tursina. 1985. *Handbook for Soil Thin Section Description.* Waine Research Publications, Wolverhampton, England.
- Cuanalo de la C., H.E. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- FitzPatrick, E.A. y T. Gudmundson. 1978. The impregnation of wet peat for the production of thin sections. *Soil Sci.* 29: 585-587.
- Gutiérrez C., Ma. del C. 1997. Los suelos de la ribera oriental del ex lago de Texcoco (macro y micromorfología). Tesis de Doctorado. Especialidad de Edafología. Colegio de Postgraduados. México.
- Gutiérrez C., Ma. del C. y C.A. Ortiz S. 1999. Origen y evolución de los suelos del ex lago de Texcoco. *Agrociencia* 33: 199-208.
- Hodgson, J.M. ed. 1974. *Soil survey field handbook*, tech monog. No. 5. Soil Survey Rothamsted Exp. Sta., Harpenden, England.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics.* Academic Press, New York.
- Mannering, J.V. y C.R. Fenster. 1983. What is conservation tillage? *Soil Water Cons.* 38: 141-143.
- Marshall, T.J. y J.W. Holmes. 1979. *Soil physics.* Cambridge University Press, London.
- Miedema, E. 1997. Applications of micromorphology of relevance to agronomy. *Advances in Agronomy* 59: 119-169.
- Mooser, F. 1961. Informe sobre la geología de la cuenca del Valle de México, D.F. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.
- Montenegro G., H. y C.D. Malagón. 1990. *Propiedades físicas de los suelos.* Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Instituto de Geográfico Agustín Cadozzi. Bogotá, Colombia.
- Ortiz S, C.A. y H.E. Cuanalo de la C. 1977. Levantamiento fisiográfico del área de influencia de Chapingo. (Para la cartografía de tierras erosionadas). Colegio de Postgraduados. Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, Méx.
- Pagliai, M. 1994. Micromorphology and soil management. *Soil Sci.* 22: 623-640.
- Pape, Th. y D. Legger. 1994. *Manual for soil description and classification.* Department of Soil Science and Geology. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Singh, P., R.S. Kanwar y M.L. Thompson. 1991. Macropore characterization for two tillage systems using resin impregnation technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1674-1679.
- Soil Survey Staff. 1951. *Soil survey manual.* Agriculture Handbook N° 18. USDA., Washington, D.C.
- Soil Survey Staff. 1994. *Claves para la Taxonomía de Suelos.* Trad. Carlos A. Ortiz S. y Ma. del C. Gutiérrez C. Publicación Especial No 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Méx.
- Stoops, G. 1993. *Lectures of Micromorphology and Mineralogy.* International Training Center, University of Ghent, Belgium.
- Taylor, S.A. y G.L. Ashcroft. 1972. *Physical edaphology. The physics of irrigated and non irrigated soil.* W.H. Freeman, San Francisco, USA.
- Van Wambeke, V. 1987. *Soil moisture and temperature regimes of Central America Caribbean, Mexico.* SMSS Soil Cons. Serv. USDA. Technical Monograph No. 16. Cornell University.
- Van Reeuwijk, L.P. 1995. *Procedures for soil analysis.* Tech. Pap. No. 9 5th. ISRIC, Wageningen, The Netherlands.

INTEMPERISMO EN TEPETATES Y EN CENIZAS VOLCANICAS Y SU INFLUENCIA EN LA FORMACION DE ANDISOLES

Weathering of Tepetates and Volcanic Ashes and Their Influence on the Formation of Andisols

Silvia Rodríguez Tapia¹, Ma. del Carmen Gutiérrez C., Claudia Hidalgo M. y C.A. Ortiz S.

RESUMEN

En diversos estudios sobre los tepetates, éstos han sido reportados como diferentes materiales piroclásticos con distintos grados de alteración química y física. Sin embargo, no ha sido mencionado el tipo de material piroclástico específico que se estudia, ni se han citado los procesos de intemperismo que se han llevado a cabo sobre estos materiales, ni los procesos pedogenéticos involucrados en la formación de suelos a partir de los mismos. Para determinar la naturaleza de la roca madre, los procesos de intemperismo y los pedogenéticos que han actuado en la formación del suelo actual, se estudiaron dos perfiles de suelos ubicados sobre la ladera occidental del cerro Tlaloc, cerca del poblado de Coatlinchán, Estado de México. Se realizaron análisis mineralógicos para caracterizar al material de origen; análisis micromorfológicos para determinar el grado de alteración de los minerales y para identificar los rasgos pedológicos, y difracción de rayos X (DRX) para identificar los productos secundarios. Para clasificar a los suelos, se realizaron los análisis físicos y químicos específicos. Se presentaron dos tipos de materiales: toba cristalina andesítica (tepetate) y cenizas cristalinas andesíticas (material no consolidado), lo que permitió observar las similitudes y las diferencias entre estos dos materiales piroclásticos. Tanto en la toba como en la ceniza, el intemperismo se inició por los vidrios volcánicos y continuó con los minerales ferromagnesianos. Los productos secundarios generados fueron principalmente amorfos y en menor grado arcillas. La abundante y rápida formación de materiales amorfos produjeron el proceso pedogenético de **andosolitización**. La formación de arcillas (**argilización**) es más importante en la toba (tepetate) que en la ceniza, aun cuando la toba se presenta a mayor profundidad. El material de origen de los suelos estudiados es la ceniza cristalina andesítica, la

toba cristalina andesítica (tepetate) no influyó en la formación del suelo. Los suelos se clasificaron de acuerdo con la leyenda FAO/UNESCO/ISRIC como **Andosoles háplicos** y según la Taxonomía de Suelos como **Typic haplustands**.

Palabras clave: Minerales primarios y secundarios.

SUMMARY

In various studies, 'tepetates' have been reported as piroclastic materials with different grades of chemical and physical alteration. However, the type of specific material studied has not been mentioned, neither the processes of weathering which have been carried out on these materials, nor the pedogenetical processes involved in the formation of these soils. In order to determine the nature of the parent material, the weathering and the pedogenetical processes that have acted in the formation of the current soil, two profiles of soils located on the occidental hillside of the Tlaloc hill, near the village of Coatlinchan, State of Mexico, were studied. Mineralogical analyses were carried out in order to characterize the material of origin; micromorphological analyses to determine the alteration grade of the minerals and to identify the pedological features, and diffraction of X rays (DRX) to identify the secondary products. In order to classify the soils, specific physical and chemical analyses were carried out. Two types of materials were introduced: andesitic crystalline tuff (tepetate) and andesitic crystalline ashes (not consolidated material), which allowed to observe the similarities and the differences between these two piroclastic materials. So much in the tuff as in the ash, the weathering began by the volcanic glasses and continued with the ferromagnesian minerals. The secondary generated products were mainly amorphous and in minor grade clays. The abundant and rapid formation of amorphous materials produced the pedogenetical process of **andosolitization**. The formation of clays (**argilization**) is more important in the tuff (tepetate) than in the ash, although the tuff is present at a greater

Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Edo. de México.

Recibido: Enero de 1999.

Aceptado: Junio de 1999.

depth. The parent material of the studied soils is andesitic crystalline ash, the andesitic crystalline tuff (tepetate) didn't influence the formation of the soil. The soils were classified in accordance with the FAO/UNESCO/ISRIC legend as **Haplic andosols** and according to the Soil Taxonomy as **Typic haplustands**.

Index words: Primary and secondary minerals.

INTRODUCCION

El afloramiento de capas duras y la existencia de suelos someros es un problema serio que enfrentan los habitantes de las zonas agrícolas de temporal en el eje neovolcánico transmexicano. En México, a estas capas duras se les llama tepetates, del náhuatl: **tetl**, que significa piedra y **pétlatl**, que significa petate (Editorial UTHEA, 1952). Los campesinos clasifican a los tepetates de acuerdo con su color y dureza en tepetate blanco (el más duro), tepetate amarillo (el menos duro) y tepetate rojo (de dureza intermedia) (Nimlos y Ortiz, 1987). Su dureza está determinada por la dificultad que representa penetrarlo con el azadón de palo (coa) que usaban los indios para el cultivo.

Salazar (1938), Llerena (1947) y García (1961) consideraron a los tepetates del valle de México como tobas pumosas del Terciario o Cenozoico en proceso de intemperismo. Valdéz (1970) mencionó que los tepetates de la cuenca de México se formaron por el arrastre aluvial de un fanglomerado que posteriormente se consolidó, y Heine y Schönhals (1973) citaron que el origen de los mismos era por depósitos de loess posteriores a grandes glaciaciones. Sin embargo, los estudios sobre la génesis de los tepetates de estos autores no fueron suficientemente precisos y dejaron ambigüedades en cuanto a su definición y formación, por lo que fue necesario identificar nuevamente el material y explicar su dureza. Nimlos (1990), Quantin (1992) y Bertaux y Quantin (1994) afirmaron que los tepetates corresponden a depósitos consolidados de cenizas volcánicas llamados tobas y que la dureza de la toba también se debe a procesos pedogenéticos que contribuyeron a su cementación. Rodríguez (1999) considera que los tepetates corresponden a la amplia clasificación geológica de los materiales piroclásticos consolidados, sólo por procesos diagenéticos, que afloran a la superficie moderadamente alterados en donde continúan su

proceso de alteración, principalmente la **argilización** y en menor grado la **silificación**.

Las investigaciones, que se han realizado sobre los tepetates, han permitido avanzar en el conocimiento de su naturaleza, propiedades y comportamiento; sin embargo, estos estudios han demostrado que son más complejos de lo que se pensaba, por lo que es necesario estudiarlos con más detalle. Aspectos poco tratados han sido el definir las clases de rocas piroclásticas que corresponden a los tepetates y los procesos de intemperismo que se han llevado a cabo en ellos. Tampoco se han reportado los procesos pedogenéticos involucrados en la formación del suelo actual. El estudio de estos aspectos permitirá avanzar en el conocimiento de los tepetates y explicar su comportamiento en las prácticas de manejo y recuperación.

El objetivo del presente trabajo es definir los procesos que participaron en el intemperismo de los materiales de origen de la ladera occidental del cerro Tláloc, para evaluar su influencia en la formación de suelos y clasificar a estos últimos empleando la Leyenda FAO/UNESCO/ISRIC (1988) y la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1994, 1996, 1998).

MATERIALES Y METODOS

Marco Geográfico

El área de estudio se localiza cerca del poblado San Miguel Coatlinchán, Texcoco, Edo. de México, en la cuenca de México, entre los paralelos 19°27' y 19°26' de latitud norte y 98°48' y 98°52' de longitud oeste (Figura 1), sobre la ladera occidental del cerro Tláloc.

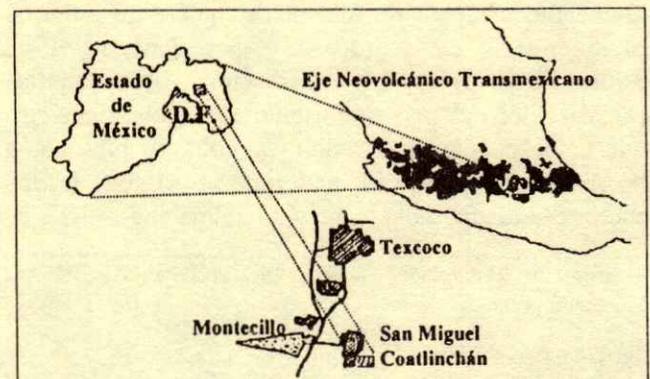
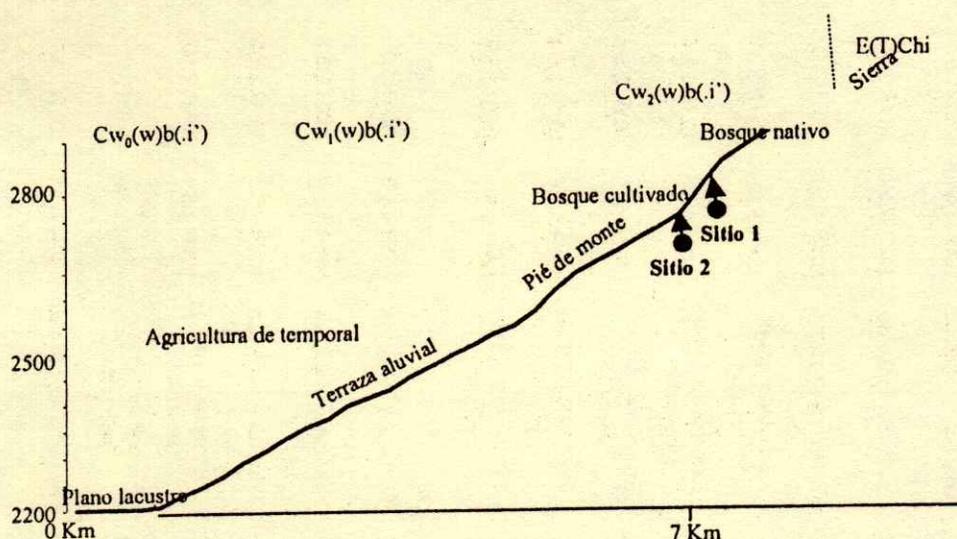


Figura 1. Localización del área de estudio.



El clima está entre el más húmedo templado subhúmedo con lluvias en verano $Cw_2(w)b(i')$ y el frío E(T)Chi (García, 1981). Los suelos que se presentan son cambisoles (INEGI, 1970), con un régimen de humedad ústico y de temperatura isotérmico (Van Wambeke, 1987) (Figura 2).

El relieve de la zona es producto de acumulaciones volcánicas de diverso tipo y magnitud desde el Plioceno hasta el Reciente, de movimientos tectónicos de elevación y hundimiento y de acumulaciones exógenas por corrientes fluviales (Lugo, 1986). La composición petrográfica es variable, principalmente productos piroclásticos andesíticos, dacíticos, riódacíticos y en menor grado riolíticos (Morán, 1984).

Trabajo de Campo

Se eligieron dos sitios que presentaran suelo y tepetate, para poder comparar y determinar el intemperismo de los materiales de origen y su evolución hasta la formación del suelo. Los sitios se localizan a 2800 msnm con una vegetación nativa de bosque húmedo de encino, y a 2700 msnm con vegetación inducida de cedro y eucalipto, con matorrales y hierbas bajas. Los perfiles se describieron morfológicamente utilizando las guías propuestas por Cuanalo (1975) y se tomaron muestras de cada horizonte para los análisis de laboratorio, además de bloques inalterados para su análisis micromorfológico.

Trabajo de Laboratorio

Se determinaron las propiedades y características físicas y químicas de cada horizonte o capa exigidos por Soil Survey Staff para la clasificación de suelos. Se efectuaron análisis texturales, pH en agua relación 1:1, carbono orgánico (CO), densidad aparente (Dap), capacidad de intercambio catiónico (CIC), colores en seco y en húmedo con la carta de colores Munsell. Se realizaron análisis micromorfológicos para describir los rasgos pedológicos para cada perfil, los patrones y grados de alteración de cada especie mineral, así como los respectivos productos secundarios, de acuerdo con el sistema de Bullock *et al.* (1985). Se separaron los minerales de la fracción arena de 100 μm en pesados y ligeros utilizando la metodología propuesta por Moreno (1985) y se cuantificó cada especie mineral para determinar la naturaleza de la roca madre según la clasificación petrográfica de Huang (1968). Se determinaron los minerales secundarios presentes en la fracción fina menor que 2 μm , por difracción de rayos X (DRX) en un difractómetro Shimadzu 5X con tubo de cobre ($\text{CuK}\alpha$). Se elaboraron ensayos naturales de cada horizonte, los cuales se corrieron a partir de los 35 $^\circ\theta$ para enfatizar los picos de los minerales secundarios.

RESULTADOS

En el Cuadro 1 se muestran las principales propiedades de los perfiles estudiados.

Cuadro 1. Principales características de los perfiles estudiados

Hzte. o capa	Prof. en cm	Textura %		pH	Clase textural	CIC		Relación		Ret. de P %	Microestructura	Color		
		Arena	Limo Arcilla			D Ap NH ₄ Oc, 1N-7	PSB Si/Al Molar	%Al+ 1/2%Fe	Fe ₂ O ₃ M&J %			Seco	húmedo	
Perfil 1														
Ah1	0-6	14	78	8	Franca limosa	<1	48	61	0.8	7	5.7	52	10YR 3.5/4	10YR 2/2
2Ah2	6-15	25	67	8	Franca limosa	<1	49	39	1.1	10	4.8	76	10YR 5.5/4	10YR 2.5/2
3Ah3	15-30/36	36	64	0	Franca limosa	<1	48	40	1.1	9	4.6	80	10YR 4.5/4	10YR 3/2
3Ah4	30/36-66	38	61	1	Franca limosa	<1	40	58	1.1	9	4.6	85	10YR 5.5/6	10YR 3.5/4
4A1	66-88	35	60	4	Franca limosa	<1	41	56	1.1	9	5.7	79	10YR 5.5/4	10YR 3.5/4
4A2	88-99	36	53	12	Franca limosa	<1	30	65	1.0	8	5.3	60	10YR 6/6	10YR 3.5/4
4AC	99-125	35	52	12	Franca limosa	1.0	33	67	0.9	7	5.0	48	10YR 5.5/6	10YR 3.5/4
5C	125-165	39	47	14	Franca	1.0	31	53	0.9	7	4.5	31	10YR 6.5/4	10YR 3.5/4
Perfil 2														
Ah1	0-8/13	36	47.1	17	Franca	2.3	33	49	0.7	6	2.9	27	10YR 4.5/3	10YR 2/2
2Ah2	8/13-21	45	35	20	Franca	1.0	19	80	0.7	6	2.9	24	10YR 3.5/4	10YR 2.5/2
3Ah3	21-48	36	47	17	Franca	1.0	27	49	0.7	6	2.8	25	10YR 4.5/3	10YR 2.5/2
4A	48-68	26	43	32	Franca arcillosa	1.4	28	86	0.7	6	3.5	31	10YR 4.5/4	10YR 2.5/2
4AC	68-94	22	41	36	Franca arcillosa	1.4	37	44	0.7	6	4.7	31	10YR 5.5/4	10YR 3/2
5Cr1*	94-110	Cementado			Franca**	1.6	34	40	0.7	6	4.9	30	10YR 4.5/6	10YR 2.5/2
5Cr2*	110-130	Cementado			Franca**	1.7	33	51	0.7	6	4.6	26	10YR 5.5/4	10YR 3/4

C.O.=carbono orgánico; Dap=densidad aparente; CIC=capacidad de intercambio catiónico; PSB=porcentaje de saturación de bases.

*Tepetate; **Textura estimada por micromorfología

Morfología

Los perfiles estudiados presentaron las mismas características morfológicas: En los horizontes superiores se observaron una alta actividad biológica, evidenciada por la acumulación de la hojarasca en diferentes grados de descomposición, abundantes raíces que penetran verticalmente hasta los horizontes intermedios y excrementos de la mesofauna. La descomposición de la materia orgánica influyó en la coloración de los horizontes Ah que son oscuros, los cuales contrastan con los horizontes inferiores claros. La estructura granular y granular muy porosa (migajosa) de los horizontes de la superficie cambió a una de bloques subangulares en los horizontes más profundos, aunque se presentaron pseudoagregados en todo el perfil, conformados por minerales intemperizados de tamaño arena. Ambos son suelos friables y con alta porosidad, alrededor de 50 %. Sólo en el perfil 1 se detectaron propiedades tixotrópicas (untuosidad y desprendimiento de agua al ejercer mayor presión sobre el material) y que según Wada (1989) se originan por la presencia de materiales amorfos, y sólo en el perfil 2 se presentó una discontinuidad marcada en las capas inferiores, por toba cristalina andesítica, la cual corresponde a tepetate.

Análisis de las Variables Físicas y Químicas

La clase textural dominante es la franco-limosa en ambos perfiles, predominan los porcentajes de limo (52 a 78 %), en tanto que los porcentajes de arcilla son bajos (0 a 14 %). Se observa una relación inversamente proporcional entre los contenidos de limo y arena conforme aumenta la profundidad del perfil. A menor porcentaje de arena, mayor porcentaje de limo, mientras que el porcentaje de arcilla también se incrementa con la profundidad aun cuando éste es muy bajo. En el análisis micromorfológico se apreció una gran cantidad de agregados del tamaño de limo compuestos por materiales finos del tamaño de la arcilla, algunos de los cuales seguramente no se dispersaron, por lo que fueron cuantificados en el análisis textural como limo, por lo que es evidente que el método utilizado para la dispersión de los materiales finos no fue eficiente para evaluarlos correctamente. La formación de microagregados arcillosos del tamaño de limo en andisoles de México y su dificultad de dispersión, ya había sido observada por Etchevers *et al.* (1986). Sin embargo, las texturas

con predominio de limo, son características de los andisoles quizá porque los granos de la fracción arenosa estén dando origen a la fracción fina de limo y arcilla (Yamada *et al.*, 1975). El contenido de carbono orgánico de 8 % en los horizontes Ah1 del perfil 1 y de 2.3 % del perfil 2, influyen directamente en algunas propiedades químicas, el pH fue ligeramente ácido en la superficie y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) presenta valores altos (48.1 cmol(+) kg⁻¹) en la superficie que disminuyen hasta 30 cmol(+) kg⁻¹ en los horizontes inferiores. En el tepetate, la CIC fue de 33 cmol(+) kg⁻¹, lo que indica la presencia importante de productos de alteración en éste.

En el perfil 1, la densidad aparente fue menor que 1 g cm⁻³, este valor explicaría la presencia de materiales amorfos cuyas características tixotrópicas fueron identificadas en campo. Los porcentajes de Al₂O₃ (5.3 a 7.5 %) obtenidos con oxalato ácido de amonio para el perfil 1, son similares a algunos de los andisoles reportados por Mizota y Van Reeuwijk (1989). También el contenido relativamente alto de Fe₂O₃ (de 3.1 a 4.1 %) indica la ocurrencia de ferrihidrita, y la relación molar Si/Al de 1.1 indica la presencia de alofano. En el perfil 2, estos valores son más bajos, sin embargo, indican la existencia, aunque en menor escala, de estos mismos productos secundarios. En el perfil 1 la retención de fosfatos fue de 31 a 85 %, lo que se considera alto; mientras que en el perfil 2 la retención de fosfatos fue de 25 % en promedio, que es el porcentaje mínimo que exige la Soil Survey Staff (1994) para considerar que un suelo tiene propiedades ándicas. De acuerdo con Wada (1985), la presencia de alofano influye en la retención de fosfatos.

Se realizó también la extracción del denominado "óxido de hierro libre" (Mehra y Jackson, 1960), que corresponde a la parte cristalina que incluye a la goethita y la hematita <50 µm de diámetro. Lo más notorio en este análisis fue la proporción alta de Fe₂O₃ (>4.6 % en el perfil 1, y >2.8 % en el perfil 2) que está relacionado con la presencia de goethita, cuyos cristales se presentaron distribuidos en láminas perpendiculares a los poros.

Análisis Mineralógico

La composición mineralógica en ambos perfiles es similar (Cuadro 2). Los minerales ligeros que se presentan son plagioclasas, vidrio volcánico, cuarzo y opacos; los minerales pesados son olivino, hornblenda, biotita, hiperstena y también opacos.

Cuadro 2. Análisis mineralógico de la fracción arena de 100 µm.

Horizonte	Prof. Cm	Arenas	Minerales ligeros					Minerales Pesados			
			Olivino	Opacos	Hornblenda	Biotita	Hipers-tena	Plagioclasas	Vidrio	Cuarzo	Opacos
		%	-----					%	-----		
Perfil 1											
Ah1	0-6	14	5	3	4	2	3	48	22	9	4
2Ah2	6-15	25	5	1	5	3	3	42	35	2	3
3Ah3	15-30/36	36	9	2	6	4	2	49	18	3	5
3Ah4	30/36-66	38	15	3	5	3	2	38	22	6	6
4A1	66-88	35	13	3	6	5	2	39	22	6	6
4A2	88-99	36	11	1	5	2	2	54	21	5	0
4AC	99-125	35	12	1	10	2	2	46	17	6	1
5C	125-165	39	21	4	14	1	2	38	20	4	2
Perfil 2											
Ah1	0-8/13	36	10	1	7	2	4	46	19	5	6
2Ah2	8/13-21	45	10	1	8	3	4	44	19	5	6
3Ah3	21-48	36	10	1	7	2	4	46	19	5	6
4A	48-68	26	7	1	5	2	3	49	21	6	7
4AC	68-94	22	9	1	7	2	3	47	20	5	6
5Cr1*	94-110	17	7	1	5	2	3	50	21	6	7
5Cr2*	110-130	19	7	1	6	2	3	50	21	6	7

*Tepetate

Todos son minerales intemperizables, excepto el cuarzo (Soil Survey Staff, 1994). Las plagioclasas son los minerales esenciales; la hiperstena, la hornblenda y la biotita son los minerales secundarios; el olivino y los opacos son los minerales accesorios y el vidrio volcánico es el mineral característico.

Por la composición mineralógica y el contenido de cuarzo menor que 10 % en todo el perfil, se clasificó a la roca madre como ígnea de composición andesítica, es decir, intermedia por su contenido de sílice (Huang, 1968). Este análisis se complementó con el micro-morfológico y se observó que los materiales originales presentan una textura clástica, típica de una roca sedimentaria, con una matriz compuesta por cristallitos de tamaño limo, de la misma composición mineralógica que las arenas, pero asociada con materiales amorfos y orgánicos. El material no mostró evidencias de algún proceso de cementación por lo que petrográficamente se le clasificó como **ceniza volcánica cristalina andesítica**. Las dos capas Cr del perfil 2 corresponden a un material cementado (tepetate) con la misma naturaleza mineral que la ceniza cristalina andesítica y petrográficamente se le clasifica como **toba cristalina andesítica**.

Micromorfología

Microestructura. Los dos perfiles presentaron las mismas características micromorfológicas en los horizontes superficiales: microestructura granular y migajosa (granular muy porosa) en la superficie, la cual disminuye gradualmente hasta una microestructura "esponjosa" en los horizontes más profundos; alta porosidad (alrededor de 50%); materia orgánica fragmentada con material mineral fino y grueso en los horizontes superiores como resultado de la intensa actividad biológica; fábrica birrefringente indiferenciada por la presencia de materiales amorfos, minerales intemperizables y vidrio volcánico, principalmente en la fracción limo. Estas características coinciden con las propuestas por Stoops (1983) como propiedades de diagnóstico para andisoles. Los rasgos pedológicos observados en las cenizas volcánicas fueron excrementos abundantes en los horizontes Ah, pseudomorfos de vidrio volcánico de arcillas del tipo 1:1 en los horizontes intermedios y en los más profundos rasgos criptocristalinos y amorfos, los cuales se presentaron como revestimientos isotrópicos sobre granos minerales. Estos últimos rasgos fueron identificados por Stoops (1983), quién señaló que son característicos de los suelos

áridos con cenizas volcánicas, no obstante, estos rasgos amorfos no están restringidos a un ambiente en particular, pues por su abundancia en los suelos estudiados, se pueden formar en ambientes húmedos con un régimen ústico. Otro rasgo importante identificado, pero sin ninguna relación con las cenizas volcánicas, fueron revestimientos arcillosos laminares principalmente en los tepetates (Crt), lo que indica que los procesos de alteración y pedogenéticos no han sido los mismos en ambos materiales.

La materia orgánica humificada aparece al microscopio óptico como partículas microcontrastadas del tamaño de la arcilla, ya sea en la masa del suelo o en los agregados migajosos (granulares muy porosos). Se identificaron además, abundantes fitolitos en el suelo y en el material materno. Estos son isotrópicos y se forman por la acumulación de sílice en las células de las plantas (Bullock *et al.*, 1985). Se sabe que los fitolitos son relativamente abundantes en la mayoría de los materiales que forman los suelos ácidos. Aunque no se tiene una explicación congruente de su presencia en la toba, probablemente estos fragmentos no sean realmente fitolitos sino vidrios volcánicos alterados. Las motas oscuras de manganeso y los escasos hipo-revestimientos de hierro en los horizontes inferiores indican que la saturación se produjo por periodos de varios días, correspondiendo a un hidromorfismo de débil a moderado (Veneman *et al.*, 1976). En el perfil 1 se observó con más tendencia a moderado, quizá por la conservación de la vegetación nativa sobre las cenizas.

Clasificación de Suelos

Son suelos de naturaleza mineral, presentaron un epipedón ótrico y no reúnen los requisitos de cualquiera de los otros seis epipedones. El color en seco es claro para ser mólico. En el caso del perfil 1, aunque tiene propiedades ándicas, el "value" en húmedo y el "chroma" no es de 2 ó menos en un espesor de 30 cm dentro de un total de 40 cm, y el carbono orgánico ponderado es >4 % sólo en 13 cm, por lo que no es melánico. Ambos suelos no presentan horizonte de diagnóstico subsuperficial. Presentan un contenido de carbono orgánico menor que 25 %. El perfil 1 presenta en la fracción de tierra fina una retención de fosfatos mayor que 50 %; 60 % de partículas son finas de 0.02 a 2 mm y más de 5 % es vidrio volcánico; el porcentaje de aluminio más de la mitad del porcentaje de hierro (por oxalato de amonio) es de 8.2 %. El perfil 2 presenta en la fracción de

tierra fina en promedio una retención de fosfatos de 28 %; 41 % de partículas son finas de 0.02 a 2 mm y más de 5 % es vidrio volcánico; el porcentaje de aluminio más la mitad del porcentaje de hierro (por oxalato de amonio) es de 6 %. La Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1994) exige como mínimo, para considerar a un suelo con propiedades ándicas una retención de fosfatos de 25 %; un contenido de partículas tamaño limo de 30 %; el porcentaje de aluminio más la mitad del porcentaje de hierro (por oxalato de amonio) de 2 % y en la fracción limo 5 % de vidrio volcánico. De acuerdo con estas características de diagnóstico, estos suelos se clasifican como **Typic Haplustands** y con el sistema FAO/UNESCO/ISRIC (1988) como **Andosoles háplicos (Anh)**.

Patrón de Alteración de los Minerales

Minerales primarios. Los porcentajes y el comportamiento de los minerales primarios de la fracción arena, son similares en ambos perfiles estudiados. Se presentan con el siguiente orden de abundancia: plagioclasas, vidrio, olivino, hornblenda, cuarzo y biotita (Cuadro 2).

- Plagioclasas: El patrón de alteración que presentaron las plagioclasas en láminas delgadas es complejo y de grado 0 a 1. El intemperismo inició en las maclas y en las fracturas, aunque no se observó material secundario acumulado en ellas.

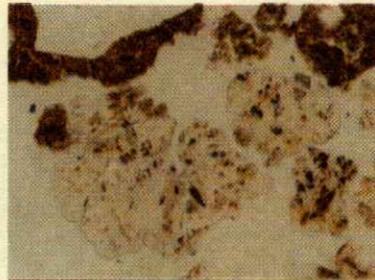
- Vidrio volcánico: Se observaron vidrios ácidos y básicos, aunque el vidrio básico en mucho menor proporción.

- Vidrio ácido: Presentó un patrón de alteración pelicular de grado 1 a 4. La alteración de grado 1 a 3 se observó en las fracturas perlíticas y alrededor del vidrio, el cual disminuyó su tamaño, hasta quedar núcleos más pequeños con el material secundario amorfo alrededor de ellos (Figura 3a). La alteración de grado 4 se observó en fragmentos pseudomorfos de arcilla tipo 1:1, de color pálido en luz polarizada paralela (Figura 3b) y grises de primer orden y un aspecto de acordeón en luz polarizada cruzada (Figura 3c), característico de la kaolinita.

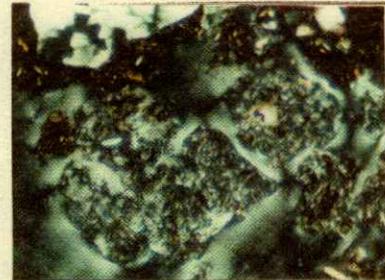
- Vidrio básico: Presentó un patrón de alteración de grado 2 hasta 4. Los vidrios están palagonitizados, es decir, casi toda el área es de color rojizo (Figura 3d). La palagonitización en un principio se pensó que podría ser pedogenética, pero se ha comprobado que es un proceso de transformación que ocurre antes de su deposición (Stoops, 1983).



a. Vidrio volcánico ácido con material amorfo alrededor (LPP)



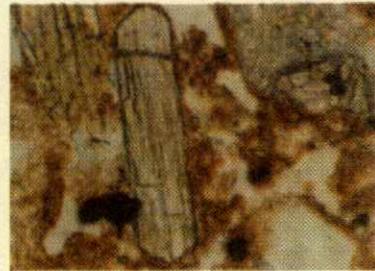
b. Pseudomorfos de arcilla del tipo 1:1 de vidrio volcánico ácido (LPP)



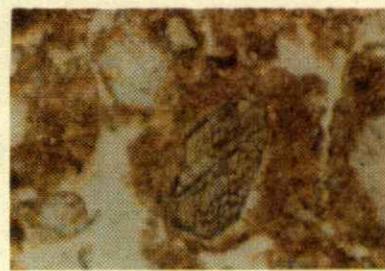
c. Pseudomorfos de arcilla del tipo 1:1 de vidrio volcánico ácido (LPC)



d. Vidrio volcánico básico palagonitizado (LPP)



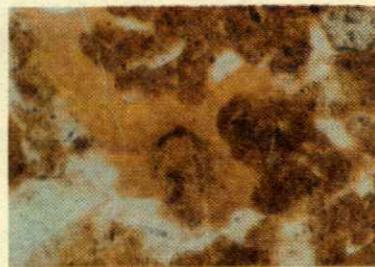
e. Olivino con pérdida de color y fracturas marcadas (LPP)



f. Hornblenda con sistema de grietas bien marcada (LPP)



g. Minerales del tamaño arena fina y limo asociados con material amorfo (LPP)



h. Revestimientos arcillosos laminares (LPP)



i. Revestimientos arcillosos laminares (LPC)

Figura 3. Microfotografías de la alteración de minerales de los perfiles 1 y 2.

- Olivino: Este mineral presentó un patrón de alteración pelicular de grado 1 a 4, que se observó por la disminución del color, el cual se tornó en algunos minerales de verde olivo a amarillento o pardo-rojizo producto de la pérdida de algún elemento químico (Figura 3e). Presentó también un patrón de alteración lineal irregular de 0 a 2, que se apreció como menas de hierro en las fracturas del mineral, donde se precipitó goethita.

- Hornblenda: Este mineral presentó un patrón de alteración lineal de grado 0 a 1, donde el intemperismo ocurrió a través del sistema de grietas de

crucero como líneas negras, probablemente por la acumulación de manganeso (Figura 3f).

- Hiperstena: En las láminas delgadas este mineral presentó un patrón de alteración lineal de grado 0 a 1 en el sistema de grietas de crucero, donde se presenta un color pardusco, probablemente óxidos de hierro.

- Cuarzo: En las láminas delgadas se observó principalmente cuarzo hexagonal, con golfos de corrosión, los cuales son típicos de los cuarzoes volcánicos que fueron formados por procesos geológicos antes de su depósito.

- Biotita: Las micas en estos suelos presentaron un patrón de alteración lineal paralela y de grado 0 a 1 en las líneas de crucero.

Las observaciones anteriores muestran que la alteración química, por disolución pelicular ha provocado que los minerales, principalmente el vidrio volcánico, disminuyan su tamaño y se generen amorfos en su superficie, mientras que en los minerales cristalinos, más resistentes al intemperismo, sólo se inició en los planos de fragilidad como cruceros, maclas o fracturas (Figura 3g). El grado de alteración de los vidrios y cristales está relacionado con la profundidad del suelo, ya que es en la superficie en donde se aprecian más productos secundarios y minerales más alterados. Con la profundidad la alteración disminuye, aunque en estos perfiles no se observó a la roca madre inalterada.

Minerales secundarios. La fracción fina (<2 µm) del suelo (Cuadro 3) es considerada como el resultado de la alteración física (disminución de tamaño de algunos minerales hasta la fracción arcilla) o química (productos secundarios) de los minerales primarios, por esto en los difractogramas se presentaron picos de minerales primarios como feldespatos (de 0.215 a 0.325 nm), goethita (de 0.418 y 0.245 nm), hornblenda (de 0.27 y de 0.309 nm) y hematita (de 0.27 y 0.638 nm), así como de cristobalita cristalina (por sus picos bien definidos a 0.404 nm), típica de rocas ígneas.

Los materiales secundarios amorfos se manifestaron en DRX por las bandas anchas entre 0.356 y

0.448 nm, centradas a 0.425 nm. El intemperismo del vidrio volcánico generó cantidades importantes de amorfos tipo alofánico, por la relación molar Si/Al de 1:1 determinada por oxalato ácido de amonio y los silicatos que contienen hierro ferroso (olivino, hornblenda, hiperstena y biotita) produjeron ferrihidrita, lo que se manifestó por el contenido relativamente alto de Fe₂O₃ determinado por ditionito. Por el proceso de oxidación, el Fe²⁺ cambia Fe³⁺, desestabilizando la estructura de los minerales ferromagnesianos, y provocando la precipitación de goethita. Parte del hierro y del manganeso que se liberaron como productos de la hidrólisis de los ferromagnesianos formaron compuestos pardo a rojizo y negro, respectivamente. El comportamiento de ambos elementos fue diferente, es decir, la movilidad del hierro fue mínima, apenas para penetrar en los intersticios inter e intragranulares de minerales o rocas y recubrir irregularmente sus superficies, mientras que la movilidad del manganeso fue mayor, lo que le permitió acumularse en las capas impermeables inferiores (tepetate).

Lo anteriormente expuesto confirma que estos suelos se encuentran en una fase de formación de amorfos, aunque en el perfil 2 ya se inició un proceso de cristalización, lo que es evidente por la presencia de metahalloysita en la difracción de rayos X (picos bien definidos y largos de 7.5 a 7.65 nm).

Los materiales secundarios en la toba cristalina (tepetate), aunque provinieron de los mismos minerales, con los mismos patrones y grados de

Cuadro 3. Análisis mineralógico de la fracción arcilla <2 µm.

Hori- zonte	Profun- didad cm	Amorfos	Meta- halloysita	Arcillas Tipo 1:1	Goethita	Horn- blenda	Hematita	Cristoba- lita	Feldespatos
Perfil 1									
Ah1	0-6	XXX	-	-	-	X	-	X	X
2Ah2	6-15	XXX	-	-	-	X	-	X	X
3Ah3	15-30/36	XXX	-	-	-	X	-	X	X
3Ah4	30/36-66	XXX	-	-	-	X	-	X	X
4A1	66-88	XXX	-	-	-	X	-	X	X
4A2	88-99	XXX	-	-	-	X	-	X	X
4AC	99-125	XXX	-	-	X	X	X	X	X
5C	125-165	XXX	-	-	X	X	X	X	X
Perfil 2									
Ah1	0-8/13	XX	X	-	X	X	X	X	X
2Ah2	8/13-21	XX	X	-	X	X	X	X	X
3Ah3	21-48	XX	X	-	X	X	X	X	X
4A	48-68	XX	X	-	X	X	X	X	X
4AC	68-94	XX	X	-	X	X	X	X	X
5Cr1 [†]	94-110	XX	X	X	X	X	X	X	X
5Cr2 [†]	110-130	XX	X	X	X	X	X	X	X

[†]Tepetate.

alteración que los de las cenizas volcánicas, son diferentes. En los Tepetates se observaron intercalaciones, revestimientos y rellenos arcillosos menores que 200 μm , asociados con poros y con superficies minerales, los cationes liberados del intemperismo migraron a distancias pequeñas, debido a la humedad moderada y a la porosidad intrínseca de la toba cristalina, y se acumularon en el espacio poroso (Figuras 3h,i), que de acuerdo con DRX, por una banda hkl a 0.44 nm, son arcillas del tipo 1:1 no bien orientadas y metahalosita.

La velocidad de alteración de los minerales es mayor en el perfil 1, probablemente por la mayor humedad del suelo, vegetación nativa y mayor altura que el perfil 2, condiciones que provocaron la aceleración de las reacciones de hidrólisis de los vidrios.

Modelo de Formación de Andisoles

De acuerdo con las evidencias acumuladas se propone el siguiente modelo para explicar la formación de andisoles a partir de cenizas volcánicas cristalinas andesíticas como material de origen en el área estudiada (Figura 4).

Como consecuencia de la intensa actividad volcánica de esta zona, importantes cantidades de cenizas se acumularon de una emisión sobre otra, hasta formar grandes espesores.

Los primeros depósitos de cenizas quedaron confinados a diferentes profundidades y por procesos diagenéticos, se consolidaron y se convirtieron en tobas; el cementante de las tobas es la sílice, producto de la desvitrificación masiva de los vidrios volcánicos en un ambiente diagenético. Las últimas emisiones de cenizas se acumularon sobre las depositadas anteriormente, por lo que quedaron en la superficie o muy cerca de ella, por lo que no se llevaron a cabo procesos de diagénesis que las litificaran. Esta es la razón por la que las cenizas (material piroclástico no cementado) se ubican en las zonas más elevadas, y las tobas (cenizas cementadas) en las zonas intermedias y más profundas. Como resultado de los cambios geológicos que transformaron el paisaje (movimientos tectónicos y erosión), generalmente las cenizas se localizan en las crestas de las montañas, y las tobas quedan expuestas en las laderas de las mismas. Esta es la razón por la que el perfil 1, que está más alto (2800 msnm), no presentó tepetate y en el perfil 2 (a 2700 msnm), el tepetate se encontró en las capas inferiores.

Dada la naturaleza fácilmente intemperizable del material de origen, que consiste de minerales intemperizables y un porcentaje importante de vidrio volcánico y bajo condiciones de cierta humedad y buen drenaje que permitieron la hidrólisis, se efectuó la transformación mineral *in situ* que produjo una

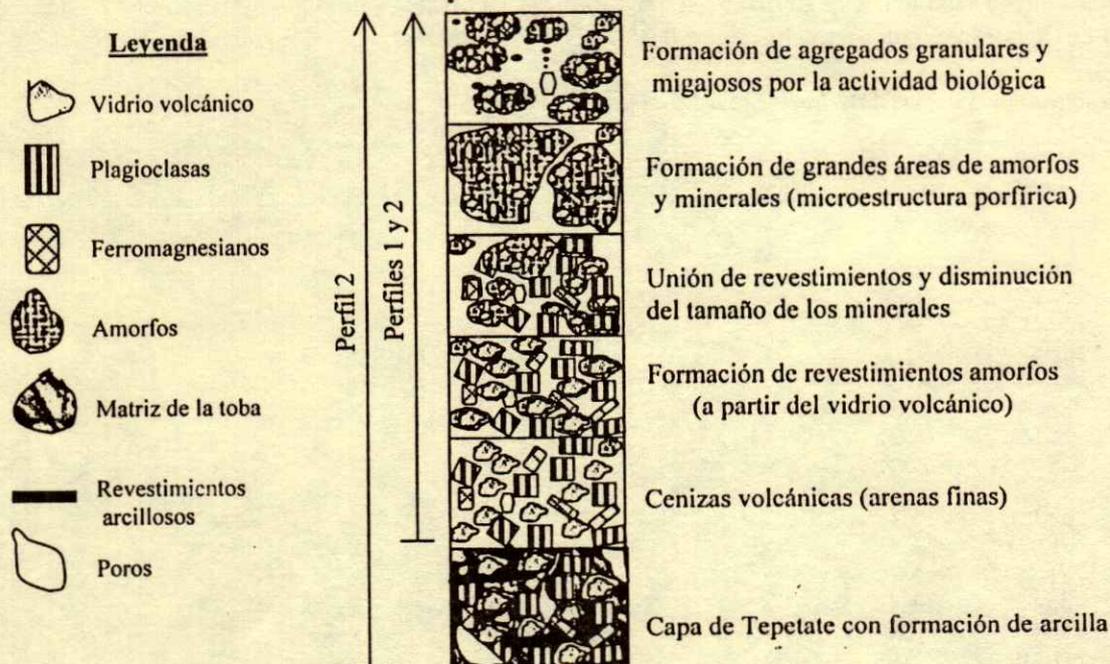


Figura 4. Modelo propuesto para la formación de Andisols a partir de ceniza cristalina andesítica.

rápida y abundante cantidad de materiales amorfos. A este proceso se le llama **andosolitización** (Hetier, 1975; Duchaufour, 1977).

Primero, alrededor de los vidrios volcánicos, se formaron revestimientos isotrópicos. Posteriormente también las plagioclasas y los ferromagnesianos formaron revestimientos amorfos. Con el avance del intemperismo, el tamaño arena de los minerales cambió a limo hasta ser la fracción dominante.

El material amorfo, cada vez más abundante y el incremento en la porosidad por la pérdida de elementos forma una microestructura "esponjosa".

En los horizontes superficiales, la incorporación de la materia orgánica y la acción de la fauna sobre las cenizas forma una estructura de agregados granulares y migajosos.

En las capas inferiores de tobas cristalinas (tepetate), se lleva a cabo la **argilización** (formación de arcillas por la alteración de los minerales primarios) y la **iluviación** (emigración de arcillas a cortas distancias dentro de la misma toba), formando revestimientos. Sin embargo, la toba cristalina andesítica no se considera un horizonte argílico porque ésta no ha perdido aún su estructura de roca (Soil Survey Staff, 1994).

CONCLUSIONES

El intemperismo químico de disolución e hidrólisis, de los vidrios volcánicos ácidos y de los ferromagnesianos, es el proceso pedogenético más importante en ambos suelos y en el material de origen. Los productos secundarios son amorfos en cantidades importantes, que generan el proceso de **andosolitización**.

El intemperismo físico provoca la disminución en el tamaño de partícula, de arena fina a limo. Este proceso está íntimamente relacionado con el intemperismo químico.

El intemperismo biológico se presenta con mayor intensidad en los horizontes superficiales.

El material materno y la interacción de los procesos pedogenéticos están generando **Andosoles háplicos**. Sus manifestaciones morfogenéticas se aprecian más claramente a mayores altitudes.

En el perfil 2 se efectúan los procesos de **argilización e iluviación** y aunque se presenta tepetate (toba cristalina moderadamente alterada) éste no influye en la formación del suelo.

LITERATURA CITADA

- Bertaux, J. y P. Quantin. 1994. Relation géométrique et variations minéralogiques des différents termes d'une séquence d'altération de tufs pyroclastiques de la région de Texcoco (México). pp. 232-233. *In*: Transactions of the 15th International Congress of Soil Science. Vol. 5. Acapulco, Mexico.
- Brownlow, A.H. 1996. Geochemistry. 2nd Edition. Editorial Prentice-Hall, USA.
- Bullock, P., N. Fedoroff, A. Jongerijs, G. Stoops y T. Tursina. 1985. Handbook for soil thin section description. Waine Res. Pub. Wolverhampton, England.
- Cuanalo de la Cerda, H. 1975. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Dana, E.S. y W.E. Ford. 1976. Tratado de mineralogía. Traducción de Alberto Berumen. Editorial CECSA.
- Duchaufour, P. 1977. Pedology. Traducción de T.R. Paton. Mason Publishing, New York. pp. 306-334.
- Editorial UTHEA. 1952. Diccionario Enciclopédico. Tomo IX. UTHEA, México. p. 1261. México.
- Etchevers B., J.D., K. Oleschko, L. Cruz y C. Hidalgo. 1986. Complex nature of the mechanical elements in Andisols from Mexico. *In*: Transactions XIII Congress of the International Society of Soil Science. Hamburgo, Alemania. p. 55.
- FAO, UNESCO, ISRIC. 1988. Mapa mundial de suelos. Leyenda Revisada. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 60.
- Fisher, R.V. y H.U. Schmincke. 1984. Pyroclastic rocks. Springer-Verlag, Berlin.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Offset Larios, S.A.
- García, E.A. 1961. Estudio de los suelos tepetatosos y las posibilidades de su recuperación agrícola. Tesis. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.
- Heine, K. y E. Schönhals. 1973. Entstehung und Alter der Toba-sedimente in Mexiko, pp 201-215. *In*: Eiszertalter und Gegenwart, Band 23/24.
- Hetier, J.M. 1975. Formation et évolution des Andosols en climat tempéré. Thèse Doc. Etat, Univ. Nancy I.
- Huang, T.W. 1968. Petrología. Traducción al español de Rafael García Díaz. Editorial UTHEA. México.
- INEGI. 1970. Carta edafológica Chalco E14B31.
- Llerena, L.D. 1947. El distrito de conservación del suelo y agua de Chapingo, México. Tesis, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México.
- Lugo Hubp, J. 1986. El sistema neovolcánico mexicano. Una de las regiones más activas. Información Científica y Tecnológica 8-112: 33-35.
- Mehra, O.P. y M.L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate systems buffered with sodium bicarbonate. Clays clay Miner. 7: 317-327.
- Mizota, C. y L.P. van Reeuwijk. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. Soil Monograph 2. ISRIC. Wageningen, The Netherlands.
- Morán Zenteno, D.J. 1984. Geología de la República Mexicana. Convenio UNAM-INEGI. México.

- Moreno, C. 1985. Mineralogía de las arenas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coah. México.
- Nimlos, T.J. 1990. Morphology, genesis and classification of soils formed over Mexican tepetate. *Soil Survey Horizons* 30(3): 72-77.
- Nimlos, T.J. y C.A. Ortiz S. 1987. Tepetate the rock mat. *J. Soil Water Conservation* 42: 83-86.
- Quantin, P. 1992. L'induration des matériaux volcaniques pyroclastiques en Amérique Latine: Processus Géologiques et Pédologiques. *Terra* 10: 24-33.
- Rodríguez T., S. 1999. Procesos de intemperismo en tepetates y su influencia en la formación de suelos. Tesis de Maestría en Ciencias. Especialista en Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Salazar, L. 1938. Elementos de geología. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Soil Survey Staff. 1994. Claves para la taxonomía de suelos. Trad. C.A. Ortiz S. y Ma. del C. Gutiérrez C. Publicación especial Num. 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Texcoco, México.
- Soil Survey Staff. 1996. Keys to soil taxonomy. Seventh edition. USDA. Soil Conservation Service. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C.
- Soil Survey Staff. 1998. Keys to soil taxonomy. Eighth edition. USDA. Soil Conservation Service. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C.
- Stoops, G. 1983. Mineralogy and micromorphology of some Andisols of Rwanda. *In*: Beinroth, F.H., H. Neel y H. Eswaran. (eds) Proceedings of the Fourth International Soil Classification Workshop. Rwanda 2 to 12 June 1981. Part 1: Papers. ABOS-AGCD, Agricultural editions 4: 150-165.
- Valdéz Marin, L.A. 1970. Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la Cuenca de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Especialista en Suelos. Escuela Nacional de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Van Wambeke, A. 1987. Soil moisture and temperature regimes of Central America Caribbean Mexico. SMSS Technical Monograph Num.16.
- Veneman, P.L.M., M.J. Vepraskas y J. Bouma. 1976. The physical significance of soil mottling in a Einsconson toposequence. *Geoderma* 15: 103-118.
- Wada, K. 1985. The distinctive properties of Andosols. *Adv. Soil. Sci.* 2: 173-229.
- Wada, K. 1989. Allophane and imogolite. pp. 1051-1087. *In*: J.B. Dixon and S.B. Weed (eds). Minerals in soil environment. 2nd ed. SSSA Book Ser. 1. Madison WI, USA.
- Yamada, I., S. Shoji, S. Kobayashi y J. Masui. 1975. Chemical and mineralogy studies of volcanic ashes. Relationship between rock types and mineralogic properties of volcanic ashes. *Soil Sci. Plant Nutr.* 21: 319-326.

CRECIMIENTO DE *Sesbania emerus* (Aubl) Urban INOCULADA CON *Glomus* sp. EN PRESENCIA DE VERMICOMPOSTA

Sesbania emerus (Aubl) Urban Inoculated with *Glomus* sp. in the Presence of Vermicompost

Abdul Khalil Gardezi¹, R. Ferrera- Cerrato², J.L. Aguilar Acuña² y M. Larqué Saavedra³

RESUMEN

Con el objetivo de conocer la respuesta del crecimiento de *Sesbania emerus* (Aubl) Urban a la inoculación con el hongo endomicorrízico *Glomus* sp. Zac-19 y a diferentes dosis de materia orgánica (MO), se llevó a cabo un experimento factorial 7x2 en un diseño completamente al azar con cinco repeticiones en invernadero. Las variables de evaluación fueron: altura de la planta, diámetro del tallo, volumen radical, área foliar, peso seco de la parte aérea y porcentaje de colonización radical. Los resultados indican que todas las variables tuvieron efecto significativo de la acción de la micorriza y/o a la adición de materia orgánica, excepto que las variables diámetro del tallo, volumen radical y porcentaje de colonización total no mostraron significancia a la interacción micorriza x MO. El efecto del factor micorriza, para la mayoría de las variables fue positivo, observándose que el mejor tratamiento para producción de biomasa, fue 8 Mg ha⁻¹ equivalente a 6.08 g de MO en 2 kg de suelo + *Glomus* sp. Zac-19. En general, se puede mencionar que el hongo micorrízico *Glomus* sp. Zac-19 fue el endófito más eficiente y sugirió la existencia de cierta proliferación relacionada con plantas y hongos, la cual motivó un incremento en el crecimiento de la planta y generó mejores condiciones nutrimentales para la planta. El mejor tratamiento fue con *Glomus* sp. Zac-19 con o sin vermicomposta para las variables altura de planta, área foliar y peso seco de la parte aérea. Hubo respuestas positivas en relación con *Glomus* sp. Zac-19 en comparación con el control,

registrando valores superiores con diferentes niveles de MO. Se concluye que la inoculación con *Glomus* sp. Zac-19 + MO estimuló un mayor desarrollo vegetativo en el crecimiento de *Sesbania emerus*.

Palabras clave: Abonos verdes, hongo micorrízico arbuscular, materia orgánica.

SUMMARY

In order to determine the response in the growth of *Sesbania emerus* (Aubl) Urban to the inoculation with the endomycorrhizal fungus *Glomus* sp. Zac-19 along with different doses of organic matter, a greenhouse experiment was conducted. A factorial 7x2 completely randomized design with five replications was used. The evaluated variables were plant height, stem diameter, root volume, leaf area, aerial dry weight, and percentage of total mycorrhizal colonization. The results indicate that all the variables showed a significant effect from the action of the mycorrhiza and/or the addition of organic matter, except that the variables stem diameter, root volume, and percentage of total mycorrhizal colonization did not show statistical significance to the interaction mycorrhiza x organic matter. The effect of mycorrhiza was positive, the best treatment for the dry weight of the aerial part was with 8 Mg ha⁻¹ equivalent a 6.08 g of organic matter in 2 kg of soil + *Glomus* sp. Zac-19. In general, it can be stated that the mycorrhizal fungus *Glomus* sp. Zac-19 was the most efficient endophyte and suggested the existence of certain preferential relationships between plant and fungus which promoted increases in plant growth and provides better physiological nutritional conditions for the *Sesbania* plant. The variables plant height, leaf area and dry weight of the aerial part were positively related to inoculation of *Glomus* sp. Zac-19, compared to the control, registering superior values to those observed with the different levels of organic matter. We can conclude that endomycorrhizal fungus activity considerably improves the growth of *Sesbania emerus*.

¹ Instituto de Fitosanidad, Programa de Fitopatología. Colegio de Postgraduados. Campus San Luis Potosí, Iturbide 73, 78600 Salinas, San Luis Potosí, México. Kabdul@colpos.colpos.mx. Tel y Fax: (496)30240.

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

³ Universidad Autónoma Metropolitana. Azc. U.A.M./ Azc.: mls@hp9000a1.uam.mx.

Recibido: Julio de 1998.

Aceptado: Junio de 1999.

Index words: *Green manure, endomycorrhizal fungus, organic matter.*

INTRODUCCION

Pocas plantas son capaces de formar nódulos fijadores de nitrógeno atmosférico en la raíz y en el tallo (Rinaudo *et al.*, 1988). *Sesbania* es una de ellas; los nódulos son inducidos por una bacteria específica de *Azorhizobium* sp. Los nódulos del tallo de *Sesbania rostrata* fijan hasta cerca de 200 kg ha⁻¹ de N₂ en siete semanas (Ndoye y Dreyfus, 1988). Evans y Rotar (1987) publicaron que *Sesbania emerus*, a los 98 días de edad produjo 13 Mg de materia seca por ha, con un contenido total de N de 181 kg ha⁻¹.

Esta alta fijación de N₂ convierte a *Sesbania* en un género que, como abono verde, podría reducir la dependencia en la aplicación de fertilizante nitrogenado en los cultivos (Becker *et al.*, 1991). El efecto que produce sobre el rendimiento de grano de cultivos como el arroz, llega a substituir parcial o totalmente las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados desde 42 a 130 kg de N ha⁻¹ (Becker *et al.*, 1991; Meelu *et al.*, 1992; Weerakoon *et al.*, 1992).

La combinación de *Sesbania* con el hongo micorrízico potencia el mejoramiento en la disponibilidad y translocamiento de nutrimentos (Gardezi y Ferrera-Cerrato, 1992) del suelo al cortex de la raíz, desde 1.9 cm (Hattingh *et al.*, 1973) hasta al menos 7 cm (Rhodes y Gerdemann, 1975). El manejo de hongos micorrízicos en el crecimiento y nutrición de plantas es uno de los retos más interesantes en suelos deficitarios en nutrimentos, principalmente nitrógeno, fósforo y potasio.

El objetivo del presente trabajo fue conocer el efecto de la inoculación con el hongo micorrízico arbuscular (MA) *Glomus* sp. Zac-19 y la adición de materia orgánica sobre el crecimiento de *Sesbania emerus*.

MATERIALES Y METODOS

Las semillas de *Sesbania emerus* fueron desinfectadas con hipoclorito de sodio (0.06 %) y pregerminadas en charolas con tezontle estéril. Cuando las plantas alcanzaron una altura de 8 cm se trasplantaron a bolsas de polietileno negro con 2 kg de suelo fumigado con bromuro de metilo. El suelo presenta textura arcillosa, pH de 6.8, 0.8 % de

nitrógeno, 0.9 % de materia orgánica, y no tiene problemas de sales solubles.

Los tratamientos de inoculación con micorriza se realizaron al trasplante, empleando 6 g de raíz de alfalfa colonizada con 91.8 % de *Glomus* sp. Zac-19. En adición a los tratamientos con micorriza se evaluaron siete niveles de vermicomposta como fuente de materia orgánica (MO). La vermicomposta fue preparada con 60 kg de estiércol de bovino, 25 kg de desperdicio de melón y 15 kg de paja de trigo, sometida durante cuatro meses a la acción de las lombrices de tierra. Las dosis de MO fueron 0, 1.52, 3.04, 4.56, 6.08, 7.60, 11.4 g/2 kg de suelo equivalentes a 0, 2, 4, 6, 8, 10 y 15 Mg ha⁻¹.

El Cuadro 1 presenta los tratamientos del experimento, el experimento duró 140 días desde el trasplante a la cosecha, en los meses de marzo a julio de 1995, en un invernadero de la Universidad Autónoma Chapingo. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cinco repeticiones. Las variables de evaluación fueron las siguientes: altura de planta (AP), diámetro del tallo, (DT), volumen radical (VR), área foliar (AF), peso seco de la parte aérea (PSPA) y porcentaje de colonización total (PCT).

RESULTADOS Y DISCUSION

Los factores bajo estudio resultaron significativos para cada una de las variables estudiadas (Cuadro 2). En el desglose de los tratamientos se observó que el factor que tuvo mayor efecto en el crecimiento de *Sesbania* fue la inoculación con el hongo micorrízico

Cuadro 1. Tratamientos experimentales.

Tratamiento	Vermicomposta		Inoculación con <i>Glomus</i> sp.
	Mg ha ⁻¹	g/2 kg de suelo	
1	0	0	0
2	2	1.52	0
3	4	3.04	0
4	6	4.56	0
5	8	6.08	0
6	10	7.60	0
7	15	11.4	0
8	0	0	<i>Glomus</i> sp. Zac-19
9	2	1.52	<i>Glomus</i> sp. Zac-19
10	4	3.04	<i>Glomus</i> sp. Zac-19
11	6	4.56	<i>Glomus</i> sp. Zac-19
12	8	6.08	<i>Glomus</i> sp. Zac-19
13	10	7.60	<i>Glomus</i> sp. Zac-19
14	15	11.4	<i>Glomus</i> sp. Zac-19

Cuadro 2. Análisis de varianza del experimento factorial en plantas de *Sesbania emerus* a los 140 días después del transplante.

FV	GL	Cuadrado medio				
		Altura planta	Diámetro tallo	Volumen radical	Area foliar	Peso seco parte aérea
Tratamiento	13	93.80**	0.04**	27.38**	13652.8**	1.52**
Materia orgánica	(6)	66.09**	0.04**	24.19**	9009.7**	0.95**
<i>Glomus</i>	(1)	457.73**	0.29**	192.23**	97913.2**	10.12**
Materia orgánica x <i>Glomus</i>	(6)	60.86**	0.0009	3.10	4252.4*	0.65*
Error	56	16.47	0.005	3.08	1933.3	0.23
CV (%)		13.6	12.0	19.0	19.4	19.4

* Significancia al 5 %. ** Altamente significativo al 1 %.

arbuscular (MA) *Glomus* sp. Zac-19, con valores del cuadrado medio mucho más altos con respecto al efecto de la materia orgánica o de la interacción MO x *Glomus*. Le siguió en importancia el efecto de la MO con un cuadrado medio mayor a la mostrada por la interacción. Con respecto a la interacción entre los factores MO x *Glomus*, sólo en las variables diámetro de tallo y volumen radical no se observó significancia, es decir, que la interacción fue de tipo aditivo y que la respuesta a los factores ocurre en forma paralela e independiente entre ellos. Los coeficientes de variación fluctuaron entre 12.0 y 19.4 %, considerándose aceptables.

Altura de Planta

En la comparación de medias, el factor MO presentó diferencias estadísticas, entre dosis, donde la adición de 6 Mg ha⁻¹ de MO presentó la media más alta, 33 cm, versus la más baja con 25.2 cm del tratamiento sin MO, la tendencia de los datos corresponde a un modelo cuadrático negativo, (no presentado), es decir, que la curva presenta un máximo y después tiende a decrecer. Sin embargo, en el tratamiento con 10 Mg ha⁻¹ de MO se obtuvo una altura muy baja de 28.2 cm, actuando como un punto de influencia que se sale de la tendencia general de los datos, lo cual sugiere algún tipo de problema que tuvo este tratamiento, quizá contaminación, que le impidió mostrar la respuesta normal o real; esta misma tendencia se mostró en los demás variables.

La tendencia mostrada en este trabajo discrepa de la presentada por Gardezi *et al.* (1995), con *Erythrina americana*, la cual mostró una tendencia lineal y positiva y con alturas mínima y máxima de 14.5 y 21.5 cm, respectivamente. Los resultados del presente

estudio se compararon con *Erythrina americana* como planta indicadora, dado que fue la única referencia encontrada con micorriza y los resultados pueden ser válidos como referencia únicamente.

El efecto de la adición de MO era de esperarse, ya que se suministraron elementos esenciales para el desarrollo de las plantas (Tisdale y Nelson, 1982). En el caso de *Sesbania emerus*, la máxima respuesta fue con 6 Mg ha⁻¹ de MO. Con respecto al factor de variación *Glomus* sp. Zac-19, cuando no se inoculó con *Glomus* sp. Zac-19, la altura promedio de *Sesbania emerus* fue de 27.3 cm, mientras que la altura promedio con micorriza fue de 32.4 cm, estadísticamente diferente. Este mismo efecto también lo obtuvieron Gardezi *et al.* (1995), al utilizar *Erythrina americana* como planta indicadora. Aunque las alturas de la planta fueron menores que las obtenidas con *Sesbania*.

Al combinar los factores MO y *Glomus* sp. Zac-19, se obtuvo una altura de 35.2 cm, al agregar 8 Mg ha⁻¹ de MO y con micorriza; la más baja fue de 18.4 cm con el testigo (Figura 1).

Con la inoculación de *Glomus* sp. Zac-19 y sin MO, la altura de *Sesbania* se incrementó 91 %, resultando en el tratamiento más económico y de mayor impacto. Si se compara el tratamiento con 8 Mg ha⁻¹ de MO, con y sin micorriza, el incremento fue de tan solo 30 %.

Jiménez (1993) reporta que *Sesbania emerus* registró a los 28 días de edad una altura promedio de 8.8 cm, seguido de un crecimiento exponencial hasta alcanzar al término de esta primera etapa, una altura de 112.1 cm. Esta mayor tasa de crecimiento de *Sesbania emerus* le confiere, desde el punto agronómico, una mayor ventaja para competir con la maleza y predominar sobre ésta, lo cual no ocurrió con

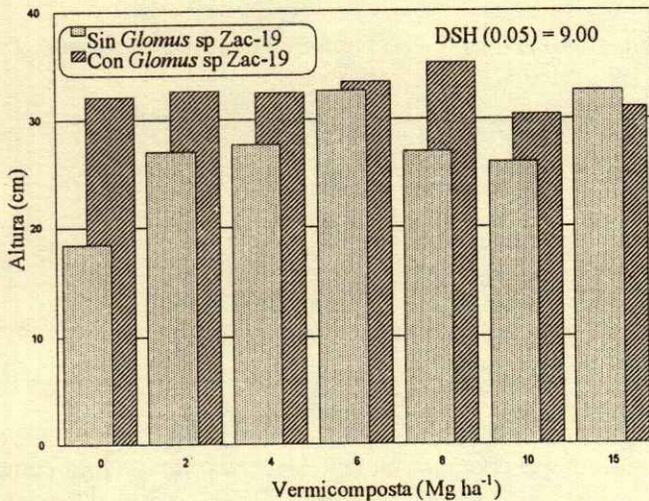


Figura 1. Efecto de la interacción materia orgánica * micorriza en la altura de *Sesbania emerus*.

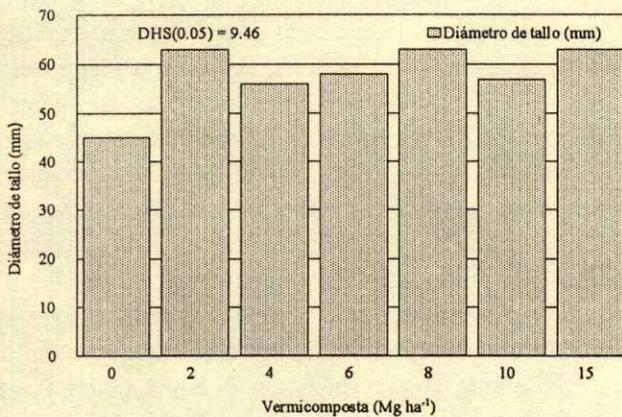


Figura 2. Efecto de la materia orgánica en el diámetro de tallo de *Sesbania emerus*.

Aeschynomene americana, a la que debido a su menor tasa de crecimiento inicial fue necesario eliminar manualmente las malezas, dentro de las cuales predominaron *Echinochloa* sp. y *Eriochloa acuminata*. Tendencias similares fueron reportadas por Becker *et al.* (1990), quienes mencionan que *Sesbania rostrata* resultó ser de mayor porte que *Aeschynomene afraspera*, cuyos patrones de crecimiento fueron afectados grandemente por la época en que estas leguminosas fueron sembradas.

Aunque se considera que el patrón de crecimiento es una característica propia de la especie, el factor manejo y entre ellos la densidad de población, ejercen

una influencia importante en la expresión del comportamiento de las plantas; así pues, la mayor densidad de población (Jiménez, 1993) que se registró para *Aeschynomene americana* (2 445 625 plantas ha⁻¹), ocasionado por el mayor número de semillas depositadas al momento de la siembra, incrementó considerablemente las condiciones de competencia entre plantas con efectos adversos sobre la tasa de crecimiento de esta especie. Para *Sesbania emerus*, estas condiciones de competencia fueron menores, dado que contabilizó una menor densidad de población (462 787 plantas ha⁻¹), lo cual le permitió expresar mejor su tasa de crecimiento.

Diámetro del Tallo

Esta variable mostró significancia en el ANVA para los factores principales MO y *Glomus sp.* Zac-19 y no para la interacción. En el caso del factor MO, todos los tratamientos que lo llevaron fueron estadísticamente iguales entre sí pero diferentes con respecto al testigo sin MO.

En la Figura 2 se muestra que el mayor diámetro fue de 63 mm y se tuvo con los tratamientos que llevaron 2, 8 y 15 Mg ha⁻¹ de MO, *versus* el testigo con 45 mm de diámetro, el incremento fue de 40 %, la tendencia de los datos se muestra en la Figura 2, que es de tipo cuadrático o raíz cuadrada. En cambio, la respuesta que obtuvieron Gardezi *et al.* (1995) con *Erythrina* fue lineal y positiva.

La respuesta promedio de la inoculación con el hongo MA en el diámetro de tallo de *S. emerus* fue de 64 mm comparada con 51 mm sin inoculación, que representa un incremento de 25 %, contra 35 % que obtuvieron Gardezi *et al.* (1995) con *Erythrina americana*.

Volumen Radical

En la Figura 3 se observa claramente la tendencia y el efecto de la MO sobre el volumen radical. La adición de 2 Mg ha⁻¹ de MO tuvo 36 % más de volumen radical que el testigo, en cambio con 6 y 15 Mg ha⁻¹ de MO el incremento fue de 61 y 72 %, respectivamente. Gardezi *et al.* (1995) indicaron un incremento de 96 % con *Erythrina americana* al aplicar 100 g de MO kg⁻¹ de suelo. La MO estimuló al sistema radical de *Sesbania* a tener un mayor volumen

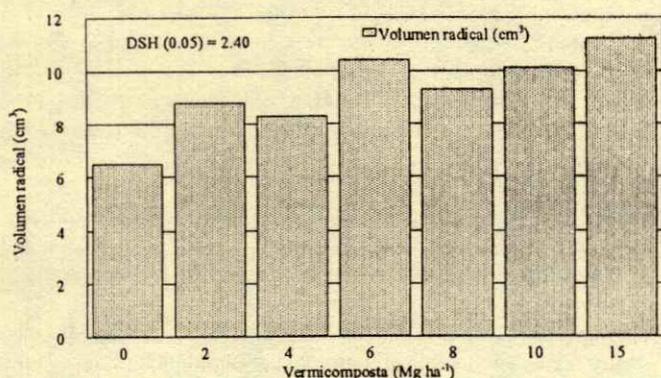


Figura 3. Efecto de la materia orgánica en el volumen radical de *Sesbania emerus*.

radical desde el inicio y con ello explorar un mayor volumen de suelo, contribuyendo con un mayor diámetro de tallo, área foliar y peso seco de biomasa.

La sola inoculación del hongo micorrízico arbuscular tuvo un incremento promedio de 43% en el volumen radical, sobre 35 observaciones sin micorriza y 173 % *versus* el testigo absoluto, lo que representa un enorme potencial de usar la micorriza para obtener un mayor volumen radical y con ello favorecer la disponibilidad y translocación nutricional en *Sesbania*.

Area Foliar

La acción conjunta de la micorriza y 8 Mg ha⁻¹ de MO incrementó el área foliar 193 % con respecto al testigo sin MO y sin micorriza, en cambio con la

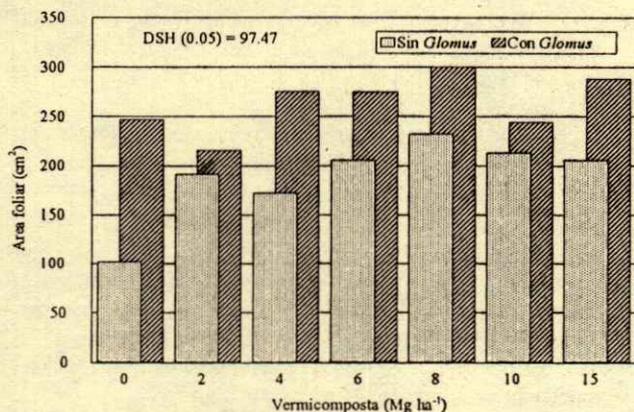


Figura 4. Efecto de la interacción materia orgánica * micorriza en el área foliar de *Sesbania emerus*.

adición de sólo 8 Mg ha⁻¹ de MO el incremento fue de 126 % contra 141 % con la pura inoculación, en la Figura 4 se aprecia la interacción MO x *Glomus*, en donde aparecen dos puntos de influencia que se salen de la tendencia general (2 y 10 Mg ha⁻¹ de MO con *Glomus* sp. Zac-19).

La inoculación con micorriza y/o la aplicación de MO en forma independientes o combinadas estimularon fuertemente el área foliar de *Sesbania*.

Peso Seco de Biomasa

En la Figura 5 se aprecia que la adición de MO y sin micorriza influye en el peso seco de biomasa hasta alcanzar el máximo peso con 15 Mg ha⁻¹ MO y que representa 157 % en el incremento del peso con respecto al testigo. La inoculación con la micorriza *Glomus* sp. Zac-19 tiene un efecto de 167 % en el incremento del peso seco respecto al testigo.

Prácticamente el incremento se mantiene paralelo y sin pendiente al combinarlo con MO, a excepción de cuando la adición es de 8 Mg ha⁻¹ de MO, que equivale a 215 % del testigo, corresponde al tratamiento que arrojó mayor producción de biomasa.

Jiménez (1993) reporta que la acumulación de materia seca en las hojas de *Sesbania emerus* fue ligeramente superior a lo acumulado en los tallos, durante los primeros 50 días de edad de las plantas. Patrones de acumulación que se invirtieron a partir de esta edad. Se observó también que es en las raíces en donde se acumula la menor cantidad de materia seca; sin embargo, su contribución es significativa y no debe

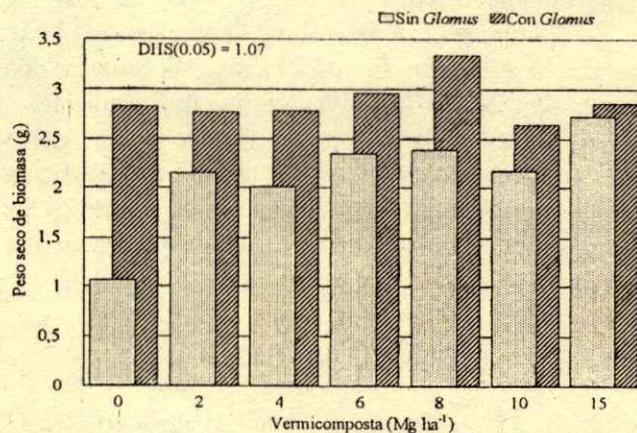


Figura 5. Efecto de la interacción materia orgánica * micorriza en el peso seco de biomasa de *Sesbania emerus*.

de obviarse. Palm *et al.* (1988) reportan patrones similares de acumulación de materia seca en los diferentes órganos de *Sesbania sesban*. Aunque esta especie resultó ser de lento crecimiento, dadas las condiciones de humedad en que las plantas se desarrollaron, observando que *Sesbania emerus* a los 64 días de edad, produjo en promedio un total de 5.6 t ha⁻¹ de materia seca, rendimiento inferior al reportado por Evans y Rotar (1987) para esta misma especie de leguminosa, quienes registraron una producción de materia seca de 13 t ha⁻¹, aunque en plantas cosechadas a los 98 días de edad. Sin embargo, resultaron ser bastante similares a los reportados por Palm *et al.* (1988), Beri *et al.* (1989a,b), Diekmann y De Datta (1990), Manguiat *et al.* (1992) y por Meelu *et al.* (1992), en diversas especies del género *Sesbania*.

Porcentaje de Colonización Micorrízica

La colonización por micorriza varió de 34.8 % con la adición de *Glomus* sp. Zac-19 y 10 Mg ha⁻¹ de MO hasta 64.2 % con la adición de *Glomus* sp. Zac-19 + 8 Mg ha⁻¹ de MO.

CONCLUSIONES

La inoculación con *Glomus* sp. Zac-19 + 8 Mg ha⁻¹ de MO estimularon el crecimiento de *Sesbania*, específicamente en las variables, altura de planta, área foliar, peso seco de biomasa y el porcentaje de colonización radical.

Para la variable diámetro de tallo, el mejor tratamiento fue con 2 Mg ha⁻¹ de MO, o con inoculación micorrízica.

En el volumen radical influyó la adición de 15 Mg ha⁻¹ de MO o bien la inoculación micorrízica con *Glomus* sp. Zac-19, también en forma independiente.

La inoculación con el hongo micorrízico arbuscular incrementó la eficiencia de *Sesbania emerus* en la absorción nutrimental, reflejándose en las variables de crecimiento y desarrollo evaluadas en este estudio.

LITERATURA CITADA

- Becker, M., J.K. Ladha y J.C.G. Ottow. 1990. Growth and N₂ fixation of two stem-nodulating legumes and their effect as green manure on lowland rice. *Soil Biol. Biochem.* 22: 1109-1119.
- Becker, M., K.H. Diekmann, J.K. Ladha, S.K. De Datta y J.C.G. Ottow. 1991. Effects of NPK on growth and nitrogen fixation of *Sesbania rostrata* as a green manure for lowland rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Soil* 132: 149-158.
- Beri, V., O.P. Meelu y C.S. Khind. 1989a. Biomass production, N accumulation, symbiotic effectiveness and mineralization of green manures in relation to yield of wetland rice. *Tropical Agric.* 66: 11-16.
- Beri, V., O.P. Meelu y C.S. Khind. 1989b. Studies of *Sesbania aculeata* pers. as green manure for N-accumulation and substitution of fertilizer-N in wetland rice. *Tropical Agric.* 66: 209-212.
- Diekmann, K.H. y S.K. De Datta. 1990. Effect of seeding rate on dry matter production and nitrogen accumulation of *Sesbania rostrata*. *Int. Rice Res. Newsletter* 15: 22-23.
- Evans, D.O. y P.P. Rotar. 1987. Productivity of *Sesbania* species. *Tropical Agric.* 64: 193-200.
- Gardezi, A.K. y R. Ferrera-Cerrato. 1992. Mycorrhizal inoculation of *Caesalpinia cacalaco*. *Nitrogen Fixing Tree Res. Reports* 10: 116-118.
- Gardezi, A.K., R. García E., R. Ferrera C. y C.A. Pérez M. 1995. Endomycorrhiza, rock phosphate, and organic matter effects on growth of *Erythrina americana*. *Nitrogen Fixing Tree Res. Reports* 13: 48-50.
- Hattingh, M.J., L.E. Gray y J.W. Gerdemann. 1973. Uptake and translocation of ³²P labelled phosphate to onion roots by endomycorrhizal fungi. *Soil Sci.* 116: 383-387.
- Jiménez Ch., J.A. 1993. *Aeschynomene americana* L. *Sesbania emerus* (Aubl) Urban. y la urea en supergránulos como fuentes de nitrógeno en el cultivo de arroz. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Manguiat, I.J., D.F. Guinto, A.S. Pérez y R.M. Pintor. 1992. Response of rainfed lowland rice to green manuring with *Sesbania rostrata*. *Tropical Agric.* 69: 73-77.
- Meelu, O.P., R.A. Morris y H.S. Centeno. 1992. Tropical lowland rice response to preceding crops, organic manures, and nitrogen fertilizer. *Tropical Agric.* 69: 96-100.
- Ndoye, I. y B. Dreyfus. 1988. N₂ fixation by *Sesbania rostrata* and *Sesbania sesban* estimated using ¹⁵N and total N difference methods. *Soil Biol. Biochem.* 20: 209-213.
- Palm, O., W.L. Weerakoon, M.A.P. De Silva y T. Rosswall. 1988. Nitrogen mineralization of *Sesbania sesban* used as green manure for lowland rice in Sri Lanka. *Plant Soil* 108: 201-209.
- Rhodes, L.H. y J.W. Gerdemann. 1975. Phosphate uptake zones of mycorrhizal and non-mycorrhizal onions. *New Phytol.* 75: 555-561.
- Rinaudo, G., D. Alazard y A. Moudiongui. 1988. Stem nodulating legumes as green manures for rice in West Africa. pp. 97-109. *In: Sustainable agriculture, green manure in rice farming.* International Rice Research Institute. Manila, Philippines.
- Tisdale, S.L. y W.L. Nelson. 1982. Fertilidad de suelos y fertilizantes. Ed. UTEHA. México.
- Weerakoon, W.L., G. Seneviratne, M.A.P. De Silva y A.M. Seneviratne. 1992. Evaluation of *Sesbania speciosa* as a green manure for lowland rice in the dry zone, Sri Lanka. *Plant Soil* 145: 131-139.

PERDIDAS DE AGUA DE RIEGO POR PERCOLACION PROFUNDA DURANTE EL PROCESO DE INFILTRACION

Irrigation Water Losses by Deep Percolation During Infiltration Process

José Nicolás Ortiz¹, Iouri Nikolskii Gavrilov², Oscar Palacios Vélez² y Rafael Acosta Hernández²

RESUMEN

Entre los sectores que utilizan el recurso agua, el agrícola es el que consume mayor cantidad y el que con menos eficiencia la utiliza. De todas las pérdidas de agua que ocurren desde las fuentes de abastecimiento hasta las parcelas, la filtración en los canales y la percolación profunda en las parcelas son más importantes; estas últimas pérdidas se realizan en dos formas: sin cambio de la humedad debajo de la zona radical (q_1) y cuando se manifiesta un cambio de la humedad debajo de dicha zona (q_2). La suma de ambas formas de pérdidas constituye las pérdidas totales por percolación profunda (q_0).

En el presente trabajo se estimaron las pérdidas por percolación profunda en las parcelas durante el proceso de infiltración para diferentes condiciones iniciales y de frontera utilizando un modelo que simula el movimiento del agua en el suelo. Las estimaciones se realizaron para las siguientes condiciones: flujo constante en la superficie del suelo (riego por aspersión) y cuando se tiene un tirante de agua (riego por gravedad). En los cálculos se consideraron también el cambio de los variables principales de los cuales depende el proceso de infiltración: contenido de humedad inicial del suelo, profundidad del sistema radical y del manto freático, texturas del suelo (arenoso, limoso y arcilloso) en caso de ambos métodos de riego y, además, diferentes intensidades de aplicación en caso de riego por aspersión.

Los resultados permitieron concluir que cuando se tiene la condición de tirante de agua sobre la superficie estas pérdidas en general son insignificantes para las tres texturas, ocurren principalmente en forma

de q_1 y son mayores en los suelos arcillosos. En la condición de aspersión ocurren ambos tipos de pérdidas (q_1 y q_2), q_1 crece fuertemente cuando aumenta la humedad inicial y la intensidad de aplicación disminuye, en general q_0 puede alcanzar valores que superan 30 % de la lámina de riego.

Palabras clave: Estimación de percolación profunda de agua, modelo de simulación de infiltración, humedad de suelo, intensidad de aplicación de riego por aspersión, tirante de agua.

SUMMARY

Among the different users of water, the agricultural sector consumes the largest quantity of water with the lowest efficiency. The more important water losses occur in parts of channels from the supply points to the irrigated plots because of filtration and because of deep percolation in the irrigated plots. The last kind occurs in two ways: without changes of soil moisture content in the part of soil profile under the root zone (q_1) and with increase of soil moisture in that part (q_2). The sum of both kinds of water losses creates a total water loss due to deep percolation (q_0).

In the present paper the water losses in the plots due to deep percolation were estimated for different initial and boundary conditions using a simulation model of water movement in unsaturated soil. The estimations were realized for different conditions at the soil surface (permanent water flux during sprinkling irrigation and percolation from a water layer during surface irrigation) and for different: initial soil moisture contents, depths of root zone and water table, intensities of sprinkling applications and soil textures (sand, silt, and clay).

The results allowed to conclude that during flooding of soil surface, the water losses are insignificant for three soil textures and occur mainly in the form of q_1 and they are larger in clay soils. Under sprinkler irrigation both kinds of water losses (q_1 and q_2) occur, q_1 increases heavily when initial moisture is greater and the intensity of application is smaller. In general

¹ Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental Lisandro Alvaro, Carretera 5 entre 3 y 4, No. 3-65, Basquimeto-Lara, Venezuela. e-mail: jortiz@delfos.ucla.edu.ve

² Especialidad de Hidrociencias, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Carretera México- Texcoco, Km. 36.5, Edo. de México, México. e-mail: nikolski@colpos.colpos.mx y opalacio@colpos.colpos.mx

Recibido: Noviembre de 1998.

Aceptado: Junio de 1999.

q_0 can achieve values greater than 30 % of the irrigation requirement.

Index words: Water losses, model, soil moisture, intensity of sprinkler irrigation.

INTRODUCCION

Alrededor de 80 % de todos los recursos del agua en México y a nivel mundial que son consumidos por la humanidad, se utilizan para riego (Manual de Riego, 1990; Aguila, 1997). La actividad agrícola es la que requiere más agua y, sin embargo, es la que más ineficientemente la utiliza. En un estudio realizado por el Banco Mundial en 1988 (Aguila, 1997) se estimó que la eficiencia promedio alrededor del mundo en el uso del agua en la agricultura es de 30 %. En México se estima que la eficiencia de conducción es del orden de 60 % (Palacios, 1990) y la de aplicación a nivel de parcela es de 60 % (Perea, citado por Aguila, 1997), resulta una eficiencia global de 36 %.

El presente trabajo tiene como propósito estimar las pérdidas por percolación profunda durante los riegos por gravedad y aspersion con un modelo de simulación basado en la ecuación diferencial del movimiento de agua en el suelo no saturado de Richards.

De acuerdo con la Ley de Darcy para una filtración no saturada, la velocidad del movimiento vertical del agua V es directamente proporcional a la conductividad hidráulica en condiciones no saturadas K_θ y al gradiente del potencial capilar $d\psi/dz$:

$$V = K_\theta - K_\theta \frac{d\psi}{dz}, \quad (1)$$

Donde: z es la profundidad desde la superficie del suelo, K_θ y ψ son funciones sólo de la humedad θ .

K es diferente de cero, si la humedad θ es mayor a una humedad mínima θ_0 . Si $\theta \leq \theta_0$, entonces $K_\theta = 0$.

El término $-K_\theta \frac{d\psi}{dz}$ de la Ecuación 1 corresponde al movimiento del agua por gradiente de potencial capilar ψ o de la humedad del suelo θ , este término corresponde al movimiento acompañado con el cambio de la humedad del suelo. El término K_θ corresponde al movimiento gravitacional, el cual no se acompaña con el cambio de la humedad del suelo.

Al tomar en consideración que la percolación profunda total q_0 en el transcurso de la infiltración del agua en el suelo durante un tiempo t es igual a:

$$q_0 = \int_0^t V dt = \int_0^t K_\theta dt - \int_0^t K_\theta \frac{d\psi}{dz} dt, \quad (2)$$

se puede concluir que esta percolación consta de dos partes:

$$q_1 = \int_0^t K_\theta dt \quad y \quad (3)$$

$$q_2 = \int_0^t K_\theta \frac{d\psi}{dz} dt. \quad (4)$$

Es decir, que la percolación profunda del agua durante cada aplicación del riego q_0 se puede considerar compuesta de dos partes: q_1 , percolación sin aumento de la humedad del suelo debajo de la zona radical, es decir, movimiento del agua en esta parte del perfil del suelo con una humedad inicial θ_1 y q_2 , parte del agua infiltrada hacia abajo, que participa en el aumento de humedad almacenada en las capas inferiores:

$$q_0 = q_1 + q_2. \quad (5)$$

Experimentalmente es relativamente fácil registrar y medir las pérdidas q_2 , las cuales se acompañan con el cambio de humedad en el perfil del suelo, pero las pérdidas q_1 son difíciles para registrarse, porque aunque existen, la humedad del suelo no cambia.

Nikolski (1970) estudió el carácter de formación de los perfiles de humedad del suelo hasta 20 m de profundidad durante y después de los riegos por gravedad, y encontró que en algunos estratos la humedad inicial no cambia en el tiempo, mientras que en otras partes del perfil se observa el cambio de la humedad, lo que comprueba la existencia de la percolación profunda en forma de q_1 .

El volumen de las pérdidas del agua de riego en el subsuelo en forma de q_2 , se determina básicamente por las formas del perfil de humedad $\theta(z)$. De acuerdo con la teoría de infiltración, la forma del perfil de humedad depende de la humedad inicial θ_1 , de la intensidad de lluvia i durante el riego por aspersion, de la altura (tirante) de la lámina de agua sobre la superficie del suelo cuando se aplican los riegos por gravedad, de la profundidad del manto freático y de las propiedades hidro-físicas del suelo.

Para investigar el cambio de las pérdidas por percolación profunda y ante todo en forma de q_1 en función de las variables mencionadas es posible:

- Establecer una serie de experimentos de campo o de laboratorio (en columnas de suelo) donde deben registrarse cuidadosamente diferentes componentes del balance de agua en el suelo.
- Realizar una serie de experimentos numéricos basados en el uso de un modelo matemático de simulación el cual describa satisfactoriamente los procesos de percolación profunda durante el riego.

Las investigaciones del último tipo tienen diferentes ventajas como son: que ellas no requieren muchos recursos económicos, equipos sofisticados y tiempo largo para su realización.

La ecuación de Richards ha sido aplicada por muchos investigadores para simular el flujo del agua en suelos insaturados y parcialmente saturados, ya que la misma permite calcular la distribución sub-superficial del agua y consecuentemente estima la cantidad de agua almacenada en la zona radical considerando las condiciones iniciales y de frontera (Tabuada *et al.*, 1995). Dicha ecuación es la siguiente:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

Donde z es la profundidad, t es el tiempo, $C(\psi)$ es la capacidad específica y $K(\psi)$ es la conductividad hidráulica expresada como una función del potencial ψ .

La Ecuación 3 tiene la ventaja de describir el comportamiento hidrodinámico de las zonas saturadas y no saturadas, así como estudiar el flujo vertical del agua en suelos estratificados, además es más adecuada para las soluciones numéricas (Rendón, 1994). Para resolver esta ecuación se requiere conocer previamente las relaciones entre el contenido de humedad y la presión efectiva del agua $\psi(\theta)$ y la conductividad hidráulica $K(\theta)$. Estas dos relaciones se les llama las características hidrodinámicas del suelo. En la bibliografía existen diferentes tipos de ecuaciones para representar las funciones $\psi(\theta)$ y $K(\theta)$.

La práctica numerosa del uso de los modelos de simulación del movimiento del agua a lo largo del perfil del suelo durante la infiltración, basados en la Ecuación 6 señala que en general los resultados son bastante satisfactorios y tienen buena coincidencia con los medidos (Staple y Gupta, 1966).

MATERIALES Y METODOS

Los cálculos numéricos en la presente investigación se realizaron en computadora, empleando para

éstos el programa desarrollado por el Ingeniero Barrios Díaz (comunicación personal, 1998). Dicho programa simula el movimiento vertical del agua en el suelo durante el proceso de infiltración y está basado en la ecuación de Richards (Ecuación 6), donde la función de $\theta(\psi)$ se utiliza en la forma de Van Genuchten (1980):

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{\psi_d} \right)^n \right]^m} \quad (7)$$

y la función de $K(\theta)$ en la forma de Averyanov (1949) y Brooks y Corey (1964):

$$K(\theta) = K_s \left[\frac{(\theta - \theta_r)}{\theta_s - \theta_r} \right]^\eta, \quad (8)$$

Donde θ es el contenido volumétrico de humedad del suelo, θ_s es la humedad volumétrica a saturación, θ_r es la humedad residual, ψ es la tensión para un contenido de humedad θ y m , n , η y ψ_d son parámetros de ajuste.

Antes de realizar la serie de experimentos numéricos, el modelo fue verificado (validado) con base en el experimento preciso de laboratorio ejecutado por Staple y Gupta (1966) en la columna del suelo arcilloso homogéneo denominado Castor Loam con una profundidad de 1 m. Sus características hidrofísicas se presentan en el Cuadro 1. En este experimento obtuvieron los siguientes datos importantes para verificar el modelo de infiltración:

- Conductividad hidráulica en función al contenido de humedad.
- Tensión en función al contenido de humedad.
- Lámina infiltrada en función del tiempo.
- Perfil del frente de humedecimiento en función del tiempo.

Una vez determinados los parámetros de ajuste de las Ecuaciones 7 y 8 se procedió a alimentar el

Cuadro 1. Características hidrodinámicas de los suelos en estudio (Parlange *et al.*, 1985; Romero, 1995; Zaidel y Russo, 1992).

Suelo	Parámetros							
	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{cc} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	K_s cm h^{-1}	$-\psi_d$ cm	m adim.	n adim.	η adim.
Arenoso	0.174	0.312	0.0265	15.37	22.90	0.550	2.2220	3.4551
Arcilloso	0.460	0.400	0.0000	0.45	16.57	0.542	2.1838	3.6893
Limoso	0.400	0.343	0.0600	2.50	50.00	0.500	2.0000	4.0407
Castor Loam	0.425	0.190	0.0100	1.20	61.00	0.350	1.8630	4.8000

Nota: $m = 1 - 1/n$; $\theta_s = \theta(\psi = 0)$; θ_{cc} = capacidad de campo; θ_r = humedad residual; K_s = conductividad hidráulica a saturación; ψ_d , m , n , η = parámetros.

programa de simulación para diferentes condiciones, con el fin de verificar la concordancia entre los datos calculados y medidos sobre la lámina infiltrada y el perfil del frente de humedecimiento en función del tiempo.

Los cálculos fueron realizados con un intervalo de tiempo (Δt) de cinco segundos y un espesor entre nodos (Δz) de 0.2 cm.

Los resultados de la comparación de la gráfica del cambio de la infiltración acumulada en función al tiempo, así como del perfil de distribución de la humedad del suelo correspondiente a un tiempo de 135 minutos después del inicio de inundación del suelo se presentan en las Figuras 1 y 2. Como se ve, los datos calculados prácticamente coinciden con los obtenidos experimentalmente. Esto significa, que el modelo de simulación de infiltración puede utilizarse para investigar las regularidades del cambio de las pérdidas de agua por percolación profunda en función de la textura del suelo, humedad inicial, profundidad de la zona radical, profundidad del manto freático e intensidad de aplicación.

Para realizar posteriormente toda la serie de los experimentos numéricos donde simularon los riegos por gravedad y por aspersión se consideraron las siguientes condiciones:

- El suelo es homogéneo a lo largo de su profundidad. Se utilizaron tres texturas de suelo, diferenciados entre sí por sus propiedades hidro-físicas.

a) Un suelo arenoso (Grenoble Sand) (Parlange *et al.*, 1985).

b) Un suelo arcilloso (Sellinge Yolo Light) (Romero, 1995).

c) Un suelo limoso (Zaidel y Russo, 1992).

Las características hidro-físicas de estos suelos se presentan en el Cuadro 1.

- La humedad inicial del suelo antes de aplicar el riego es $\theta = \theta_1$ y se distribuye uniformemente a lo largo del perfil del suelo:

$$t = 0 \quad z \geq 0 \quad \theta = \theta_1.$$

Se consideraron diferentes contenidos de humedad iniciales de suelo θ_1 : de 0.5 hasta 0.8 de capacidad de campo θ_{cc} para la condición de nivel freático profundo (más de 5 m de profundidad) y $0.6\theta_{cc}$ para la situación cuando este nivel está somero (menos de 3 m de profundidad).

- La mayoría de los experimentos numéricos fueron realizados para niveles freáticos profundos (más de 5 m). También en una serie de cálculos se investigó la percolación profunda cuando el nivel freático se encuentra cerca de la superficie del suelo (1.0, 2.0 y 3.0 m).

- En la parte profunda (no menos de 5 m) se considera que durante los riegos el frente del perfil de humedad no alcanza esta profundidad, por eso la humedad en la parte inferior es igual a la inicial:

$$t > 0 \quad z \rightarrow \infty \quad \theta = \theta_1 \quad \text{ó} \quad \psi = \psi_1(\theta_1).$$

- Profundidades de la capa radical del suelo z_r : de 0.5, 1.0 y 2.0 m.

Durante la aplicación de los riegos se consideraron también las siguientes condiciones:

Condición de tirante de agua sobre la superficie (riego por gravedad)

- En la superficie del suelo se mantiene un pequeño (casi cero) tirante de agua y como resultado la humedad del suelo θ_2 está cerca de la humedad a saturación θ_s :

$$t > 0 \quad \theta = \theta_2 \quad \text{ó} \quad \psi = 0$$

Donde $\theta_2 < \theta_s$ y $\theta_2 = \theta_s - p$, donde p es el contenido de aire atrapado.

- La aplicación de agua se suspendió en cada experimento numérico cuando se infiltró la lámina de riego prevista.

Condición de flujo constante (riego por aspersión)

- La intensidad de aplicación i es constante y el flujo de agua que atraviesa la superficie del suelo también es constante e igual a i .

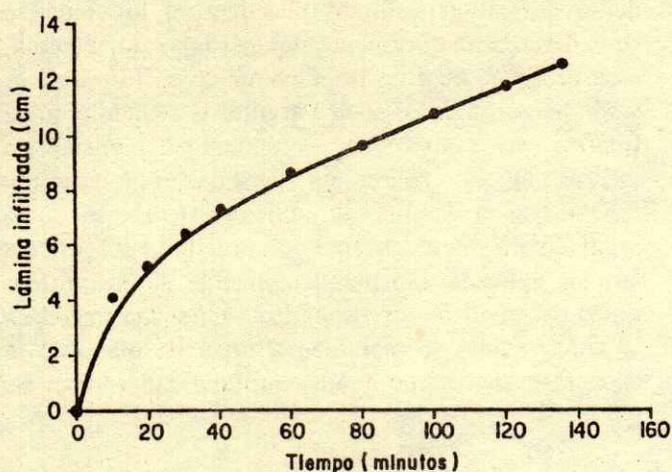


Figura 1. Comparación del cálculo de la filtración acumulada (línea continua) con los datos medidos (puntos) por Staple y Gupta (1966).

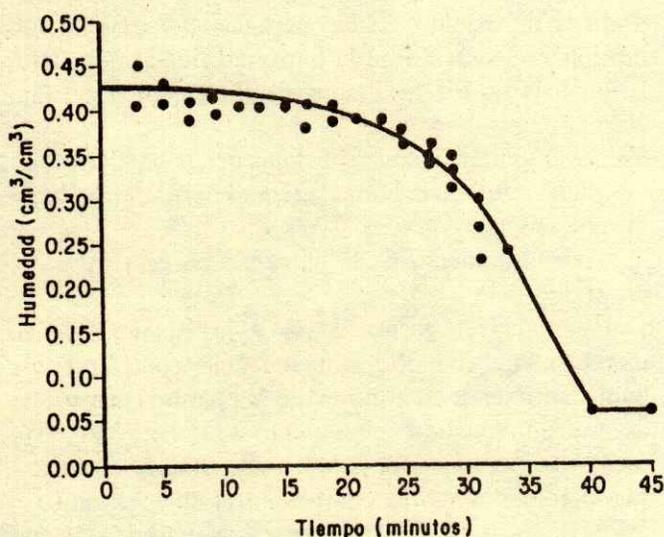


Figura 2. Comparación del cálculo del perfil de humedad del suelo (línea continua) en 135 minutos después del inicio del proceso de infiltración en el suelo limoso Castor Loam con los datos medidos (puntos) por Staple y Gupta (1966).

$$t > 0 \quad z = 0 \quad - K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) = i$$

- Intensidades de aplicación: 0.5, 1.0 y 1.5 cm h⁻¹ para los suelos arenoso y limoso y 0.2 y 0.4 cm h⁻¹ para el suelo arcilloso.

Siempre se seleccionaron los valores de intensidad de aplicación menores que la conductividad hidráulica para evitar los procesos de inundación y formación de escurrimiento superficial, lo cual no es deseable para

las prácticas del riego. Con el fin de poder hacer la comparación de las pérdidas por percolación profunda para los suelos utilizados en este estudio, se tomó como referencia la intensidad mínima (0.5 cm h⁻¹ para los suelos arenoso y limoso y 0.2 cm h⁻¹ para el arcilloso) y la máxima (1.5 cm h⁻¹ para los suelos arenoso y limoso y 0.4 cm h⁻¹ para el arcilloso).

- La aplicación de agua se suspendió en cada experimento numérico cuando se cumplió el tiempo de riego, el cual se calculó previamente dividiendo la lámina de riego entre la intensidad de aplicación.

Al final de cada aplicación simulada de los riegos por gravedad o por aspersión se calcularon los valores de q_1 y q_2 de la percolación profunda. El valor de q_1 se calculó como el flujo acumulado a través de la frontera inferior (es decir, en la profundidad de 5 m cuando el nivel freático está profundo). El valor de q_2 se calculó como el cambio de la humedad del suelo debajo de la zona radical durante los riegos simulados.

La humedad de capacidad de campo θ_{cc} para los suelos utilizados en este estudio no tiene importancia para los cálculos de los procesos de infiltración. Sin embargo, se seleccionaron estos valores para presentar los resultados de los cálculos porque permiten generalizar y analizar el cambio de diferentes características de infiltración, como por ejemplo de q_1 y q_2 , en función no de la humedad inicial θ_1 , sino de su fracción θ_1/θ_{cc} . Esto permite considerar la misma escala de la variación θ_1/θ_{cc} para diferentes texturas de suelo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Pérdidas por Percolación Profunda para la Condición de Tirante de Agua sobre la Superficie (Riego por Gravedad)

Cambio de las pérdidas en función de la humedad inicial del suelo. Los resultados de cálculos de los procesos de infiltración señalan que las pérdidas por percolación profunda durante los riegos por gravedad ocurren principalmente en forma de q_1 , es decir, en forma del flujo transitorio sin cambio de la humedad en el suelo debajo de la zona radical y alcanzan 5 % de lámina infiltrada Lr . Las pérdidas q_2 , las cuales corresponden al crecimiento de la humedad en el estrato debajo de la zona radical son nulas independientemente de la textura del suelo, humedad inicial y profundidad de la zona radical, esto es debido a que el frente de humedad no llega a la zona radical.

El análisis anterior lleva a una conclusión inesperada, por el hecho de que las pérdidas relativas (y absolutas) por percolación profunda durante la aplicación de agua son mayores en los suelos arcillosos (en lugar de los arenosos con más alta conductividad hidráulica). Esto posiblemente es explicable porque el producto de la conductividad hidráulica por el tiempo de aplicación es mayor en el suelo arcilloso que en el arenoso y, por consiguiente, mayor duración para que ocurra la percolación profunda. Este tipo de suelo se caracteriza por tener mayor capacidad de retención de humedad, por tanto mayor lámina a reponer, y por esto requiere mayor tiempo de aplicación. En tanto que los suelos arenoso y limoso, aunque tienen mayor valor de conductividad hidráulica a saturación, tienen menor capacidad de retención de humedad y la lámina se aplica en menor tiempo, por esto menor duración para que ocurra la percolación profunda. También hay que considerar que durante el ciclo de un determinado cultivo en un suelo arenoso se aplican más riegos que en suelo arcilloso y puede ser que en definitiva las pérdidas pudieran ser mayores en este tipo de suelo. Por otra parte, la simulación realizada fue puntual, es decir, no se consideró el avance del agua sobre la superficie del suelo como ocurre en el riego por gravedad. Este proceso aumenta la duración promedio de infiltración, la profundidad del frente de humedad y finalmente causa las pérdidas totales q_0 mayores que 10 % de lámina infiltrada Lr . Según el Manual de Riego (1990), estas pérdidas para riego por gravedad alcanzan 20 a 30 % de lámina infiltrada.

Cambio de las pérdidas en función de la profundidad de la zona radical. Por razón del incremento de la duración de los riegos para mayores profundidades z_r de la zona radical (es decir la zona de humedecimiento del perfil del suelo) las pérdidas q_1 crecen paulatinamente en función de z_r . Este incremento es más notable cuando la humedad inicial θ_1 está a nivel de $0.8\theta_{cc}$ (o más). Con la humedad $\theta_1 = 0.8\theta_{cc}$ y la profundidad de la zona radical $z_r = 2$ m en los suelos arcillosos las pérdidas de agua por percolación profunda (aun sin cambio de la humedad debajo de la zona radical) pueden alcanzar 10 % de la lámina infiltrada Lr , pero para las demás condiciones son menores. Como se ha señalado anteriormente en estos cálculos no se consideraron los procesos de avance del agua sobre la superficie del suelo, los cuales en práctica aumentan las pérdidas reales por percolación profunda.

Cambio de las pérdidas en función de la profundidad del manto freático. Como en los casos

del nivel freático profundo (más de 5 m), los cuales se consideraron anteriormente, las pérdidas por percolación profunda ocurren principalmente en forma de q_1 y son mayores en los suelos arcillosos cuando el nivel freático está somero. La profundidad del mismo no influye mucho sobre las pérdidas relativas (en fracción a la lámina de aplicación). En el suelo arcilloso las pérdidas son del orden de 2 % de la lámina aplicada independientemente de la profundidad del nivel freático cuando la humedad inicial en la zona radical se mantiene a nivel de 60 % de la capacidad de campo y una profundidad radical de 0.5 m.

Pérdidas por Percolación Profunda para la Condición de Flujo Constante i

Cambio de las pérdidas en función de la humedad inicial del suelo. En la Figura 3 se presentan las gráficas de cambio de las pérdidas por percolación profunda en función de la humedad inicial del suelo. El análisis de los resultados de los cálculos permite señalar que:

Tienen importancia ambas formas de las pérdidas:

- q_1 sin cambio de la humedad en el perfil del suelo de la zona radical, y
- q_2 por el aumento de la humedad en esta parte del perfil del suelo.

Las pérdidas en forma de q_1 y las totales (q_0) se incrementan cuando aumenta el contenido de humedad inicial, en contraparte las pérdidas en forma de q_2 disminuyen con el aumento de la humedad, este comportamiento ocurre para las tres texturas de suelo.

Las pérdidas mayores ocurren en el suelo arenoso y las menores en el suelo arcilloso. Las pérdidas pueden alcanzar 70 % de la lámina infiltrada en los suelos arenosos cuando la humedad inicial es muy alta ($\theta_1 = 0.8\theta_{cc}$) y la intensidad de aplicación baja (0.5 cm h^{-1}).

Cuando la humedad inicial del suelo es muy alta ($\theta_1 = 0.8\theta_{cc}$) la pérdida total en los suelos limoso y arcilloso puede alcanzar 30 y 33 % de la lámina infiltrada, respectivamente, cuando la intensidad es baja (0.5 cm h^{-1} para el suelo limoso y 0.2 cm h^{-1} para el arcilloso) y 7 y 16 % si la intensidad de aplicación es alta (1.5 cm h^{-1} para el suelo limoso y 0.4 cm h^{-1} para el arcilloso).

La cantidad de las pérdidas por percolación durante los riegos requiere tomar en consideración este aspecto en los balances de agua en los campos

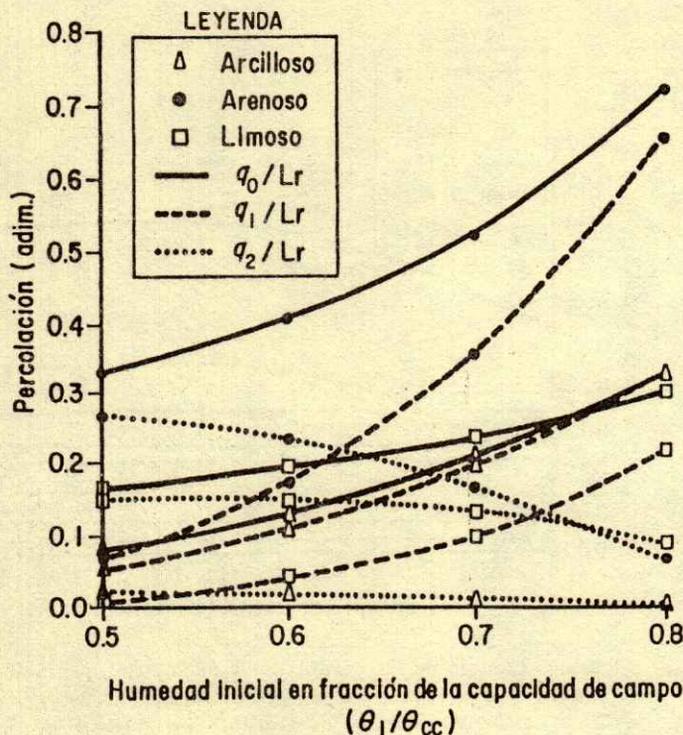


Figura 3. Cambio de las pérdidas por percolación profunda (como fracción de la lámina de riego infiltrada Lr : $q_1^{adim} = q_1/Lr$, $q_2^{adim} = q_2/Lr$ y total $q_0^{adim} = q_0/Lr$) en función de la humedad inicial del suelo durante los riegos por aspersión con la intensidad mínima (0.5 cm h^{-1} para los suelos arenoso y limoso y 0.2 cm h^{-1} para el suelo arcilloso), profundidad de la zona radical de 0.5 m y nivel freático profundo.

agrícolas, en programación de riegos, incluyendo en determinaciones de:

- Lámina de cada aplicación de riego.
- Intensidad de aplicación.
- La humedad deseable del suelo.

Cambio de las pérdidas en función de la profundidad de la zona radical. Cuando la profundidad del sistema radical es mayor, las pérdidas en forma de q_2 y las totales (q_0) decrecen, respecto a las pérdidas en forma de q_1 , éstas se mantienen constantes para cualquier profundidad de la zona radical y para un mismo contenido de humedad inicial. La pérdida en forma de q_1 no varía con la profundidad, porque si bien la lámina de riego aumenta también lo hace el tiempo en la misma proporción.

En general las pérdidas totales (q_0) por percolación profunda durante los riegos decrecen con el crecimiento de la zona de humedecimiento del suelo (o de la zona radical) especialmente cuando los riegos se realizan con la máxima intensidad de aplicación

posible (Figura 4). Las pérdidas mayores ocurren en los suelos arenosos y las menores en los arcillosos para todas las profundidades posibles de la zona de humedecimiento.

Cambio de las pérdidas en función de la intensidad de aplicación. El análisis de la Figura 5 permite indicar que cuando aumenta la intensidad de aplicación, para un mismo contenido de humedad, las pérdidas en forma de q_1 disminuyen de manera inversamente proporcional a la intensidad. Esto se explica porque el tiempo disminuye de la misma forma, es decir, que si la intensidad se aumenta el doble o el triple q_1 se reduce dos o tres veces. Igualmente las pérdidas totales (q_0) disminuyen, pero sin seguir ninguna proporción.

Respecto a las pérdidas en forma de q_2 , éstas disminuyen también con el aumento de la intensidad de aplicación. Esto es debido a que el perfil de humedad es más suave y, por lo tanto, alcanza una menor profundidad.

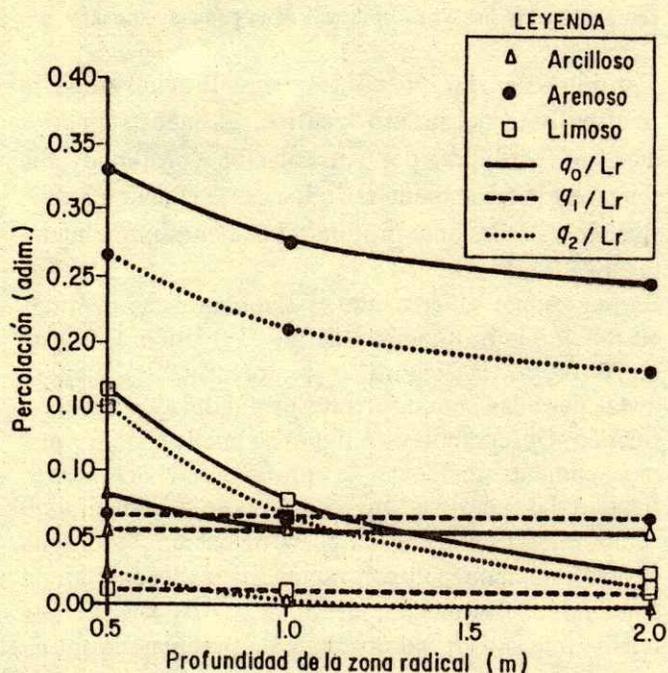


Figura 4. Cambio de las pérdidas por percolación profunda (como fracción de lámina de riego infiltrada Lr : $q_1^{adim} = q_1/Lr$, $q_2^{adim} = q_2/Lr$ y total $q_0^{adim} = q_0/Lr$) en función de la profundidad de la zona radical durante los riegos por aspersión con la intensidad mínima (0.5 cm h^{-1} para los suelos arenoso y limoso y 0.2 cm h^{-1} para el suelo arcilloso), una humedad inicial igual a 50% de capacidad de campo y nivel freático profundo.

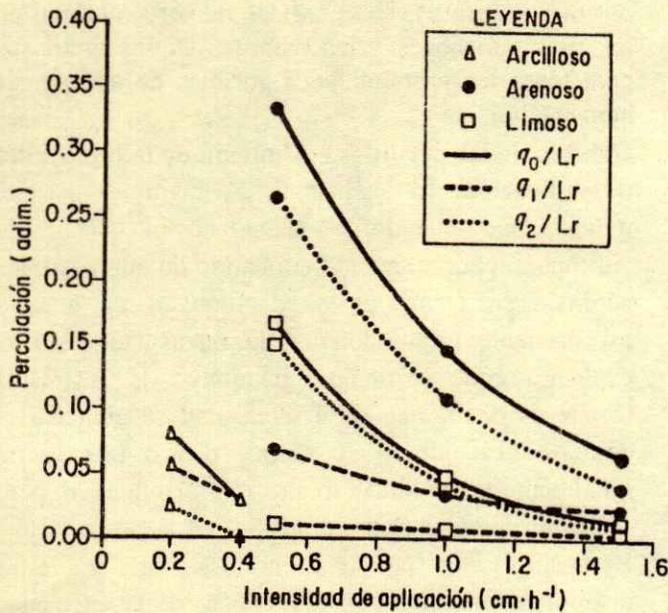


Figura 5. Cambio de las pérdidas por percolación profunda (como fracción de lámina de riego infiltrada Lr : $q_1^{adim} = q_1/Lr$, $q_2^{adim} = q_2/Lr$ y total $q_0^{adim} = q_0/Lr$) en función de la intensidad de aplicación de los riegos por aspersión en tres tipos de suelo cuando la humedad inicial es igual a 50 % de capacidad de campo, nivel freático profundo y la zona radical es de 0.50 m.

Cambio de las pérdidas en función de la profundidad del manto freático. El análisis anterior de las pérdidas por percolación profunda fue relacionado principalmente a los casos cuando el nivel freático está bastante profundo (es decir, aproximadamente 5.0 m).

Es interesante saber cómo se cambian estas pérdidas en función la profundidad del nivel freático. Con este objetivo, en la Figura 6 se presenta el cambio de las pérdidas para diferentes profundidades del nivel freático. Observando esta figura se puede concluir que independientemente de la profundidad del manto freático las pérdidas en forma de q_1 (es decir, sin cambio de la humedad en el perfil debajo de la zona radical) se mantienen constantes. Esto sucede para un contenido de humedad inicial de $0.6\theta_{cc}$ y para una misma intensidad. No obstante las pérdidas en forma de q_2 y las totales (q_0) aumentan con el incremento de la profundidad del manto freático en los suelos arenoso y limoso y se mantienen constante en el suelo arcilloso, cuando se compara con las pérdidas cuando el nivel freático está profundo (5.0 m o más).

En general el comportamiento para la condición de flujo constante fue el siguiente:

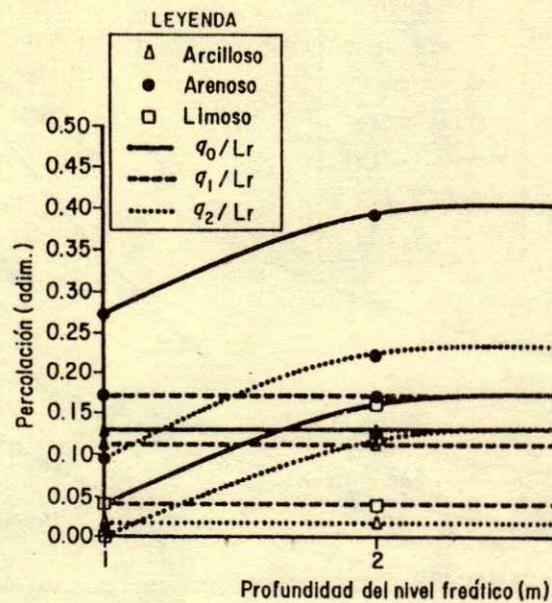


Figura 6. Cambio de las pérdidas por percolación profunda (como fracción de lámina de riego infiltrada Lr : $q_1^{adim} = q_1/Lr$, $q_2^{adim} = q_2/Lr$ y total $q_0^{adim} = q_0/Lr$) en función de la profundidad de la zona radical cuando se aplican los riegos por aspersión con una humedad inicial igual a 60 % de capacidad de campo, la zona radical de 0.50 m y la intensidad mínima de aplicación (0.5 cm h^{-1} para los suelos arenoso y limoso y 0.2 cm h^{-1} para el suelo arcilloso).

El comportamiento de la pérdida total (q_0) para las tres texturas de suelo cuando el nivel freático está profundo (5.0 o más metros) fue el siguiente: Para el suelo arenoso q_0 osciló entre 2 % y 70 % para las intensidades de 1.5 cm h^{-1} y 0.5 cm h^{-1} , un θ_i de $0.5\theta_{cc}$ y $0.8\theta_{cc}$ y profundidades del sistema radical de 2.0 m y 0.5 m, respectivamente, para el suelo limoso q_0 varió entre 0 % y 30 % para las mismas intensidades de aplicación, humedades iniciales del suelo y las mismas profundidades de la zona radical. Para el suelo arcilloso q_0 fluctúa entre 3 % y 33 % para las intensidades de 0.2 cm h^{-1} y 0.4 cm h^{-1} y las demás condiciones son las mismas mencionadas para el suelo arenoso.

El comportamiento de la pérdida total (q_0) para las tres texturas de suelo, una profundidad radical de 0.5 m, una humedad inicial θ_i de $0.6\theta_{cc}$ y para diferentes profundidades del manto freático fue el siguiente: Para el suelo arenoso q_0 osciló entre 6 % y 40 % para las intensidades de 1.5 cm h^{-1} y 0.5 cm h^{-1} , y profundidades de 1.0 y 3.0, respectivamente, y para el suelo limoso q_0 varió entre 1.3 % y 17 % para las mismas intensidades de aplicación. Para el suelo

arcilloso q_0 fluctuó entre 1.3 % y 13 % para las intensidades de 0.2 cm h⁻¹ y 0.4 cm h⁻¹. Estos resultados coinciden con los datos experimentales estimados aproximadamente en los campos regados y existentes en bibliografía. Según el Manual de Riego (1990), las pérdidas de agua q_0 promedio estimadas en los campos experimentales bajo riego por aspersión en diferentes suelos y zonas climáticas son de 10 % a 20 % de la lámina de riego infiltrada y 3 % a 10 % para riego localizado por goteo o por microaspersión). Israelsen, citado por Grassi (1988), en un estudio sobre evaluación de riego en suelos ligero, medio y pesado, encontró que las pérdidas por percolación profunda fueron de 40 %, 10 % y 5 % respectivamente.

CONCLUSIONES

De los resultados de esta investigación se puede concluir lo siguiente:

Para la condición de tirante de agua en las tres texturas de suelo:

Las pérdidas por percolación total (q_0), sin tomar en consideración los procesos de avance del agua sobre la superficie del suelo, son insignificantes (menor que 10 % de la lámina de riego) para cualquier contenido de humedad inicial y profundidad de la zona radical cuando el manto freático está profundo, y para manto freático somero y humedad inicial menor o igual al $0.6\theta_{cc}$ las pérdidas también son insignificantes.

Las pérdidas en forma de q_1 prácticamente son el componente principal de las pérdidas totales (q_0), esta pérdida crece con el aumento del contenido de humedad inicial y con el tiempo de aplicación.

Para flujo constante en las tres texturas de suelo:

En las condiciones típicas de la práctica de aplicación de riego por aspersión cuando la humedad de suelo antes de cada aplicación se mantiene a nivel no mayor de $0.6\theta_{cc}$:

- Las pérdidas en forma de q_2 superan a las que ocurren en forma de q_1 en los suelos arenosos y limosos con conductividad hidráulica relativamente alta.

- Las pérdidas en forma de q_1 superan a las que ocurren en forma de q_2 en los suelos arcillosos con una conductividad hidráulica relativamente baja.

El contenido de humedad inicial θ_1 y la intensidad de aplicación i son las variables que mayor influencia tiene sobre las pérdidas en forma de q_1 . Cuando aumenta el contenido de humedad inicial, q_1 se incrementa bruscamente. Cuando se reduce la

intensidad de aplicación, q_1 se incrementa de una forma inversamente proporcional para θ_1 constante, cualquier profundidad del sistema radical y del manto freático. Con las intensidades de aplicación muy bajas y las humedades iniciales relativamente altas, las pérdidas q_1 pueden alcanzar teóricamente hasta 70 % de la lámina aplicada en los suelos arenosos. Las pérdidas en forma de q_1 no varían con la profundidad del sistema radical o manto freático, para un mismo contenido de humedad inicial e intensidad de aplicación.

Las pérdidas en forma de q_2 disminuyen con el aumento de la intensidad de aplicación y el contenido de humedad inicial.

Las pérdidas q_0 aumentan con el incremento de θ_1 y disminuyen con la profundidad del sistema radical.

Las pérdidas en forma de q_1 , q_2 y las totales (q_0) disminuyen con el aumento de la intensidad de aplicación para una misma profundidad del manto freático y un contenido de humedad inicial.

Las pérdidas en forma de q_2 y las totales (q_0) cuando el nivel freático está profundo resultaron mayores que cuando el manto está a 3 m o menos de profundidad, excepto para el suelo arcilloso, en el cual resultaron igual para ambas condiciones.

Para ambas condiciones:

Los resultados de los cálculos de las pérdidas por percolación cuando se encuentra una lámina de agua sobre la superficie del suelo no corresponden completamente a lo que ocurre en el riego por gravedad, porque no toma en consideración el proceso de avance del frente de agua. Sin embargo, los resultados de la simulación permiten analizar el comportamiento de estas pérdidas en función de la humedad inicial del suelo, profundidad de la zona radical y del nivel freático.

La información obtenida para flujo constante puede tener correspondencia con lo que ocurre en el riego por aspersión, ya que en este tipo de riego la infiltración es netamente vertical y puntual, por lo tanto los datos obtenidos pueden servir de referencia para el manejo de este método de riego.

LITERATURA CITADA

- Aguila, F. 1997. Alternativa tecnológica y organizacional para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Averyanov, S.F. 1949. Permeabilidad hidráulica de los suelos con presencia de aire en los poros. Doklady AN SSSR: 46-2 (en ruso).

- Brooks, R.H. y A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Pap. 3, Colorado State University, Fort Collins.
- Grassi, C. 1988. Diseño y operación del riego por superficie. CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Manual de Riego. 1990. Ed. Agropromizdat, Moscú, URRS, pp. 27-44 (en ruso).
- Nikolski, Y.N. 1970. Estudio del régimen hídrico del perfil del suelo bajo riego hasta 18 m de profundidad usando aspersor de neutrones. Aplicaciones de isótopos en las investigaciones sobre mejoramiento de las tierras agrícolas. Vniigim 48: 112-116 (en ruso).
- Palacios V., E. 1990. La eficiencia en el uso del agua en los distritos de riego. Memoria: Análisis de la problemática del agua y perspectivas para la modernización de su uso en la agricultura de Guanajuato, Celaya, Gto., México.
- Parlange, J.Y., R. Haverkamp y J. Touma. 1985. Infiltration under ponded conditions: 1. Optimal analytical solution and comparison with experimental observations. Soil Sci.: 139: 305-311.
- Rendón, L. 1994. Riego por Melgas. III Curso internacional de sistemas de riego. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación, Chapingo, México.
- Romero, N. 1995. Desarrollo y aplicación de un modelo matemático para simular el movimiento en el suelo del agua infiltrada desde un canal. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Staple, W. y R. Gupta. 1966. Infiltration into homogeneous and layered columns of aggregated loam, silt loam and clay soil. Can. J. Soil Sci. 46: 293-305.
- Tabuada, M., Z. Rego, G. Vachaud y L. Pereira. 1995. Two-dimensional infiltration under furrow irrigation: Modelling, its validation and application. Agric. Water Management 27: 105-123.
- Van Genuchten, M. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 44: 892-898.
- Zaidel, J. y D. Russo. 1992. Estimation of finite difference interblock conductivities for simulation of infiltration into initially dry soils. Water Resources Res. 28-9: 2285-2295.

TRANSPIRACION, POTENCIAL HIDRICO Y PROLINA EN ZARZAMORA BAJO DEFICIT HIDRICO

Transpiration, Water Potential and Proline in Blackberry under Hydric Stress

Rafael A. Parra Quezada¹, José L. Rodríguez Ontiveros² (qepd) y
Víctor A. González Hernández²

RESUMEN

Se estudió la respuesta de la zarzamora cv. Cheyenne (*Rubus* spp.) a dos tratamientos de humedad en el suelo, suspensión del riego hasta marchitez foliar y riego constante con relación a la transpiración, resistencia estomática, potencial de agua y sus componentes, prolina, volumen de raíz, peso seco de tallo y raíz. Se utilizaron plantas de un año de edad con dos brotes maduros y dos jóvenes, crecidas en condiciones de invernadero. La suspensión del riego redujo la transpiración y aumentó la resistencia estomática, efectos que se mantuvieron 24 horas después del riego de recuperación. Aun así, la turgencia foliar bajo suspensión del riego se mantuvo positiva (0.3 MPa) en el momento de menor humedad en el suelo, lo cual se debió al descenso en el potencial osmótico, esto sugiere que probablemente hubo ajuste osmótico. La suspensión del riego también aumentó en 218 % el contenido foliar de prolina.

Palabras clave: *Rubus* spp., sequía, ajuste osmótico.

SUMMARY

Blackberry (*Rubus* spp.) cv. Cheyenne was evaluated under two conditions, irrigation and drought stress, regarding transpiration, stomatal resistance, water potential components, proline contents, root volume and dry weight of stems and roots. One-year old plants growing in pots in a greenhouse, with two mature primocanes and two young primocanes were used in this experiment. Drought stress reduced transpiration and increased stomatal resistance, effects that remained 24 hours after irrigation was restored. This cultivar was able to maintain a leaf

turgor of 0.3 MPa under water stress, which was attributed to osmotic adjustment since the osmotic potential (ψ_p) decreased faster than water potential (ψ_w) under drought stress. Proline content was 218 % higher under drought than irrigated conditions.

Index words: *Rubus* spp., drought stress, osmotic adjustment.

INTRODUCCION

La zarzamora (*Rubus* spp.) es una especie originaria de América del Norte. En la actualidad existen varios cultivares de esta especie como son Shwnee, Rosborough, Brazos, Cheyenne, Darrow, Cherokee, Comanche, Navaho y Choctaw (Clark, 1992; Moore, 1997); algunos de éstos se han adaptado en México, particularmente en zonas de los estados de Michoacán, México y Puebla. Para un desarrollo óptimo, la zarzamora requiere de 1000 a 1200 mm de lluvia anual bien distribuida, por lo que frecuentemente necesita de agua de riego, lo que incrementa los costos de producción.

Uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit de agua es el crecimiento celular, de manera que la sequía reduce la expansión y el área foliar. Cuando el déficit hídrico es severo, se acelera la senescencia de hojas maduras (Hsiao, 1973); además la fotosíntesis y la transpiración se abaten debido a la reducción de la turgencia, al cierre estomático y al bloqueo a la difusión de CO₂ hacia el mesófilo (Ludlow y Muchow, 1990; Núñez, 1991; Kumar *et al.*, 1994). El cierre de estomas se ha asociado con una rápida síntesis de ácido abscísico (Webb y Mansfield, 1992).

Un mecanismo que contribuye a la resistencia a la sequía es el ajuste osmótico, al cual Turner y Jones (1980) definen como la habilidad de las plantas para acumular solutos activamente ante un déficit hídrico. Este mecanismo permite mantener un potencial de

Especialidades de Fruticultura¹ y Genética². IREGEP. Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Estado de México. Fax (595) 1-02-30

Recibido: Enero de 1999.
Aceptado: Mayo de 1999.

turgencia alto, a pesar del descenso en el potencial hídrico, lo que puede traer como consecuencia que la apertura del estoma, la expansión foliar, la transpiración y la fotosíntesis se mantengan funcionando por más tiempo (Lakso, 1979).

El ajuste osmótico se atribuye a la síntesis y absorción de sustancias osmóticamente activas, tales como cationes inorgánicos, ácidos orgánicos, aminoácidos y azúcares (Wang y Stutte, 1992; Wang *et al.*, 1995). En condiciones de invernadero este mecanismo se expresa en menor grado, probablemente debido al menor volumen de suelo (Turner, 1997).

Las respuestas metabólicas de las plantas a la deshidratación son diversas y complejas, incluyendo la acumulación de sustancias que no son constituyentes normales de las células; tal es el caso de la prolina, aminoácido cuya concentración se incrementa notoriamente en condiciones de sequía, en alta o baja temperatura, o por deficiencias nutrimentales (Nolte *et al.*, 1997).

Considerando lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue conocer el comportamiento de la zarzamora en condiciones de riego constante y suspendiendo el mismo, en función de algunos procesos fisiológicos.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se llevó a cabo de septiembre a diciembre de 1996 en invernadero en el Colegio de Postgraduados, ubicado en Montecillo, Estado de México. Se utilizaron 10 plantas de zarzamora cv. Cheyenne de un año de edad, plantadas en bolsas de polietileno negras de 30 x 50 cm con 11.5 kg de una mezcla de suelo. La mezcla consistió de tierra de monte y arena en proporción de 4:1. Con el fin de uniformizar el tamaño de las planta entre las unidades experimentales, en cada bolsa se dejó una planta con dos brotes maduros y dos jóvenes, eliminando los brotes restantes. De las 10 plantas, cinco se regaron tres veces por semana para evitar el déficit hídrico (tratamiento de riego). Al resto se les suspendió el riego por 23 días a partir de la poda de los brotes (tratamiento de suspensión del riego) hasta que las plantas mostraron marchitez diurna con recuperación de la turgencia durante la noche; para finalmente aplicar el riego de recuperación a los 25 días.

A lo largo del experimento se midió el potencial hídrico del suelo (ψ_{ws}), cada dos días hasta 35 días

después de iniciado el experimento. Esta determinación se realizó en una muestra de suelo obtenida de la parte media de la maceta, en la que se determinó el contenido de humedad con el método gravimétrico, al mismo tiempo se obtuvo la curva de retención de humedad del sustrato utilizado, para posteriormente extrapolar los datos de porcentaje de humedad a MPa. Por otro lado se midió el ritmo diurno de la tasa de transpiración foliar ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) y de la resistencia estomática a la difusión (s cm^{-1}). Estas variables se determinaron con un porómetro LI-1600 (LI-COR, Inc. Lincoln, Ne, USA) en una hoja madura joven a las 9, 11 y 14 h cuando se alcanzó la marchitez (23 días) y un día después del riego de recuperación (26 días). También se determinaron los ritmos diurnos del potencial hídrico (ψ_w), del potencial osmótico (ψ_p) y el potencial de turgencia (ψ_t) en hojas maduras más jóvenes. El ψ_w y el ψ_p se midieron mediante la técnica de psicrometría de termopar, usando discos foliares de 0.5 cm de diámetro, antes y después de ser congelados en nitrógeno líquido. El ψ_t se calculó con la diferencia: $\psi_w - \psi_p$. Las mediciones se hicieron en las mismas horas y fechas en que se midieron las variables porométricas.

Además se determinó el tamaño de la planta y sus órganos a los 35 días (10 días después del riego de recuperación). En cada tratamiento se midió el volumen de raíz (cm^3), el peso seco del tallo (g planta^{-1}) y el peso seco de la raíz (g planta^{-1}); con estos dos últimos datos se calculó la relación raíz/tallo. La extracción de la raíz se hizo mediante lavados con agua corriente. El volumen de la raíz se obtuvo mediante el desplazamiento de agua en una probeta graduada. Los pesos secos se registraron después de secar los tejidos en estufa a 70 °C hasta peso constante. Finalmente, se determinó la concentración foliar de prolina (mg g^{-1} de peso seco) a partir de tres hojas maduras por planta un día antes del riego de recuperación (día 24). Las hojas se pusieron en nitrógeno líquido para detener la actividad metabólica, y en seguida se colocaron en matraces para su liofilización por 12 horas. Posteriormente, se molieron para proceder a determinar la concentración foliar de prolina según Nolte *et al.* (1997).

El análisis estadístico se hizo mediante un diseño completamente al azar con cinco repeticiones. Para la comparación de medias de tratamientos se usó la prueba de Duncan, con 0.10 de probabilidad de error.

RESULTADOS Y DISCUSION

Potencial Hídrico del Suelo

La suspensión del riego ocasionó un rápido descenso del potencial hídrico del suelo (ψ_{ws}) en contraste con el tratamiento de riego, en donde el potencial se mantuvo alto, cerca de capacidad de campo (Figura 1). La marchitez foliar se observó cuando el ψ_{ws} bajó a -0.85 MPa. El riego de recuperación aplicado cuando el ψ_{ws} alcanzó -1.0 MPa permitió que el suelo se rehidratara a un nivel similar al del testigo con riego.

Transpiración y Resistencia Estomática

En condiciones de riego, la tasa de transpiración foliar de la zarzamora cv. Cheyenne se mantuvo alta de las 9 a las 11 horas, con un valor de aproximadamente $7 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, para luego decrecer a $6 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a las

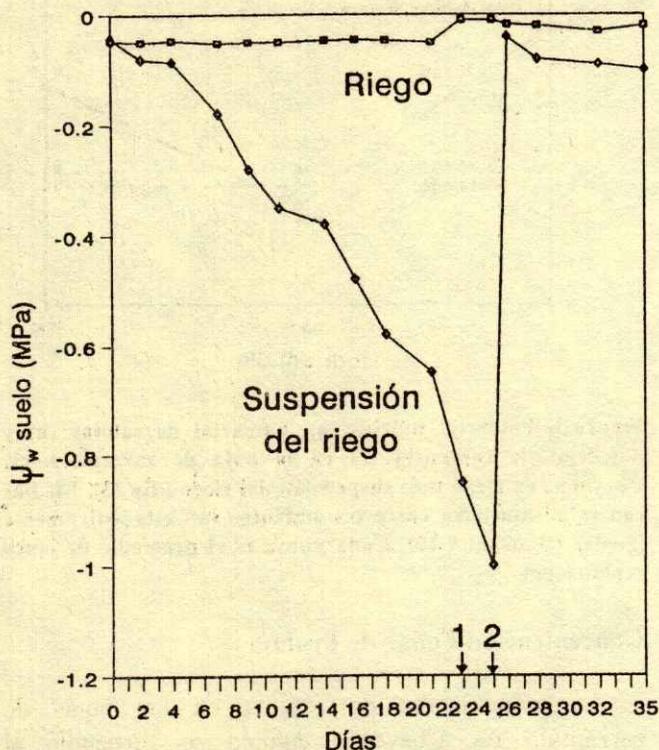


Figura 1. Potencial hídrico del suelo en dos tratamientos de humedad (riego y suspensión del riego) aplicados a plantas de zarzamora cv. Cheyenne en condiciones de invernadero. Las flechas indican 1) Fecha de marchitez foliar; 2) Aplicación del riego de recuperación.

14 horas. En el tratamiento de suspensión del riego se observó una cinética transpiratoria paralela, pero a una tasa consistentemente inferior en 30 % (Figura 2a).

La reducción transpiratoria en sequía se atribuye al aumento hasta en 40 % de la resistencia estomática en comparación con la de riego, aunque sólo se presentó diferencia significativa a las 9 y 14 horas. En otras especies, como frijol y manzano, la baja transpiración y la alta resistencia estomática a la difusión se deben al cierre estomático inducido por el déficit de agua en el suelo, frecuentemente asociado con una acumulación de ácido abscísico (Lakso, 1979; Ludlow y Muchow, 1990; Webb y Mansfield, 1992).

Un día después del riego de recuperación, la transpiración de las plantas de zarzamora que se les suspendió el riego aún eran inferiores a las del testigo (Figura 2b), incluso con una diferencia más grande que

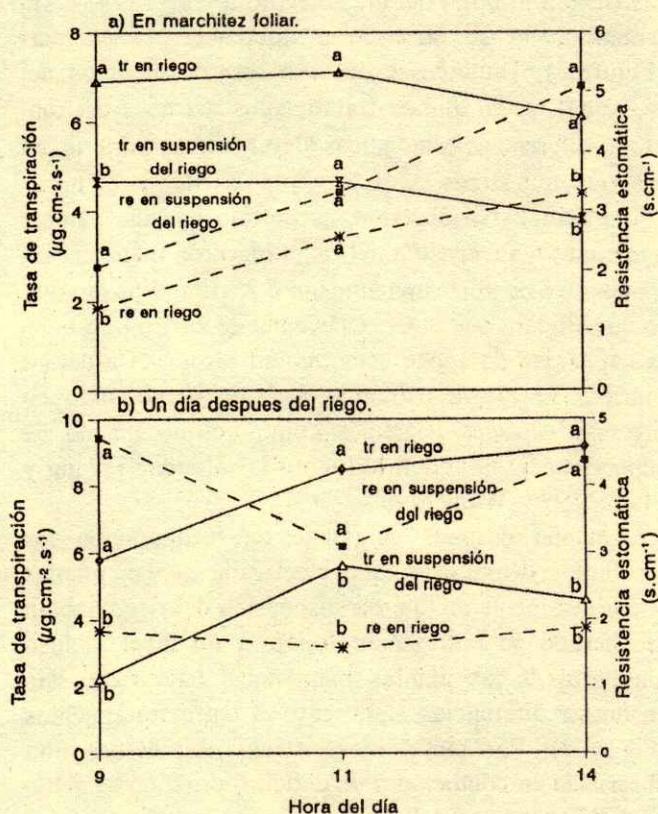


Figura 2. Tasa de transpiración (tr) y resistencia estomática (re) en zarzamora cv. Cheyenne en dos condiciones de humedad (riego y suspensión del riego), en marchitez foliar (a) y un día después del riego de recuperación (b). Medias con la misma letra entre tratamientos son estadísticamente iguales (Duncan, 0.10). Cada punto es el promedio de cinco repeticiones.

durante la marchitez. Ello se debió a que los estomas de este cultivar de zarzamora aún mantenían una alta resistencia a la difusión de vapor de agua. Si se considera que el riego de recuperación permitió la rehidratación de las plantas sometidas a estrés hídrico, como se apreció visualmente, entonces el cierre estomático sería atribuible a factores no hídricos, sino a factores hormonales como ABA, o a otro tipo de compuestos como K y Ca que controlan la apertura y cierre de estomas, como lo sugieren Johnson *et al.* (1991), Ludlow y Muchow (1990) y Webb y Mansfield (1992).

Potencial Hídrico Foliar y sus Componentes

La suspensión del riego redujo el ψ_w , el ψ_p y el ψ_t de la hoja como se muestra en la Figura 3. Las plantas bajo riego mantuvieron un ψ_t superior al de suspensión del riego a lo largo del día, excepto a las 11 horas; sin embargo, no se observaron diferencias estadísticas (Figura 3). También se observó una disminución del ψ_w y del ψ_p en ambos tratamientos a través del día. Hubo diferencias estadísticas significativas para ψ_w en los tres muestreos, y para ψ_p a las 11 y 14 horas (Figura 3bc). No obstante, es notorio que las plantas sometidas a suspensión del riego lograron mantener un ψ_t positivo de aproximadamente 0.3 MPa al medio día, lo que sugiere que el cv. Cheyenne de zarzamora tiene la capacidad de ajuste osmótico en respuesta a déficit hídrico. El ajuste osmótico ha sido demostrado en diversas especies vegetales como un mecanismo de supervivencia al déficit hídrico o la salinidad (Wang y Stutte, 1992; Wang *et al.*, 1995).

Un día después del riego de recuperación los resultados demuestran que efectivamente las plantas que previamente recibieron suspensión del riego habían recuperado su hidratación foliar, a un nivel incluso mayor al de las plantas mantenidas bajo riego, sin encontrar diferencias significativas entre tratamientos (Figura 4). Por tanto, la resistencia estomática alta observada en condiciones de déficit hídrico no se debió a deshidratación del tejido, sino a otros factores probablemente de tipo hormonal como ABA, y/o a concentración de K y Ca en las células guarda (Johnson *et al.*, 1991).

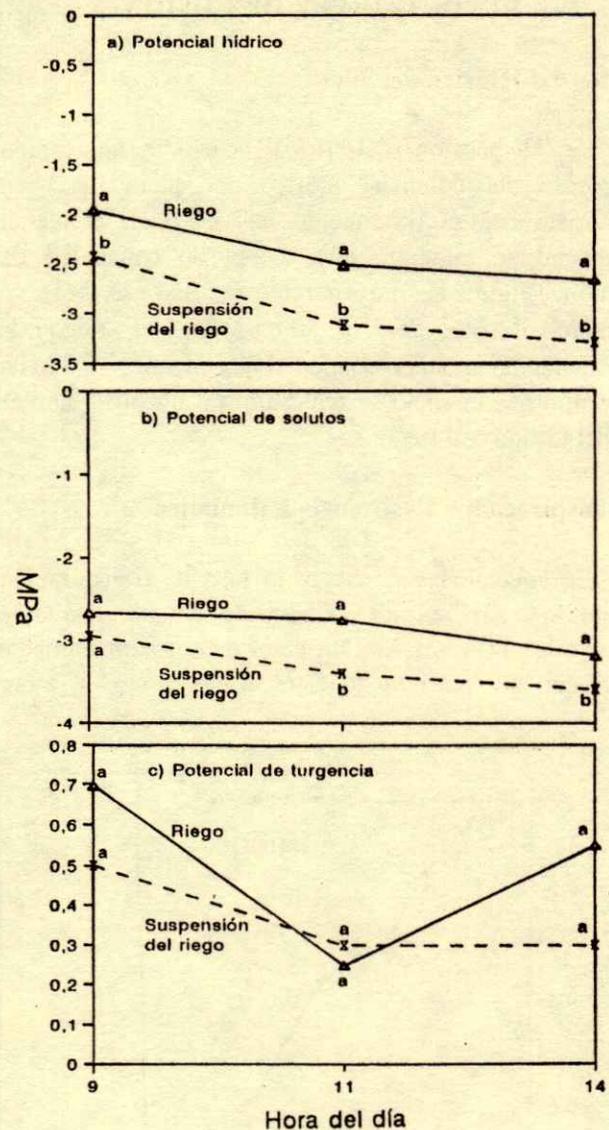


Figura 3. Potencial hídrico (a), potencial de solutos (b) y potencial de turgencia (c) en la hoja de zarzamora cv. Cheyenne en riego y en suspensión del riego (día 23). Medias con la misma letra entre tratamientos son estadísticamente iguales (Duncan, 0.10). Cada punto es el promedio de cinco repeticiones.

Concentración Foliar de Prolina

La acumulación de prolina en las hojas de zarzamora cv. Cheyenne cuando se suspendió el riego, fue más del doble que en las plantas con riego (Cuadro 1). Este aminoácido es uno de los más

Cuadro 1. Volumen radical, peso seco de tallo y raíz, relación raíz/tallo y concentración foliar de prolina en zarzamora cv. Cheyenne, bajo dos tratamientos de humedad edáfica[†].

Tratamiento	Volumen radical cm ³	Peso seco tallo g pl ⁻¹	Peso seco raíz g pl ⁻¹	Relación raíz/tallo	Prolina mg g ⁻¹ de MS
Riego	320.6 a [‡]	27.07 a	123.8 a	4.6 a	0.83 b
Suspensión de riego	303.0 b	23.75 a	113.8 a	4.8 a	1.81 a

[†] Media de cinco plantas por tratamiento.

[‡] Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Duncan, 0.10).

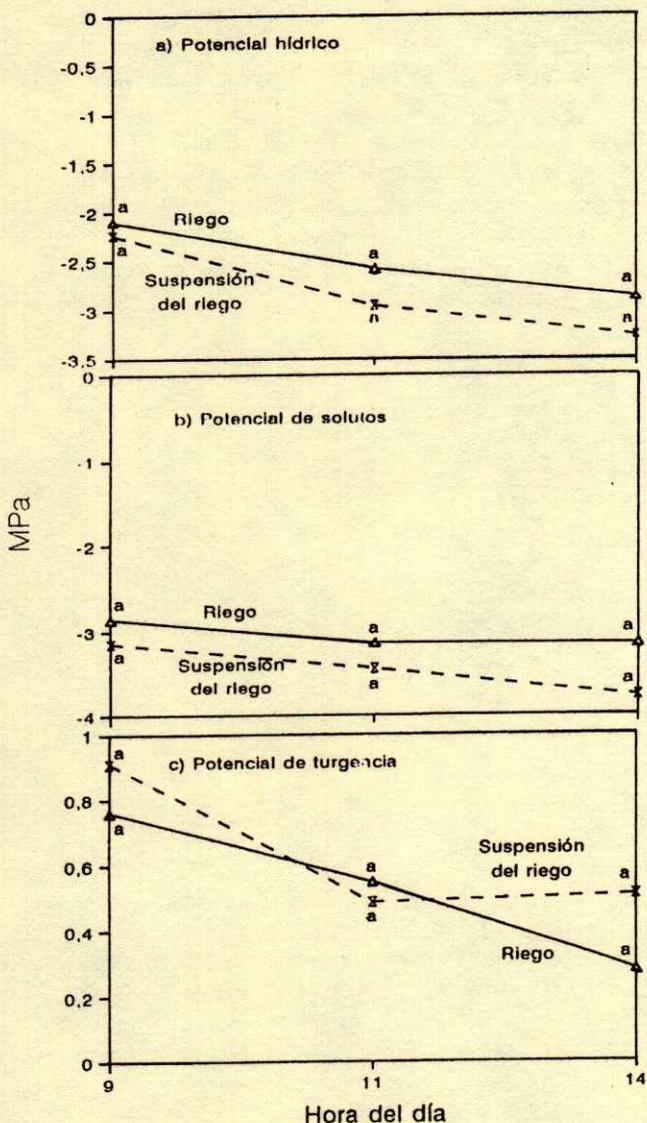


Figura 4. Potencial hídrico (a), potencial de solutos (b) y potencial de turgencia (c) en la hoja de zarzamora cv. Cheyenne en riego y en suspensión del riego (día 26). Medias con la misma letra entre tratamientos son estadísticamente iguales (Duncan, 0.10). Cada punto es el promedio de cinco repeticiones.

estables en condiciones de sequía, el menos inhibitorio del crecimiento celular y tiene una naturaleza altamente higroscópica. La prolina además juega un papel importante en el ajuste osmótico, funciona como soluto osmoprotector del citoplasma, provee estabilidad a los coloides, y es una fuente de nitrógeno en condiciones de sequía (Andrade *et al.*, 1995; Nolte *et al.*, 1997).

Tamaño de la Planta

El volumen de las raíces y el peso seco de tallo y raíz disminuyeron con la suspensión del riego (Cuadro 1), en cambio la relación raíz/tallo no fue afectada, lo que indica que el déficit hídrico redujo en proporciones similares la biomasa del tallo y raíz. Tales cambios sólo fueron estadísticamente significativos para volumen de raíces ($p < 0.10$), pero no para peso seco de tallo y raíz. Lo anterior se atribuye, como lo indica Hsiao (1973), a que uno de los procesos más sensibles al déficit de agua es el crecimiento celular, de manera que la suspensión del riego reduce la expansión foliar, crecimiento del tallo y de las raíces, y cuando el déficit es más severo, se acelera la senescencia de hojas maduras.

CONCLUSIONES

La zarzamora cv. Cheyenne bajo déficit hídrico del suelo presentó una disminución de la transpiración, aumentó la resistencia estomática, mantuvo el potencial de turgencia foliar y aumentó el contenido de prolina en la hoja.

LITERATURA CITADA

Andrade, J.L., A. Larqué-Saavedra y C. Trejo L. 1995. Proline accumulation in leaves of four cultivars of *Phaseolus vulgaris* L. with different drought resistance. *J. Exp. Bot.* 57:149-157.

- Clark, J.R. 1992. Blackberry production and cultivars in North America east of the Rocky Mountains. *Fruit Var. J.* 46: 217-222.
- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.
- Johnson, I.R., J.J. Melkonian, J.H.M. Thornley y S.J. Riha. 1991. A model of water flow through plants incorporating shoot/root message control of stomatal conductance. *Plant, Cell and Environment* 14: 531-544.
- Kumar, A., D.P. Singh, y P. Singh. 1994. Influence of water stress on photosynthesis, transpiration, water use efficiency and yield of *Brassica juncea* L. *Field Crop Res.* 37: 95-101.
- Lakso, A.N. 1979. Seasonal changes in stomatal response to leaf water potential in apple. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 104: 58-60.
- Ludlow, M.M. y R.C. Muchow. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yield in water limited environments. *Adv. Agron.* 43: 107-153.
- Moore, J.N. 1997. Blackberries and raspberries in the southern United States: Yesterday, today and tomorrow. *Fruit Var. J.* 51: 148-157.
- Nolte, H.D., A.D. Hanson, y D.A. Gage. 1997. Proline accumulation and methylation to proline betaine in *Citrus*: Implications for genetic engineering of stress resistance. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 122: 8-13.
- Nuñez, B.A. 1991. La fisiología del frijol bajo condiciones de sequía. *Rev. Fitotecnia Mexicana* 14: 269-275.
- Turner, N.C. 1997. Further progress in crop water relations. *Adv. Agron.* 58: 293-338.
- Turner, N.C. y M.M. Jones. 1980. Turgor maintenance by osmotic adjustment: a review and evaluation. pp. 87-103. *In*: N.C. Turner y J.P. Kramer (eds.). *Adaptation of plants to water and high temperature stress.* Wiley Interscience, New York.
- Wang, Z. y G.W. Stutte. 1992. The role of carbohydrates in active osmotic adjustment in apple under water stress. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117: 816-823.
- Wang, Z., B. Quebedeaux y G.W. Stutte. 1995. Osmotic adjustment: Effect of water stress on carbohydrates in leaves, stems and roots of apple. *Aust. J. Plant Physiol.* 22: 747-754.
- Webb, A.A. y T.A. Mansfield. 1992. How do stomata work? *J. Biol. Educ.* 26: 19-26.

ESTRATIFICACION DEL POTENCIAL PRODUCTIVO DEL MAIZ EN LA REGION ORIENTE DEL ESTADO DE TLAXCALA

Stratification of the Productive Potential of Maize at the Eastern Region of the State of Tlaxcala

Andrés María Ramírez¹ y Víctor Volke Haller²

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue realizar una estratificación del ambiente, con fines de definir los estratos de potencial productivo del maíz (*Zea mays* L.), en la región oriente del estado de Tlaxcala, para la generación y transferencia de tecnología, mediante una función de producción que considere los factores de suelo, clima y manejo que afectan el rendimiento del maíz. Con base en la función de producción obtenida, se encontró que los factores que afectan el rendimiento de maíz en la región son: a) de suelo: el potasio intercambiable, la profundidad y la pendiente; b) de clima: la precipitación en el mes después de la siembra y la precipitación en el período de 30 días antes hasta 20 días después de la floración masculina; c) de suelo y clima: la fecha de siembra, en términos del tipo de siembra, esto es, siembras tempranas, intermedias y tardías; y d) de manejo: fecha de siembra dentro de cada tipo de siembra y variedad de maíz. A partir de los valores de interés o la distribución de los factores de suelo, clima y manejo en la región, incluidos en la función de producción, con excepción del potasio intercambiable del suelo, se definieron los estratos de potencial productivo del maíz en la región oriente del estado de Tlaxcala.

Palabras clave: Estratificación del ambiente, función de respuesta, *Zea mays*.

SUMMARY

The objective of the present work was to carry out an environmental stratification to define areas of similar productive potential of maize (*Zea mays* L.), at the eastern region of the State of Tlaxcala, for the

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Tlaxcala, Tlaxcala, Tlax.

² Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Edo. de México.

Recibido: Noviembre de 1997.
Aceptado: Junio de 1999.

generation and transference of technology, by means of a production function that includes factors of soil, climate and management of maize. The production function shows that the factors which affected the yield of maize were a) of soil: interchangeable potassium, depth, and slope; b) of climate: rainfall in the month after sowing and rainfall in the period of 30 days before and 20 days after maize flowering; c) of soil and climate: the sowing date, related to sowing type: early, intermediate, and late sowings; and d) of management: sowing date within the sowing type and variety of maize. Through the production function, and the values of interest or the distribution of soil, climate and management factors, included in the production function, except interchangeable potassium of soil, the areas of productive potential of maize were defined for the oriental region of the State of Tlaxcala.

Index words: Environmental stratification, production function, *Zea mays*.

INTRODUCCION

Mediante la estratificación del ambiente en áreas de agricultura de temporal, generalmente se intenta reducir la variación existente en los factores inmodificables de suelo y clima que definen el potencial productivo de un cultivo dado, con fines de generar tecnología de producción más precisa y favorecer su transferencia.

En el área del Distrito de Desarrollo Rural 165, Huamantla, Tlax., se han realizado algunas investigaciones orientadas a estratificar el ambiente y generar recomendaciones de producción para maíz de temporal (Villalpando, 1975; Aveldaño, 1979; Iriarte, 1981; Flores, 1988, Galvis, 1990; Legorreta y María, 1994).

Villalpando (1975), al comparar varios métodos de estratificación del ambiente, así como buscando desarrollar un método para obtener una ecuación empírica generalizada que permitiera hacer recomendaciones de fórmulas de producción para maíz de temporal, en la región centro del estado de

Tlaxcala, definió mediante el método de sistemas de producción, cuatro agrosistemas. Posteriormente, Aveldaño (1979) realizó una investigación con el fin de definir una metodología para estratificar el ambiente en unidades de producción que permitieran reducir la variación de los factores inmodificables de la producción, a la vez que lograr una mayor precisión en la generación de tecnología para maíz de temporal. Mediante el método de agrupación de agrosistemas con criterio agronómico, determinó tres agrosistemas, con base en la profundidad y pendiente de suelo, posición fisiográfica, precipitación, temperatura y fecha de siembra.

Flores (1988), en un estudio para determinar la dosis de fertilización nitrogenada para maíz y cebada mediante el uso de un modelo simplificado, identificó 19 unidades edafoclimáticas en el estado de Tlaxcala, con base en un mapa de isoyetas al 80 % de probabilidad y de déficit evapotranspirativo, y de un mapa de series de suelo que incluía la profundidad del suelo.

Galvis (1990), al validar normas de fertilización nitrogenada y fosforada para el cultivo de maíz en el estado de Tlaxcala mediante un modelo simplificado, identificó 10 agroecosistemas que cubren a toda el área productora de maíz, con base en unidades climáticas de déficit evapotranspirativo en el periodo crítico del maíz, donde el déficit evapotranspirativo es la diferencia entre la evaporación y la precipitación para una probabilidad dada.

Finalmente, Legorreta y María (1994) reportan la estratificación del estado de Tlaxcala en áreas de potencial productivo para maíz, entre otros cultivos, a partir de bases de datos de clima (temperatura, precipitación) y suelo (profundidad), y la altitud.

El objetivo del presente trabajo fue realizar una estratificación del ambiente, para definir los estratos de potencial productivo del maíz con fines de generación y transferencia de tecnología, mediante una función de producción que considere los factores de suelo, clima y manejo que afectan el rendimiento del maíz, en la región oriente del estado de Tlaxcala.

MATERIALES Y METODOS

Para estimar la función de producción se utilizó información de 74 experimentos de productividad de maíz, reportados por Villalpando (1975), Aveldaño (1979) y Velasco (1981), y 33 parcelas de validación de tecnología, establecidas por el INIFAP en la región de Huamantla, Tlax., de 1983 a 1994. En los

experimentos se estudió la respuesta a los factores nitrógeno, fósforo y densidad de plantas, usando los diseños de tratamientos matriz Plan Puebla y de Box, modificada por Myers, con la forma $2^k + 2k+1$ tratamientos, donde k es el número de factores; y, en las parcelas de validación, se estudió la validación de diversas tecnologías de interés.

En los experimentos se consideró el rendimiento óptimo económico, estimado gráficamente y corregido por el factor 0.8 para estimar rendimientos comerciales, y en las parcelas de validación de tecnología se consideró el rendimiento comercial obtenido, a la vez que tanto en los experimentos como en las parcelas de validación se consideraron factores de suelo, clima y manejo. En el Cuadro I se presentan los factores de suelo, clima y manejo considerados, así como la variable del cultivo.

Por otra parte, también se consideraron: los factores climáticos, como heladas, granizo y sequía, cuando se hubiesen presentado, aunque esta información estuvo incompleta en algunos casos; y los factores infestación de malezas y plagas y enfermedad, mismos que no se presentaron de manera importante.

De acuerdo con los objetivos del trabajo, se procedió a estimar una función de producción para maíz, como función de factores de suelo, clima y manejo. Con los factores de suelo, clima y manejo de tipo inmodificable que quedaron incluidos en la función de producción, se definieron clases, y con base en las clases de los factores, se definieron los estratos de potencial productivo.

Para estimar la función de producción se procedió según la siguiente metodología:

1. Determinar las dosis óptimas económicas de nitrógeno, fósforo y densidad de plantas en los experimentos de productividad y, con ellas, los rendimientos óptimos económicos, mediante el procedimiento gráfico (Volke, 1990).

2. Determinar la correlación entre los factores de suelo, clima y manejo, con fines de identificar aquéllos altamente correlacionados, considerando 0.8 como valor límite de una correlación alta (Rebolledo, 1991; Volke, 1996).

3. Graficar los rendimientos óptimos económicos de los experimentos de productividad y los rendimientos obtenidos en las parcelas de validación de tecnología *versus* los factores de suelo, clima y manejo, para observar posibles puntos aberrantes y especificar un modelo aproximado de la relación ente el rendimiento y los factores.

Cuadro 1. Variable del cultivo y factores de suelo, clima y manejo.

Variable del cultivo
Rendimientos óptimo económico de los experimentos y de las parcelas de validación de tecnología, a 14 % de humedad (kg ha ⁻¹)
Factores de suelo
Arena (%)
Arcilla (%)
Reacción (pH)
Materia orgánica (%)
Nitrógeno total (%)
Fósforo Olsen (ppm)
Potasio intercambiable (ppm)
Calcio intercambiable (ppm)
Magnesio intercambiable (ppm)
Profundidad (cm)
Pendiente (%)
Factores de clima
Precipitación diaria durante el ciclo del cultivo (mm)
Días con temperatura menor que 7 °C durante el ciclo del cultivo
Días con temperatura menor que o igual a 0 °C durante el ciclo del cultivo
Factores de suelo y clima
Tipo de siembra: tempranas, de marzo, en suelos de humedad residual a altitudes mayores que 2500 m; intermedias, de abril, en suelos de humedad residual a altitudes menores que 2500 m; y, tardías, de abril y mayo, de temporal.
Factores de manejo
Dosis óptima económica de nitrógeno (N) en los experimentos y cantidad de nitrógeno aplicado en las parcelas de validación (kg ha ⁻¹).
Dosis óptima económica de fósforo (P ₂ O ₅) en los experimentos y cantidad de fósforo aplicado en las parcelas de validación (kg ha ⁻¹).
Densidad óptima económica de plantas en los experimentos y densidad de plantas en las parcelas de validación (miles de plantas ha ⁻¹).
Fecha de siembra dentro de cada tipo de siembra (tempranas, intermedias y tardías) (días a partir del 1 de enero).
Variedad de maíz

4. Con base en la forma de la relación observada entre el rendimiento y los factores, se especifica un modelo de regresión de variables simples.

5. Con el modelo de regresión especificado se piden los residuales, y la relación gráfica de éstos con los factores de suelo, clima y manejo, para verificar el modelo de los factores incluidos; incluir y probar factores no incluidos, en sus variables simples; y observar posibles puntos aberrantes. La permanencia de las variables en el modelo de regresión a obtener deberá cumplir con que presenten un signo de su efecto según lo esperado, y una significancia de F de al menos 0.25, a la vez que su inclusión en el modelo

disminuya el cuadrado medio de error. En el caso de observarse posibles puntos aberrantes, habrá que decidir sobre su inclusión o exclusión.

6. Una vez obtenido el modelo básico anterior, se procede a especificar las interacciones, con base en la posible importancia de ellas, de igual manera a como se procedió con las variables simples, obteniéndose el modelo final de la función de producción.

Para estimar la función de producción se siguió el criterio de utilizar toda la información disponible en cuanto a los sitios de muestreo, considerando contar con un mejor espacio de exploración para cada factor.

Para definir los estratos y su potencial productivo mediante la función de producción, se trabajó con base en clases de los factores que los definiesen, o según un valor de probabilidad para los factores de clima, considerando un valor dado de los factores que no intervinieron en la definición de estratos, por ejemplo, como el potasio en el suelo. Para el factor climático lluvia se usaron valores a las probabilidades de excedencia de 70 y 50 %.

Con el fin de probar la capacidad predictiva de la función de producción obtenida, se consideró de interés compararla con otras obtenidas en el área de estudio, esto es:

$$Y = 467 + 14.6 P \quad (R^2 = 0.79)$$

Donde: Y = rendimiento potencial predicho (kg ha⁻¹), P = precipitación (mm) en el periodo crítico (50 días antes a 30 días después de la floración masculina) (Flores, 1988).

$$Y = 4987 - 4635 D \quad (R^2 = 0.73)$$

Donde: Y = rendimiento potencial predicho (kg ha⁻¹), D = déficit evapotranspirativo (mm) en el periodo crítico (50 días antes a 30 días después de la floración masculina) (Galvis, 1990).

El procedimiento consistió en calcular con las tres funciones de producción, en 30 experimentos de productividad comunes utilizados para estimar las tres funciones, la media y la desviación estándar de las diferencias entre los rendimientos observados y los predichos, considerando con mejor capacidad predictiva a aquella función que tuviese valores menores de ambos estadísticos, a la vez que fuesen valores de una magnitud aceptable.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Función de Producción

La función de producción obtenida es la siguiente:

$$Y = 446.5 + 127.31 k^{0.5} - 3.7140 k + 398.86 (R-40)^{0.25} - 11.475 E^2 + 97.485 S_t + 91.427 S_s - 105.16 S_t (F-70) - 95.658 S_s (F-85) + 281.91 V_1 + 599.16 V_3 - 0.25957 V_1 (F-70)^2 + 30.833 S_t L_1 + 39,992 S_s L_1 + 0.15495 S_t L_1^2 + 14.872 L_2 - 0.031477 L_2^2 + 1640.1 A - 2302.1 B + 282.65 C$$

$$(CME = 474.895; Pr.F = 0.01; R^2 = 0.740)$$

Donde: Y es el rendimiento de grano (kg ha^{-1}); k es el potasio intercambiable del suelo (ppm); R es la profundidad del suelo (cm); E es la pendiente del suelo (%); S_t y S_s son variables auxiliares para tipo de siembra, tempranas y tardías, respectivamente; V_1 es la variedad de maíz híbrido H-30m y V_3 es la variedad de maíz Huamantla (criollo mejorado); F es la fecha de siembra, en días a partir del día 1 de enero; L_1 es la precipitación en el mes después de la siembra (mm); L_2 es la precipitación en el periodo desde 30 días antes hasta 20 días después de la floración masculina (mm); A es una variable auxiliar asociada a cuatro experimentos y parcelas con rendimientos altos, sobre lo cual no se tenía una explicación confiable; B es una variable auxiliar para seis experimentos y parcelas con rendimientos bajos, debido a daño de diversos factores climáticos, sobre los cuales no se tuvo información suficiente confiable; y C, es una variable auxiliar asociada a la profundidad del suelo para profundidades menores que 80 cm.

El ajuste del modelo de la función de producción, correspondiente a un valor de R^2 igual a 0.740, puede considerarse como medio. Entre las posibles causas de esta situación se pueden señalar las siguientes:

- Para algunos experimentos y las parcelas, los factores climáticos se midieron no en el sitio en cuestión sino en la estación meteorológica más cercana, lo cual, además del error que puede conllevar para los factores que quedasen incluidas en el modelo de la función de producción, puede dar lugar a que algún factor climático no quedase incluido en el modelo.

- Se pudo haber excluido algún factor importante de suelo, como por ejemplo, la textura del perfil del suelo, ya que la textura del horizonte superficial que se consideró, presentó variaciones poco importantes

entre suelos y no se asocia necesariamente con el tipo del suelo.

- En algunos experimentos y parcelas se usaron variables auxiliares para explicar rendimientos altos o bajos asociados a causas desconocidas o conocidas pero no cuantificadas satisfactoriamente, y todos ellos, aún con diferente magnitud del efecto, se incluyeron en una misma clase de la variable auxiliar.

De acuerdo con el modelo de la función de producción, las variables que afectaron el rendimiento fueron:

- De suelo: el potasio intercambiable, de manera positiva hasta un máximo de alrededor de 190 ppm y posteriormente negativa; la profundidad, de manera positiva hasta los 80 cm; y, la pendiente, de manera negativa.

- De suelo y clima: el tipo de siembra, en cuanto a: siembras tempranas, de marzo, en suelos de humedad residual a altitudes mayores que 2500 m; siembras intermedias, de abril (hasta el 20 de abril) en suelos de humedad residual a altitudes menores que 2500 m; y, siembras tardías de temporal, de finales de abril y mayo (hasta el 20 de mayo); con mayor rendimiento de las siembras tempranas e intermedias sobre las tardías, pero a su vez un mayor efecto negativo de la fecha de siembra en las primeras.

- De clima: la precipitación en el mes después de la siembra, para las siembras tempranas e intermedias, en suelos con humedad residual, de manera positiva; la precipitación en el periodo desde 30 días antes hasta 20 días después de la floración masculina, de manera positiva; y la presencia de fenómenos climáticos diversos, de manera negativa.

- De manejo: las variedades de maíz híbrido H-30 y Huamantla (criollo mejorado), mismas que rindieron más que las demás variedades, con un efecto negativo de la fecha de siembra para siembras posteriores al 10 de abril para el híbrido H-30; y, la fecha de siembra, dentro de las siembras tempranas e intermedias, de manera negativa.

Algunos aspectos de la función de producción para maíz en la zona de estudio que cabe resaltar, son los siguientes:

- El efecto positivo del potasio intercambiable del suelo, que se relaciona con la presencia de suelos con valores bajos de potasio intercambiable (menores que 100 a 120 ppm), a la vez que para valores altos mayores que 350 a 400 ppm) se observa un efecto negativo.

- El efecto negativo de la fecha de siembra dentro de las siembras tempranas e intermedias, efecto que confirma lo observado gráficamente y que resulta de bastante magnitud, sin que se tenga una explicación clara sobre él, pero que indica que las siembras tempranas no deben extenderse después del 20 de marzo y las siembras intermedias después del 10 de abril, y que si no se alcanza a sembrar antes de estas fechas, se debe esperar el temporal.

- El mayor rendimiento de las variedades de maíz híbrido H-30 y Huamantla, al menos por sobre las variedades criollas y algunas mejoradas, excluyendo variedades mejoradas recientes que no se probaron con suficientes observaciones. En el caso del maíz híbrido H-30, el efecto negativo de la fecha de siembra indica que fechas de siembra posteriores a mediados de abril pueden reducir significativamente el rendimiento.

- El factor climático precipitación quedó incluido en los periodos: primer mes después de la siembra, para las siembras tempranas e intermedias; y, desde 30 días antes hasta 20 días después de la floración masculina para los tres tipos de siembra. Esto difiere de lo encontrado por Velázquez (1989), quién no reporta efecto de la precipitación en el primer mes después de la siembra, a la vez que encontró un efecto de la

precipitación en el periodo desde 30 días antes hasta 30 días después de la floración masculina.

Por otra parte, cabe señalar que la función de producción no incluyó los siguientes factores:

- La textura del horizonte superficial, debido tal vez a que, salvo algunos casos, no muestra variaciones importantes, y probablemente un factor más relacionado con el rendimiento sea la textura del horizonte B del suelo y el tipo de suelo.

- Heladas, definidas por días con temperaturas iguales o menores que 0°C (Grassi, 1983), y días con temperaturas menores que 7°C, según lo señala Velázquez (1989).

Estratificación del Ambiente y Rendimientos Potenciales

Para la estratificación del ambiente, con base en la función de producción, se procedió con los factores que quedaron incluidos en la función de respuesta, a:

- Definir clases, a partir del ámbito de variación del factor y la magnitud de su efecto sobre el rendimiento, considerándose el valor medio de clase, la media aritmética o la mediana, según correspondiese.

- Para los factores precipitación en el mes después de la siembra y en el periodo desde 30 días antes hasta

Cuadro 2. Valores de los factores, usados para definir los estratos de producción.

Factor	Valor	
Profundidad del suelo (cm)	50, 65, > 80	
Pendiente del suelo (%)	2 (clase de 0 a 4) 6 (clase de 4 a 8)	
Fecha de siembra:		
- siembras tempranas	15 de marzo	
- siembras intermedias	5 de abril	
- siembras tardías	25 de abril	
Variedad de maíz	Híbrido H-30 Criollo Huamantla	
Precipitación en el mes después de la siembra (mm):	70 %	50 %
- siembras tempranas	20	30
- siembras intermedias	35	55
- siembras tardías	50	80
Precipitación en el periodo de 30 días antes hasta 20 días después de la floración masculina (mm):	70 %	50 %
- siembras tempranas	160	200
- siembras intermedias	115	160
- siembras tardías	105	145

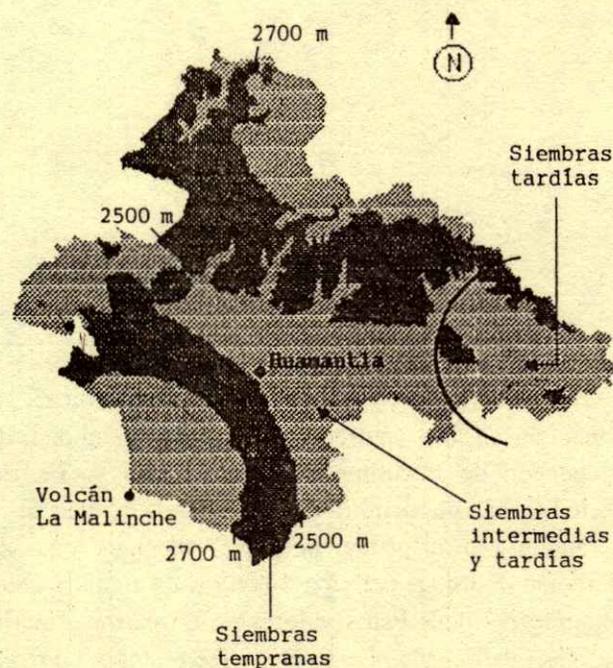


Figura 1. Ubicación de los estratos ambientales en la región oriente del estado de Tlaxcala a nivel de tipos de siembras y altitudes.

Cuadro 3. Potencial productivo de maíz por estratos ambientales en la región oriente del estado de Tlaxcala, para probabilidades de 70 y 50 % de excedencia de precipitación.

Profundidad del suelo cm	Pendiente del suelo %	Fecha de siembra	Variedad	Rendimiento	
				70 %	50 %
				kg.ha ⁻¹	
Siembras tempranas					
> 80	0-4	10-20/3	Criollo	4175	4625
			H-30	4475	4900
			Huamantla	4750	5225
> 80	4-8	10-20/3	Criollo	3800	4250
			H-30	4075	4525
			Huamantla	4400	4850
Siembras intermedias					
> 80	0-4	1-10/4	Criollo	3725	4350
			H-30	3850	4775
			Huamantla	4325	4950
> 80	4-8	1-10/4	Criollo	3350	3975
			H-30	3475	4100
			Huamantla	3950	4575
65	0-4	1-10/4	Criollo	3625	4250
			H-30	3725	4350
			Huamantla	4225	4850
65	4-8	1-10/4	Criollo	3250	3875
			H-30	3375	4000
			Huamantla	3850	4475
Siembras tardías					
> 80	0-4	25/4	Criollo	3625	3900
			H-30	-	-
			Huamantla	4225	4500
> 80	4-8	25/4	Criollo	3250	3525
			H-30	-	-
			Huamantla	3850	4125
65	0-4	25/4	Criollo	3500	3800
			H-30	-	-
			Huamantla	4100	4400
65	4-8	25/4	Criollo	3150	3425
			H-30	-	-
			Huamantla	3750	4025
50	0-4	25/4	Criollo	3325	3600
			H-30	-	-
			Huamantla	3925	4200
50	4-8	25/4	Criollo	2950	3250
			H-30	-	-
			Huamantla	3550	3850

20 días después de la floración masculina, se consideraron los valores para una probabilidad de excedencia de precipitación de 70 % y 50 %, a partir de las fechas de siembra definidas para los tres tipos de siembra en el primer periodo, y de las fechas de floración definidas para los tres tipos de siembra en el segundo periodo. Estos valores se estimaron a partir de los datos históricos de precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio, haciendo uso del paquete estadístico SICA (Medina y Ruíz, 1992).

- El potasio del suelo no se consideró en la definición de estratos, debido a que es un factor de tipo modificable, y se definió con un valor de 150 ppm.

Con base en las consideraciones anteriores, los valores de los factores, usados para definir los estratos de producción son los que se presentan en el Cuadro 2.

Con los valores de los factores se definieron los estratos de producción, para los cuales, mediante la función de producción y haciendo uso del programa estadístico SAS (SAS Institute, Inc., 1991), se estimaron los rendimientos potenciales de maíz.

Cuadro 4. Media y desviación estándar de las diferencias entre los rendimientos observados y los rendimientos predichos por las funciones de producción, y rendimientos medios observados y predichos.

Función de producción	Media	Desviación estándar	Rendimiento medio	
			observado	predicho
----- kg ha ⁻¹ -----				
Flores (1988)	1376	±1222	5458	4082
Galvis (1990)	919	±1675	5458	4487
Obtenida	-13	± 534	4501	4513

En el Cuadro 3 se presentan los estratos de producción definidos, así como los rendimientos potenciales para una probabilidad de excedencia de precipitación de 70 % y 50 %, respectivamente, a la vez que en la Figura 1 se presenta la ubicación de los estratos a nivel de tipos de siembras y altitud.

Capacidad Predictiva de la Función de Producción

La capacidad predictiva de la función se estimó en sí y en relación con otras funciones estimadas para el área de estudio (Flores, 1988; Galvis, 1990), con base en 30 experimentos de productividad comunes a ellas.

En el Cuadro 4 se presentan los valores de la media y la desviación estándar de las diferencias entre los rendimientos observados y los rendimientos predichos por las funciones de producción, para los 30 experimentos considerados.

De acuerdo con los resultados del Cuadro 4, la función de producción obtenida fue la que dio los menores valores de la media y desviación estándar de las diferencias entre los rendimientos observados y los rendimientos predichos por ella, y siendo ellos de una magnitud aceptable, y es dado concluir que además de ser la mejor función es una función aceptable.

Se puede suponer que la causa fundamental de este resultado es que la función de producción obtenida incluye en su modelo factores de suelo, clima y manejo, que afectan los rendimientos en el área de estudio, mismos que no fueron considerados en las funciones de producción de Flores (1988) y Galvis (1990), lo cual, además, es un indicador de la importancia de considerar todos los factores que afectan al rendimiento en la estimación de una función de producción.

CONCLUSIONES

El procedimiento de estratificación del ambiente, para definir estratos de potencial productivo del maíz en la región oriente del estado de Tlaxcala, con fines

de generación y transferencia de tecnología, basado en una función de producción que considera los factores de suelo, clima y manejo que afectan el rendimiento, se consideró satisfactorio.

LITERATURA CITADA

- Aveldaño S., R. 1979. El agrosistema, su definición y relación con la precisión en la generación de tecnología en agricultura de temporal. Evaluación de cuatro métodos para definir agrosistemas en los llanos de Huamantla, Tlax. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Flores M., P.J. 1988. Determinación de dosis de fertilización nitrogenada para maíz y cebada en el estado de Tlaxcala mediante un modelo simplificado. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Galvis S., A. 1990. Validación de las normas de fertilización de N y P estimadas con un modelo simplificado para maíz, con las dosis obtenidas en la experimentación de campo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Grassi C., B.A. 1983. Riesgo de primeras y últimas heladas en Puebla y Tlaxcala respecto a los cultivos básicos. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Iriarte A., C.R. 1981. Uso de información cartográfica como marco de referencia para la generación de tecnología de producción para maíz de temporal en la región de Huamantla, Tlaxcala. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Légorreta, P.F. y A. María R. 1994. Determinación del potencial productivo de especies vegetales en el estado de Tlaxcala. In: Memoria de Primer Encuentro Estatal de Ciencia y Tecnología del Sector Agropecuario y Forestal de Tlaxcala. INIFAP-AT-DGTA-UACH-PIAFT. Tlaxcala, Tlaxcala.
- Medina G., G. y J.A. Ruiz C. 1992. SICA sistema de información para caracterizaciones agroclimáticas. Versión 2. Documentación y manual de usuario. Campo Experimental Zacatecas. INIFAP-SARH, Zacatecas, Zacatecas.
- Rebolledo R., H.H. 1991. Metodología para estimar funciones generalizadas de producción, con fines de generar recomendaciones, considerando factores de suelo, clima, manejo y el riesgo climático. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- SAS Institute Inc. 1991. SAS System for regression. Second edition. Cary, N.C., USA.
- Velasco R., F. 1981. Generación de tecnología para el cultivo de maíz en el Valle de Huamantla. Utilización del método gráfico-estadístico para la interpretación económica en experimentos conducidos con la matriz Plan Puebla. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Velázquez G., J.J. 1989. Evaluación del periodo de crecimiento climático y su relación con la producción de maíz (*Zea mays* L.) en Valles Altos de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Villalpando I., J.F. 1975. Desarrollo de un método para obtener ecuaciones empíricas generalizadas del rendimiento en una región agrícola, para uso de diagnóstico. Evaluación de la capacidad de diagnóstico de varios métodos, en una región del

- estado de Tlaxcala en que se cultiva maíz bajo temporal. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Volke H., V. 1990. Metodología estadística y económica para la generación de tecnología en la agricultura. Cuaderno de Edafología 16. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México.
- Volke H., V. 1996. Notas del curso Aplicación del Análisis de Regresión en la Investigación y Generación de Tecnología Agrícolas. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

MATERIA ORGANICA Y CARACTERIZACION DE SUELOS EN PROCESO DE RECUPERACION CON COBERTURAS VEGETATIVAS EN ZONAS TEMPLADAS DE MEXICO

Organic Matter and Soil Characterization during Restoration Processes with Cover Crops on Temperate Areas of Mexico

Pedro Betancourt Yanez¹, Jesús González Rios², Benjamín Figueroa Sandoval²,
Félix González Cossio³

RESUMEN

Este trabajo se desarrolló con el propósito de evaluar el efecto de la materia orgánica en el proceso de recuperación de suelos degradados, básicamente aportada por el pasto rhodes (*Chloris gayana* cv Bell). Se realizó una caracterización de las condiciones físicas y químicas del suelo después de cuatro años de establecido el pasto y se midió el potencial hidrológico del suelo a través de pruebas de infiltración y escurrimiento superficial, así como la producción de sedimentos en lotes de 7 m², usando un simulador de lluvias. Los datos fueron analizados mediante técnicas de estadística multivariada. Se observó que las variables hidrológicas fueron afectadas por la cobertura, la materia orgánica y la pendiente del terreno, y la mayor producción de sedimentos se presentó en lotes de 11 % de pendiente. Al realizar el análisis se encontró que el mayor porcentaje de correlación se presentó entre densidad de raíces con estabilidad de agregados con una correlación significativa ($P < 0.05$). Otras como materia orgánica con nitrógeno total, cobertura de pasto con estabilidad de agregados y cobertura de pasto con densidad de raíces presentaron correlación positiva, siendo no significativa ($P > 0.05$). La distribución de agregados presentó una correlación negativa con la estabilidad de agregados y resultó no significativa ($P > 0.05$). La materia orgánica presentó correlaciones positivas con el contenido de nitrógeno total del suelo y con

la estabilidad de agregados respectivamente, pero estos valores fueron no significativos ($P > 0.05$). La cobertura de pasto rhodes y la materia orgánica producen mejoras en las condiciones físicas en suelos degradados, principalmente en su estabilidad estructural.

Palabras clave: Erosión, estadística multivariada, pasto rhodes, propiedades físicas.

SUMMARY

The present work was carried out to evaluate the effect of organic matter contributed mainly by rhodes grass (*Chloris gayana* cv Bell) in the process of degraded soils restoration. A characterization, after four years of the grass establishment, of the physical and chemical conditions of the soil was carried out and its hydrologic potential was measured through infiltration and run off tests and also by sediment production in 7 m² plots, using a rain simulator. Data were analyzed through multivariate statistical analysis. Hydrologic variables were affected by cover crop, organic matter, and terrain slope, and the highest sediment production was found in the 11 % slope plot. Statistical analysis showed that the highest correlation existed between root density and stability of aggregates ($P < 0.05$). Correlation between organic matter and total nitrogen, grass cover and aggregate stability and grass cover and root density were positive but not no significant ($P > 0.05$). Correlations between aggregates distribution was negative and not significant ($P > 0.05$). Correlation between organic matter and total soil nitrogen content and aggregates' stability were positive but these values were not significant ($P > 0.05$). The cover and organic matter of rhodes grass improves physical conditions of degraded soil, mainly in its structural stability.

¹Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Fonaiap-Lara, 592 Barquisimeto, estado Lara, Venezuela.

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

³Instituto de Socioeconomía Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México.

Recibido: Noviembre de 1998.

Aceptado: Abril de 1999.

Index words: Erosion, multivariate statistical, rhodes grass, physical properties.

INTRODUCCION

En México, 88 % de la superficie total es de relieve ondulado (Alcalá, 1996), de tal manera que se puede considerar como un territorio eminentemente pecuario y forestal; sin embargo, la necesidad de satisfacer las demandas de una población con un alto índice de crecimiento ha conducido a la degradación de los recursos naturales, debido principalmente al uso de tecnologías inadecuadas en la producción de alimentos. Los terrenos de laderas utilizados para la producción de cultivos, sobre todo los de pendientes pronunciadas, generalmente terminan fuertemente deteriorados por la acción del hombre en el afán de obtener satisfactores. Muchos investigadores se han dedicado a proponer prácticas y a establecer métodos de conservación de suelos con la finalidad de reducir el deterioro de las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos, ya que han demostrado que las áreas de mayor potencial de erosión hídrica son aquellas que se dedican a la agricultura de temporal en laderas y principalmente bajo monocultivos (González, 1984). Los estudios experimentales indican que los suelos están más expuestos a los agentes erosivos cuando los campos están sin vegetación, y los más afectados son los deficientes en materia orgánica, por lo que es preciso, entonces, recurrir a una cobertura permanente del suelo, con la finalidad de propiciar la incorporación de materia orgánica a través de residuos vegetales (tallos, hojas y raíces). Las coberturas vegetativas al aportar materia orgánica, ésta después de su incorporación produce diferentes nutrientes para las plantas, que son aprovechados cuando las condiciones son favorables. Así mismo, reduce la erosión hídrica principalmente a través del efecto de protección al suelo contra el impacto de las gotas de lluvia y en la reducción de la velocidad del escurrimiento superficial (SARH, 1991). Al respecto, Lang y McCaffrey (1984) observaron que al incrementar la cantidad de suelo cubierto con pastos se redujo el número de eventos erosivos y en consecuencia el detrimento del suelo. Finalmente, el objetivo de este trabajo fue medir el potencial hidrológico del suelo y la materia orgánica aportada por una pradera de pasto rhodes (*Chloris gayana* cv Bell) establecido como cobertura de protección en un suelo degradado, y determinar la

importancia de la materia orgánica en la fertilidad natural del suelo.

MATERIALES Y METODOS

Este estudio se realizó durante 1996 en una pradera establecida en 1992 de pasto rhodes (*Chloris gayana* cv. Bell) en las áreas temporales del ejido de San Jerónimo, ubicado a 29 km al noreste de Chapingo, Estado de México, cuya latitud, longitud y altitud son 19°29' norte, 98°45' oeste y 2250 m, respectivamente; los suelos son poco profundos, de origen volcánico con pobre infiltración y baja capacidad para retener humedad (González, 1994), los cuales están en proceso de recuperación con coberturas vegetativas con el pasto mencionado. Se realizó un levantamiento topográfico para delimitar el área donde se realizó la investigación y para determinar su superficie. Posteriormente por altimetría se determinaron los diferentes pendientes del terreno. Se ubicaron dos parcelas de terreno con 4 y 11 % de pendiente donde, utilizando el simulador de lluvia en lotes de escurrimiento de 7 m², se realizaron pruebas de infiltración, escurrimiento y producción de sedimentos. Estos lotes de forma rectangular (7x1 m) fueron orientados en el sentido de la pendiente respectiva (Figura 1). El simulador utilizado fue el portátil programable tipo III, desarrollado por la Universidad de Purdue en West Lafayette, Indiana, USA. Se trabajó con intensidades de lluvia de 24, 38 y 57 mm h⁻¹, para lo cual el simulador fue calibrado previamente resultando la siguiente ecuación:

$$Y = 0.4712X.$$

Donde:

$$Y = \text{Intensidad (mm h}^{-1}\text{)}$$

$$X = \text{Oscilaciones por minuto.}$$

En los lotes de 7 m² se realizaron pruebas de velocidad de escurrimiento en los primeros 5 m para cada intensidad de lluvia, utilizando un colorante, a intervalos de cinco minutos después de iniciado el escurrimiento. La infiltración se determinó por diferencia utilizando la lluvia aplicada y el escurrimiento. La producción de sedimentos se determinó en los lotes de 7 m² por el procedimiento siguiente: Luego de empezar el escurrimiento superficial se tomaron muestras cada cinco minutos en un recipiente de un litro, hasta que el tiempo de llenado se hizo constante.

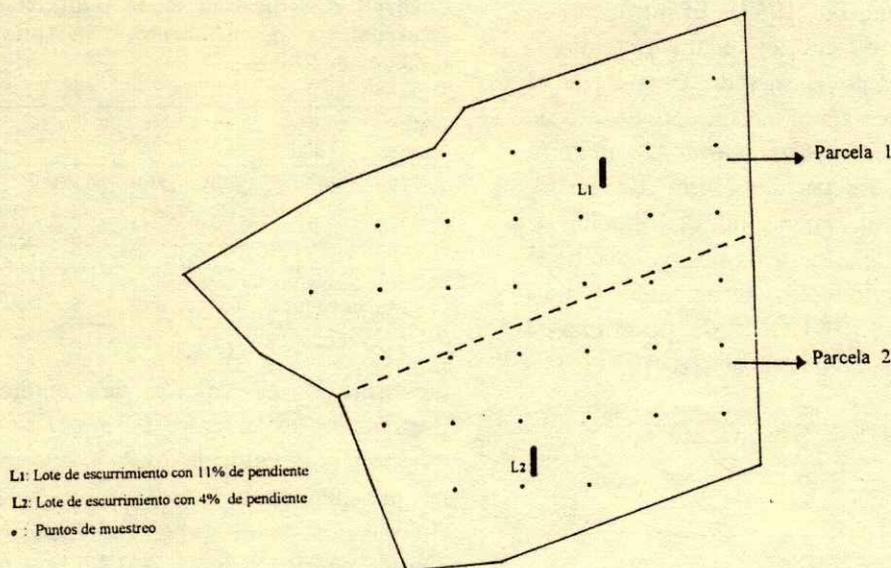


Figura 1. Esquema general del área experimental.

Estas muestras se llevaron al laboratorio donde a cada uno se le agregó sulfato doble de potasio y aluminio al 10 % para precipitar los sólidos, se eliminó el sobrenadante y en un recipiente de vidrio se colocaron los sólidos para llevarlos a la estufa a 105 °C durante 48 horas, determinando en seguida el peso seco de cada muestra. Posteriormente, sobre el área total del experimento se ubicaron 36 puntos cada 12 m en una cuadrícula donde se determinó cobertura del pasto, materia orgánica, densidad de raíces, humedad gravimétrica y densidad aparente. Para cuantificar la cobertura del pasto fue utilizado un marco metálico cuadrado de 35 x 35 cm y con una regla graduada se midieron las áreas descubiertas mayores que 15 cm² lográndose de esta manera la cobertura de cada punto después de hacer la diferencia del área total (González, 1984). Para el contenido de materia orgánica se tomaron cuatro muestras hasta 20 cm de profundidad mediante una estructura metálica de volumen conocido diseñada para tomar muestras de capas de 5 cm de espesor. Las muestras fueron llevadas al laboratorio para secado y la determinación se realizó por el método propuesto por Walkley y Black (Gandoy, 1991). La misma muestra se utilizó para determinar la densidad de raíces y para ello se colocaron en un tamiz y mediante la aplicación de agua a presión se separó el suelo de las raíces. Estas se lavaron y se extendieron sobre papel absorbente y se llevaron a la estufa a 66 °C para su secado hasta peso constante,

determinando luego su peso por unidad de volumen. Para la densidad aparente se utilizó una barrena con cilindro de volumen conocido y en cada punto se tomaron muestras a dos profundidades (5 y 10 cm), y en las muestras, después de secarlas a 105 °C, se hizo la determinación por el método de cilindros de volumen conocido (Gandoy, 1991). También con la misma barrena y a las mismas profundidades se determinó humedad gravimétrica con base en peso de suelo seco (Gandoy, 1991).

De las 36 muestras se seleccionaron 15 a las cuales se le hicieron determinaciones físicas y químicas a nivel de laboratorio. Las 15 muestras seleccionadas fueron las más cercanas a cada lote de escurrimiento, ocho muestras para el lote 1 y siete para el lote 2. La textura se realizó por el método de hidrómetro de Bouyoucos (Gandoy, 1991), la distribución de agregados por tamizado en seco propuesto por Yoder (1936), la estabilidad de agregados por el método de tamizado en húmedo (Yoder, 1936), utilizando tamices de 3.5, 2.25, 1.7, 0.6, 0.25, y 0.15 mm de diámetro. El índice de agregación del suelo se determinó a partir del diámetro ponderado medio, que permite interpretar la distribución y estabilidad estructural del suelo (Montenegro y Malagon, 1990).

La conductividad eléctrica se determinó con un puente de conductividad marca Corning en una relación 1:5 en el extracto de saturación (Richards, 1994). El pH mediante el potenciómetro con una

relación 1:2 en agua (Jackson, 1964). El nitrógeno se obtuvo por el método de microkjeldahl (Bremmer, 1965). El fósforo mediante el método Bray-P1 y el potasio intercambiable por flamometría con acetato de amonio (Chapman, 1965). Las variables materia orgánica, densidad de raíces, cobertura de pasto, conductividad eléctrica, nitrógeno total, distribución de agregados y estabilidad de agregados fueron sometidos a un análisis de componentes principales (ACP) usando el procedimiento PRINCOMP del programa de computación Statistical Analysis System (SAS).

RESULTADOS Y DISCUSION

Variables Hidrológicas

Las pruebas de infiltración se realizaron en dos lotes de escurrimientos: uno con pendiente de 4 % y otro con pendiente de 11 %. La intensidad de infiltración se clasificó de acuerdo con el criterio de Ortiz y Ortiz (1990) y los resultados se presentan en el Cuadro 1. La infiltración se clasificó como rápida en ambos lotes y corresponde según el criterio citado, con infiltraciones mayores que 2.5 cm h⁻¹, que agrupa a los suelos arenosos y migajones limosos de buena agregación. Según Alcalá (1996), los factores que influyen en la infiltración total del agua son el alto porcentaje de cubierta vegetal y de materia orgánica en el suelo. Se aplicaron tres intensidades de lluvia (24, 38 y 57 mm h⁻¹) con el simulador, observándose escurrimiento en ambos lotes únicamente para la intensidad de 57 mm h⁻¹. El escurrimiento para el lote de 4 % de pendiente fue mayor que para el lote de 11 % (Cuadro 2). A pesar de que el bloque de menor pendiente fue donde se presentó mayor escurrimiento, el bloque con 11 % presentó los valores más altos en producción de sedimentos, los cuales oscilan entre 9.8 hasta 13.9 kg ha⁻¹ y en el sitio con pendiente de 4 % dichas pérdidas de suelo variaron entre 7.7 y 11.8 kg ha⁻¹ (Cuadro 2). La diferencia en la producción de sedimentos en los lotes se debió principalmente a la susceptibilidad del suelo a ser erosionado y al efecto de la pendiente.

Determinaciones Químicas

Según los datos presentados en el Cuadro 3, se puede ver que el pH en el suelo va de ácido a ligeramente ácido con un rango de 5.7 a 6.8. La

Cuadro 1. Clasificación de la infiltración en dos lotes de escurrimiento de pendientes diferentes con una lluvia simulada de 57 mm h⁻¹.

Pen- diente	Intensi- dad	Li	Tiempo	li	Clase textural	Clasifi- cación
%	mm h ⁻¹	mm	min	cm h ⁻¹		
4	57	55.30	60	5.53	MAa [†]	Rápida
11	57	45.74	49	5.57	Maa	Rápida

[†]MAa = Migajon arcillo arenoso.

Li = Lámina infiltrada.

li = Intensidad de infiltración.

mayoría de los valores de conductividad eléctrica presentados están entre 0.33 y 1.64 dS m⁻¹, presentando un solo valor de 2.07; lo que indica que el suelo no presenta problemas para el desarrollo del pasto rhodes. Los suelos son considerados ricos en nitrógeno cuando contienen más de 0.22 % y pobres cuando su contenido está por debajo de 0.032 % de nitrógeno total (Vázquez, 1997). Según los datos observados, este suelo es de medianamente pobre a mediano en el contenido de nitrógeno total, presentando valores desde 0.05 % hasta 0.16 %. Los contenidos de fósforo en el suelo en general son de medios a altos (11 a 30 ppm). Las cantidades presentes de potasio en el suelo bajo estudio están de 0.27 hasta 0.97 cmol kg⁻¹, los cuales son considerados como valores de mediano a altos (Etchevers *et al.*, 1971) (Cuadro 3).

Determinaciones Físicas

El suelo en estudio presenta valores de diámetro medio ponderado en seco de 1.4 hasta 4.3 mm, y de acuerdo con estos valores, el suelo es considerado como ligeramente estable hasta estable (Montenegro y Malagon, 1990) (Cuadro 3). El diámetro medio ponderado en húmedo del suelo oscila entre 1.3 y 3.2 mm, estando la mayoría de sus valores por encima de 1.5 mm; por lo cual se considera como moderadamente estable (Cuadro 3).

Respecto a la densidad aparente se observan valores que van desde 1.06 hasta 1.56 g cm⁻³ en los primeros 5 cm de profundidad, y de 1.17 hasta 1.64 g cm⁻³ hasta los 10 cm de profundidad (Cuadro 4). Los valores indican que el suelo se hace más duro con la profundidad y que el espacio poroso del suelo está entre 41 y 60 % en la primera capa y se reduce hasta 38 % en la segunda capa. Estos valores son los extremos de los datos presentados, sin embargo, a nivel

Cuadro 2. Registros de las variables hidrológicas en suelo con diferentes pendientes con una lluvia simulada de 57 mm h⁻¹.**Pendiente 4 %**

Tiempos		Gastos			Velocidades			Producción de sedimentos			
tt	tobs	DL	Q	Tr	Ve	Vi	Vea	Ps	Ps	As	As
min		s	L s ⁻¹	s	m s ⁻¹	L	L	g	kg	kg L ⁻¹	kg ha ⁻¹
25	25	70	0.014	74	0.068	21.43	21.43	0.593	0.0006	0.0127	18.1531
30	5	33	0.030	36	0.139	9.09	30.52	0.738	0.0007	0.0067	9.5844
35	5	30	0.033	37	0.135	10.00	40.52	0.628	0.0006	0.0063	8.9714
40	5	28	0.036	38	0.132	10.71	51.24	0.504	0.0005	0.0054	7.7143
45	5	26	0.038	37	0.135	11.54	62.77	0.618	0.0006	0.0071	10.1868
50	5	24	0.042	36	0.139	12.50	75.27	0.664	0.0007	0.0083	11.8571
55	5	24	0.042	37	0.135	12.50	87.77	0.646	0.0006	0.0081	11.5357
60	5	24	0.042	36	0.139	12.50	100.27	0.579	0.0006	0.0072	10.3393

Pendiente 11 %

Tiempos		Gastos			Velocidades			Producción de sedimentos			
tt	tobs	DL	Q	Tr	Ve	Vi	Vea	Ps	Ps	As	As
min		s	L s ⁻¹	s	m s ⁻¹	L	L	g	kg	kg L ⁻¹	kg ha ⁻¹
19	19	80	0.013	93	0.054	12.0	12.0	2.65	0.0027	0.0318	45.4286
24	5	65	0.015	70	0.071	4.5	16.5	1.519	0.0015	0.0068	
29	5	52	0.019	65	0.077	5.7	22.2	1.711	0.0017	0.0098	13.9324
34	5	49	0.020	54	0.093	6.0	28.2	1.437	0.0014	0.0086	2.3171
39	5	46	0.022	53	0.094	6.6	34.8	1.384	0.0014	0.0091	3.0491
44	5	47	0.021	54	0.093	6.3	41.1	1.242	0.0012	0.0076	1.1780
49	5	45	0.022	53	0.094	6.6	47.7	1.432	0.0014	0.0095	13.5017

tt = Tiempo transcurrido durante la corrida
 Tobs = Intervalo de tiempo observado para cada muestreo
 DL = Duración del llenado del bote en cada intervalo de muestreo
 Q = Gasto
 tr = Tiempo de recorrido del agua en 5 metros durante la corrida

Ve = Velocidad de escurrimiento
 Vi = Volumen escurrido en el instante de muestreo
 Vea = Volumen escurrido acumulado
 Ps = Peso de los sedimentos
 As = Producción de sedimentos

de campo se pudo constatar la dureza del suelo en estado seco. Los contenidos de humedad gravimétrica determinados, como se observa en el Cuadro 4 van desde 8.15 % hasta 20.34 % en los primeros 5 cm de profundidad y hasta 10 cm la humedad del suelo varió entre 8.97 % y 20.46 %. Durante el desarrollo de la presente investigación las precipitaciones para mayo, junio y julio fueron muy bajas 12.07, 85.30 y 87.00 mm, respectivamente, por lo que la humedad del suelo fue un reflejo de esta condición. Los datos obtenidos de la evaluación de la cobertura de pasto muestran que en algunos puntos el pasto llegó a cubrir 100 % del área muestreada, pero en otros sitios la cobertura estuvo por debajo de 50 %, sin embargo, 80 % de los puntos muestreados presentaron porcentajes de cobertura por encima de 70 % (Cuadro 5).

La importancia de la materia orgánica en el suelo está entre otras dada por su influencia en la estructura del suelo, en el suministro de elementos nutritivos, en

la relación carbono/nitrógeno y en el aporte de alimento para los microorganismos, es decir, la materia orgánica influye significativamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Ortiz y Ortiz, 1990). De acuerdo con los datos del Cuadro 6 se observa que en los primeros 5 cm de profundidad, el suelo presenta contenidos de materia orgánica que fluctúan entre 0.68 % y 3.15 % con un promedio de 1.73 %. Según el promedio obtenido, el suelo puede ser considerado como medianamente pobre en materia orgánica. Cuando aumenta la profundidad el suelo se hace más deficiente en materia orgánica, observándose que a 10 y 15 cm el contenido promedio es de 1.42 % y 1.31 %, respectivamente, los cuales clasifican al suelo como medianamente pobre. A 20 cm el contenido promedio está alrededor de 1.16 %, con valores mínimo de 0.54 % y máximo de 2.23 % lo que lo clasifica como un suelo pobre en materia orgánica a esa profundidad (Vázquez, 1997).

Cuadro 3. Resultados de las determinaciones físicas y químicas del suelo.

Muestra	pH	CE	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Textura	Dist.agregados DPM	Est.agregados DPM
		dS m ⁻¹	%	ppm	cmol kg ⁻¹		----- mm -----	
1	5.7	1.64	0.08	29	0.53	MAa	2.0	1.6
2	6.1	0.33	0.08	7	0.41	Ma	3.1	1.3
3	6.3	0.55	0.09	9	0.72	MAa	4.3	2.0
4	6.2	0.50	0.05	49	0.65	F	2.2	3.0
5	5.9	0.74	0.05	6	0.46	MAa	2.6	2.0
6	6.6	1.36	0.11	64	0.95	F	1.8	3.2
7	5.8	0.44	0.08	11	0.62	MAa	1.7	2.9
8	6.2	0.36	0.11	11	0.57	MAa	3.4	1.9
9	5.8	1.42	0.07	11	0.54	MAa	2.3	2.0
10	5.8	2.07	0.09	32	0.97	MAa	3.6	2.8
11	6.1	0.65	0.10	16	0.57	F	1.4	3.0
12	6.2	0.38	0.16	11	0.70	MAa	2.2	2.4
13	6.8	0.34	0.11	1	0.27	MAa	3.0	1.7
14	6.7	1.31	0.09	23	0.82	MAa	3.0	2.1
15	6.1	0.53	0.11	21	0.70	MAa	3.1	2.4

MAa = Migajón arcilloso arenoso

CE = Conductividad eléctrica

Ma = Migajón arenoso

DPM = Diámetro ponderado medio

F = Franco

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El objetivo del ACP, como herramienta estadística, es reducir la dimensionalidad de un problema y con esa finalidad se aplicó en este caso particular. Las variables materia orgánica (MO), densidad de raíces (Ra), conductividad eléctrica (CE), nitrógeno total (Ni), distribución de agregados (DA), estabilidad de agregados (EA) y cobertura de pasto (CP) fueron sometidas a un análisis de componentes principales (ACP) usando el procedimiento PRINCOMP de SAS.

Los resultados obtenidos indican que existe poca correlación entre las variables, y que el mayor porcentaje de correlación se presentó entre densidad de raíces con estabilidad de agregados, las cuales fueron las únicas variables con una correlación significativa ($P < 0.05$). Otras como materia orgánica y nitrógeno total, cobertura de pasto y estabilidad de agregados y cobertura de pasto con densidad de raíces presentaron correlación positiva pero por debajo de 50 %, siendo no significativa ($P > 0.05$). La distribución de agregados presentó una correlación negativa con la estabilidad de agregados de 46 %, y resultó no significativa ($P > 0.05$). La materia orgánica presentó correlaciones positivas de 45 y 17 % con el contenido de nitrógeno total del suelo y con la estabilidad de agregados, respectivamente, pero estos valores fueron no significativos ($P > 0.05$) (Cuadro 7a). El primer componente principal sólo explica 29 % de la

variación, mientras que los cuatro primeros explican 82 % de la variación total, de un total de siete componentes (Cuadro 7b). En el Cuadro 7c se presentan las correlaciones observadas para las variables consideradas en cada componente. Para el primer componente las variables que tienen mayor contribución son la estabilidad de agregados (62 %), la densidad de raíces (50 %), la cobertura del pasto (42 %) siendo su correlación positiva y la distribución de agregados (42 %) con correlación negativa. El segundo componente está definido por el nitrógeno total (71 %) y la materia orgánica (65 %), con correlación positiva. El tercer componente está definido por la conductividad eléctrica (81 %) de forma positiva. En el cuarto componente los mayores aportes lo hacen la distribución de agregados (61 %) y la densidad de raíces (60 %) con correlación positiva. En el quinto componente el mayor aporte lo hace la cobertura de pasto (73 %) y la distribución de los agregados (54 %) en correlación positiva.

Se puede decir que la razón de realizar el ACP fue determinar el grado de correlación entre las variables, específicamente la influencia de la materia orgánica sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. De manera que se puede afirmar por los resultados obtenidos que la materia orgánica presentó correlaciones positivas con el contenido de nitrógeno y estabilidad de agregados pero no fue significativa ($P > 0.05$), indicando que la materia orgánica, en este

Cuadro 4. Valores de densidad aparente (Da) y humedad gravimétrica del suelo a dos profundidades.

Punto	Profundidad	Da	Humedad	Profundidad	Da	Humedad
	cm	g cm ⁻³	%	cm	g cm ⁻³	%
1	5	1.42	8.16	10	1.46	10.42
2	5	1.43	9.54	10	1.64	12.13
3	5	1.37	10.07	10	1.28	9.69
4	5	1.43	13.76	10	1.55	13.22
5	5	1.24	12.73	10	1.17	10.54
6	5	1.31	11.31	10	1.42	8.97
7	5	1.24	14.90	10	1.38	14.47
8	5	1.41	12.63	10	1.43	9.53
9	5	1.44	13.54	10	1.48	12.87
10	5	1.37	16.59	10	1.35	17.47
11	5	1.39	16.45	10	1.35	15.43
12	5	1.36	15.16	10	1.32	17.40
13	5	1.41	14.68	10	1.40	13.38
14	5	1.34	14.00	10	1.39	14.72
15	5	1.33	12.76	10	1.27	11.59
16	5	1.42	10.64	10	1.30	11.46
17	5	1.41	14.80	10	1.30	11.10
18	5	1.28	16.57	10	1.44	12.59
19	5	1.29	14.30	10	1.38	14.17
20	5	1.30	16.56	10	1.47	16.45
21	5	1.24	17.62	10	1.36	18.28
22	5	1.48	18.06	10	1.46	18.16
23	5	1.53	16.15	10	1.52	17.20
24	5	1.55	16.18	10	1.50	15.24
25	5	1.34	17.63	10	1.45	15.56
26	5	1.45	12.99	10	1.49	13.25
27	5	1.39	17.94	10	1.28	17.79
28	5	1.52	17.17	10	1.48	17.76
29	5	1.39	17.05	10	1.48	16.94
30	5	1.56	20.34	10	1.56	20.46
31	5	1.31	13.22	10	1.46	13.36
32	5	1.37	14.08	10	1.40	14.23
33	5	1.17	13.47	10	1.43	12.88
34	5	1.07	13.06	10	1.31	14.10
35	5	1.44	15.19	10	1.57	16.05
36	5	1.44	12.63	10	1.33	13.22

caso, ha contribuido poco a la fertilidad natural del suelo.

Según los resultados de este trabajo, se puede decir que la diferencia que se presentó en la intensidad de infiltración en los dos lotes posiblemente se debió en el lote de 4 % de pendiente, se hicieron varios intentos antes de iniciar la corrida definitiva para hacer las mediciones. Esto contribuyó a un mayor humedecimiento del suelo y, en consecuencia, la infiltración fue menor. Asimismo los coeficientes de infiltración de cada lote fueron afectados por las razones previamente expuestas, presentándose coeficientes mayores en el lote con 11 % de pendiente. Estos resultados son contrastantes con los reportados por Holly (1980), quién encontró que en igualdad de condiciones del medio ambiente, conforme se incrementa el grado de la pendiente el agua fluye más rápido y en consecuencia la infiltración del agua en el suelo es menor. El

Cuadro 5. Porcentaje de cobertura del pasto rhodes (*Chloris gayana* cv Bell).

Punto	SD	Cobertura	Cobertura
	cm		%
1	0	2000	100.00
2	0	2000	100.00
3	110	1890	94.50
4	26	1944	97.20
5	0	2000	100.00
6	0	2000	100.00
7	430	1570	78.50
8	204	1796	89.80
9	904	1096	54.80
10	0	2000	100.00
11	0	2000	100.00
12	310	1690	84.50
13	686	1314	65.70
14	232	1768	88.40
15	77	1923	96.15
16	0	2000	100.00
17	155	1845	92.25
18	331	1669	83.45
19	91	1909	95.45
20	0	2000	100.00
21	505	1495	74.75
22	720	1280	64.00
23	150	1850	92.50
24	0	2000	100.00
25	169	1831	91.55
26	220	1780	89.00
27	0	2000	100.00
28	384	1616	80.80
29	96	1904	95.20
30	780	1220	61.00
31	1037	963	48.15
32	448	1552	77.60
33	861	1139	56.95
34	439	1561	78.05
35	501	1499	74.95
36	1015	985	49.25

SD = Suelo desnudo.

escurrimiento para el lote de 4 % de pendiente fue mayor que para el lote de 11 %, debido posiblemente a que el lote de menor pendiente tenía mayor humedad porque recibió agua durante la calibración del simulador y el suelo se humedeció pronto por lo que el escurrimiento se presentó más abundante que en el lote de mayor pendiente. Sin embargo, el escurrimiento se inició y se estabilizó en menos tiempo en el lote de mayor pendiente. La producción de sedimentos fue mayor en el lote con mayor pendiente lo que se debió principalmente a la susceptibilidad del suelo a ser erosionado y a las diferentes pendientes, ya que a mayor pendiente el arrastre de suelo aumenta. Estas observaciones coinciden con lo reportado por Figueroa *et al.* (1991), quienes indican que la erosión aumenta conforme aumenta la inclinación y longitud de la pendiente como resultado de los aumentos en velocidad y volumen del escurrimiento superficial cuando no hay

Cuadro 6. Porcentajes de materia orgánica a diferentes profundidades de un suelo cubierto de pasto rhodes en San Jerónimo, estado de México.

Punto	Profundidades			
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	1.52	1.09	1.09	0.96
2	1.52	1.52	1.39	0.82
3	1.64	1.09	0.94	0.82
4	1.61	1.50	1.37	1.21
5	2.19	1.26	1.64	1.23
6	2.19	1.26	1.78	1.14
7	2.15	1.50	1.26	0.88
8	1.64	1.50	1.23	1.23
9	1.21	1.34	0.94	0.80
10	1.34	0.94	0.68	0.94
11	1.23	0.82	0.80	0.55
12	1.23	0.96	0.67	0.54
13	0.68	0.88	0.82	0.82
14	1.78	1.01	1.01	0.82
15	1.52	0.55	0.82	0.82
16	1.54	0.98	1.12	0.98
17	1.95	1.26	1.12	1.12
18	1.54	1.40	1.26	1.12
19	1.95	1.68	1.68	1.40
20	2.37	1.68	1.81	1.54
21	2.09	2.79	2.09	2.23
22	2.09	2.09	1.68	1.54
23	3.15	2.65	1.68	1.54
24	1.68	1.58	0.98	0.98
25	1.68	1.97	1.71	1.84
26	3.15	1.58	1.58	1.71
27	2.23	1.97	1.58	1.31
28	1.71	1.58	1.84	1.58
29	2.10	2.23	2.36	1.97
30	2.63	1.84	1.71	1.45
31	1.45	0.66	1.45	1.58
32	1.31	1.31	0.79	0.66
33	1.71	1.61	1.21	1.07
34	1.21	0.94	0.94	0.94
35	3.08	0.94	1.34	0.80
36	1.74	1.21	0.94	0.94

influencia de la humedad antecedente. De manera general la medición de las variables hídricas indica que el suelo presenta una alta infiltración probablemente influenciada por la masa de raíces del pasto rhodes, y que el flujo superficial no presentó una alta capacidad erosiva debido a la baja intensidad de lluvia aplicada (57 mm h^{-1}); además que el suelo presenta una buena estabilidad de sus agregados por presentar valores de diámetro ponderados medios de 1.3 hasta 3.2.

La cobertura permanente del pasto reduce la erosión al impedir el arrastre del suelo por efecto del escurrimiento superficial, pues con la aplicación de intensidades de (24 y 38 mm h^{-1}) no hubo

escurrimiento. Lluvias con intensidades similares son capaces de producir erosión en suelos desprovistos de cobertura (Ríos y Ventura, 1989). Al respecto Alcalá (1996), aplicando una lluvia simulada de 60 mm h^{-1} sobre una parcela de pastizal, observó que no ocurrieron escurrimientos, los cuales fueron controlados por el alto porcentaje de cobertura vegetal y de materia orgánica, lo cual justifica la importancia de la vegetación en la protección de los suelos.

Las condiciones reportadas de pH, conductividad eléctrica, contenidos de fósforo y potasio no son limitativas para el desarrollo del pasto (Etchevers *et al.*, 1971; Jones 1985; Vázquez, 1997). Por otro lado, el macro-nutrimiento que sí presentó valores inferiores a los mínimos requeridos fue el nitrógeno.

La estabilidad de agregados fue influenciada por la materia orgánica aportada por las raíces del pasto. En este sentido Montenegro y Malagon (1990) indican que la estabilidad de los agregados se incrementa con el contenido de materia orgánica, sobre todo en suelos que presenten contenidos menores que 2%. Los contenidos de materia orgánica cuantificados fueron muy bajos y decrecieron con la profundidad, observándose que a 5, 10, 15 y 20 cm los contenidos promedios estuvieron en 1.73, 1.42, 1.31 y 1.16%, respectivamente. Estos resultados son muy parecidos a los reportados por Kandiah (1979), quien usando una cobertura superficial de pasto en un suelo con una densidad aparente de 1.3 g cm^{-3} con 50% de porosidad reportó contenidos de materia orgánica menores que 2.05%.

Considerando la edad del pasto establecido (cuatro años), se esperaba encontrar contenidos mayores de materia orgánica en el suelo aportada principalmente por las raíces del pasto, sin embargo, dichos contenidos encontrados fueron bajos, los cuales pudieron presentarse debido a que la pradera no recibió labores culturales después de su establecimiento en 1992, y la falta de fertilización limitó el desarrollo de las raíces, lo que se confirmó al observarse una correlación no significativa entre la materia orgánica y la densidad de raíces en el Análisis de Componentes Principales (ACP). Avilan *et al.*, citados por Hernández *et al.* (1993), midieron la contribución de la materia orgánica y nutrimentos por las raíces de caña de azúcar (*Saccharum* sp) y pastos cultivados (*Pennisetum purpureum* y *Echinochloa polystachya*), y encontraron que el sistema radical es capaz de generar

Cuadro 7. Resultados del análisis de componentes principales (ACP) aplicado a las variables materia orgánica (MO), densidad de raíces (Ra), conductividad eléctrica (CE), nitrógeno (Ni), distribución de agregados (DA), estabilidad de agregados (EA) y cobertura del pasto (CP).

a. Matriz de correlación entre las variables originales.

	MO	Ra	CE	Ni	DA	EA	CP
MO	1.0000	-0.0548 (0.84)	0.0706 (0.80)	0.4523 (0.09)	0.0424 (0.88)	0.1731 (0.53)	0.0159 (0.95)
Ra		1.0000	-0.2082 (0.45)	0.1656 (0.55)	-0.1117 (0.69)	0.6212 (0.01)	0.2133 (0.44)
CE			1.0000	-0.1972 (0.48)	-0.0368 (0.89)	0.1497 (0.59)	-0.2119 (0.45)
Ni				1.0000	0.0281 (0.92)	0.0692 (0.80)	0.1053 (0.71)
DA					1.0000	-0.4601 (0.08)	-0.2403 (0.38)
EA						1.0000	0.3467 (0.20)
CP							1.0000

() valor de probabilidad.

b. Valores propios de la matriz correlacionada.

Componentes	Valor propio	Diferencia	Parcial	Acumulada
CP1	2.05036	0.539152	0.292909	0.29291
CP2	1.51121	0.279889	0.215888	0.50880
CP3	1.23132	0.300235	0.175903	0.68470
CP4	0.93109	0.267011	0.133013	0.81771
CP5	0.66408	0.204547	0.094868	0.91258
CP6	0.45953	0.307132	0.065647	0.97823
CP7	0.15240		0.021771	1.00000

c. Matriz de correlación entre variables originales y componentes principales (CP).

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
MO	0.062066	0.646347	0.289141	0.257924	0.015819	-0.651829	0.055903
Ra	0.504091	-0.192005	-0.166261	0.599281	-0.092543	0.066438	0.556118
CE	-0.084503	-0.141816	0.810855	-0.011184	0.393040	0.243436	0.318427
Ni	0.035086	0.714601	-0.092483	-0.102258	-0.110013	0.645107	0.202088
DA	-0.415027	0.080371	-0.233508	0.614159	0.542184	0.170658	-0.257853
EA	0.619533	0.026903	0.273560	0.171809	0.001252	0.216598	-0.681311
CP	0.421426	0.086144	0.305541	-0.396290	0.728448	0.138718	0.121238

entre 1.1 y 3.3 % de materia orgánica, 0.034 t ha⁻¹ de nitrógeno y 0.015 t ha⁻¹ de fósforo en caña, y de 0.35 a 3.5 % de materia orgánica en pasto; sin embargo, esta contribución no compensa la remoción de nutrientes por cosecha y sólo son restituidos por la adición de fertilizante.

CONCLUSIONES

1. Los contenidos de materia orgánica aportados por el sistema de raíces y follaje del pasto rhodes han mejorado algunas propiedades físicas del suelo

(capacidad de infiltración y estabilidad estructural), pero la fertilidad natural del mismo sigue siendo muy pobre.

2. En condiciones de clima templado y con este tipo de coberturas vegetativas, para que se produzca un efecto degradante importante del escurrimiento superficial, la intensidad de la lluvia debe ser superior a 57 mm h⁻¹.

3. El sistema de raíces y la cobertura vegetativa de pasto rhodes producen mejoras en las condiciones estructurales de este suelo, aun sin utilizar un buen sistema de manejo del pastizal.

LITERATURA CITADA

- Alcalá, J.M. 1996. Diagnóstico de la producción de sedimentos en tres usos del suelo, cuenca del río los sauces, Michoacán, Méx. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. *In*: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2, Agronomy 9.* American Society of Agronomy, Wisconsin.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. pp. 891-901. *In*: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2, Agronomy 9.* American Society of Agronomy, Wisconsin.
- Etchevers B., J., D.G. Espinosa y Y.E. Riquelme. 1971. *Manual de fertilidad y fertilizantes.* Segunda edición. Universidad de Concepción, Chile.
- Figuerola S., B., A.A. Orozco, T.H. Cortez y L.J. Pimentel. 1991. *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión.* Colegio de Postgraduados-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México.
- Gandoy B., W. 1991. *Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos.* Universidad Autónoma Chapingo. Serie Agronomía No. 22. Chapingo, México.
- González R., J.M. 1984. *Introducción y evaluación de gramíneas y leguminosas establecidas en áreas degradadas para su uso en conservación de suelos y producción de forraje en sistemas asociados con maíz.* Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- González R., J.M. 1994. Promising characteristics to soil conservation and forage production from rhodes grass sown on shallow and stony soil under rainfall conditions. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México. Vol. 7b: 269-270.
- Hernández, I., E. Medina y H.D. López. 1993. Respiración edáfica y aportes de materia orgánica por las raíces y la hojarasca en un cultivo de caña de azúcar. *Agronomía Tropical.* 45(1): 121-142.
- Holly, M. 1980. *Erosion and environment.* Pergamon Press, Oxford-New York-Toronto-Sydney-Paris-Frankfurt.
- Jackson, M.L. 1964. *Análisis químico de suelos.* Traducción al español de J. Beltrán. Omega, Barcelona, España.
- Jones, C.A. 1985. *C4 grasses and cereals: growth, development and stress response.* Wiley, New York, USA.
- Kandiah, H. 1979. Influence of soil properties and crop cover on the erodibility of soil. pp. 475-487. *In*: Lal, R. and D.J. Greenland (eds). *Soil physical properties and crop production in the tropic.* John Wiley and Son.
- Lang, R. y L. McCaffrey. 1984. Ground cover-its effects on soil loss from grazed runoff plots, gunnedah. *J. Soil Conservation* 40: 56-61.
- Montenegro, G.H. y C.D. Malagon. 1990. *Propiedades físicas de los suelos.* Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia.
- Ortiz, V.B. y C.A. Ortiz. 1990. *Edafología.* Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Séptima edición. Chapingo, México.
- Richards, C.A. 1994. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos.* 8a ed. Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Traducción de Sánchez N. Noriega editores. México.
- Ríos B., J.D. y R.E. Ventura. 1989. Caracterización de las lluvias erosivas en Chapingo, México. pp. 210. *In*: *Memorias del XXII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.* Montecillo, México.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y Colegio de Posgraduados. 1991. *Manual de conservación de suelos y agua.* Tercera edición. Chapingo, México.
- Vazquez, A.A. 1997. *Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo.* Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Segunda edición. México.
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and study of physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28: 337-351.

AREA FOLIAR, SENESCENCIA Y RENDIMIENTO DEL GIRASOL DE HUMEDAD RESIDUAL EN FUNCION DEL NITROGENO

Leaf Area, Senescence and Yield of Sunflower Grown with Residual Moisture, as Affected by Nitrogen Fertilization

J. Alberto Escalante Estrada¹

RESUMEN

Los cultivos bajo condiciones de humedad residual pueden sufrir déficit hídrico durante su etapa reproductiva, limitando así la absorción de nutrimentos y la producción de fotosintatos para la formación y llenado de las semillas y, en consecuencia, el rendimiento. De esta manera, una mayor área foliar y duración de la misma durante esta etapa podría conducir a un rendimiento más alto en este agrosistema. El objetivo de este estudio fue determinar la influencia del nitrógeno sobre el tamaño y la duración del área foliar, la producción de biomasa y el rendimiento del girasol (*Helianthus annuus* L.) cultivado bajo condiciones de humedad residual. Los híbridos de girasol AB-E353 y Sungro 380 de ciclo corto y largo, respectivamente, fueron sembrados el 18 de marzo con 0 y 300 kg N ha⁻¹. El diseño experimental fue parcelas divididas. En ambos genotipos, las plantas con N desde las primeras etapas de crecimiento mostraron mayor índice y duración del área foliar, mayor radiación interceptada y, en consecuencia, una producción de biomasa y rendimiento de semilla y aceite más alta. Este último mostró una relación lineal alta ($r^2=0.98$) con la duración del área foliar después de floración. Bajo estas condiciones de humedad, el girasol AB-E353 mostró una mayor respuesta al N que Sungro 380.

Palabras clave: *Helianthus annuus* L., crecimiento, materia seca, índice de estrés de N, eficiencia en el uso de la radiación.

SUMMARY

Crops grown with residual moisture can suffer water stress during the reproductive stage. This condition reduces nutrient uptake, and the production

¹ Especialidad de Botánica, IRENAT, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Estado de México.

Recibido: Febrero de 1999.
Aceptado: Junio de 1999.

of photosynthates for the formation and filling of seeds, and consequently, yield. Thus, a larger leaf area and leaf area duration during this stage would mean a higher yield in this agrosystem. The aim of this study was to determine the effect of nitrogen (N) supply on leaf area, leaf area duration, biomass production, and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown with residual moisture. The sunflower hybrids AB-E353 and Sungro 380, early and late flowering, respectively, were sowed on March 18 without added N and with 300 kg N ha⁻¹. In both genotypes, from the early growth stages, the plants with N showed a higher leaf area index, greater leaf area duration, greater interception of radiation, and consequently higher biomass and yield of seed and oil. Seed and oil yield showed a close lineal relationship ($r^2=0.98$) with leaf area duration in after flowering. On the other hand, the genotype AB-E353 responded better to the addition of N than Sungro 380, under these residual moisture conditions.

Index words: *Helianthus annuus* L., growth, dry matter, N stress index, radiation use efficiency.

INTRODUCCION

En regiones agrícolas de humedad residual, el crecimiento del cultivo depende principalmente del agua almacenada en el suelo, antes de la siembra. El consumo de agua antes de la floración del cultivo limitaría este recurso para la etapa reproductiva generando un déficit hídrico (Bolton, 1981), que estimularía la senescencia foliar, la declinación del área foliar (Wolfe *et al.*, 1988), la reducción de la cantidad de radiación interceptada y el rendimiento (Connor *et al.*, 1985). Puesto que el tamaño y la duración del aparato fotosintético están relacionados con el rendimiento, es de esperarse que las estrategias que conduzcan al incremento de éstos, darán en consecuencia un rendimiento más alto. En la mayoría de los cultivos, el N ocasiona incrementos en el área foliar (AF) y en el índice de área foliar (IAF), lo cual puede ser producto de un mayor número y tamaño de

hojas (McCullough *et al.*, 1994). En cereales, el incremento en el número de hojas con N puede deberse a un mayor número de tallos (Pearman *et al.*, 1977), y también a una mayor expansión foliar (Blanchet *et al.*, 1986; Lemcoff y Loomis, 1986; Muchow, 1988), a causa de un mayor número y tamaño de células (Hewitt, 1963). La duración del área foliar (DAF) también es mayor en las plantas abastecidas con N (Novoa y Loomis, 1981). Por lo tanto, es de esperarse que un cultivo con N intercepte una mayor cantidad de radiación, puesto que esto depende del IAF y DAF (Muchow y Davis, 1988), lo que probablemente se traducirá en una mayor producción de biomasa. Asimismo, la variación en DAF principalmente durante la etapa reproductiva está relacionada con la variación en el rendimiento de semilla de trigo (Thorne, 1974) y maíz (Wolfe *et al.*, 1988), debido a que las semillas en crecimiento demandan gran cantidad de asimilados cuya producción depende principalmente de la actividad y duración del área foliar en esta etapa.

Por otra parte, la senescencia es de interés económico porque afecta la producción de los cultivos, al reducir el área fotosintética activa, debido a la movilización de metabolitos hacia la demanda (Noodén y Guimét, 1989). El inicio del llenado de grano coincide con el de la senescencia foliar (Evans *et al.*, 1975). La tasa de senescencia está altamente determinada por las condiciones ambientales y la actividad de la hoja está relacionada con la nutrición mineral (Ellen, 1987). Algunos estudios han demostrado que el N retrasa la pérdida de clorofila (Debata y Murty, 1983) y así se tiene una mayor duración de la actividad fotosintética. De esta manera, con la fertilización nitrogenada puede lograrse un retraso en la senescencia y en consecuencia una mayor duración del área foliar y producción de biomasa.

En girasol, bajo condiciones "óptimas" de crecimiento, el incremento de biomasa y rendimiento por la aplicación de N, ha sido señalado por Blanchet *et al.* (1986) y Steer *et al.* (1986). Los antecedentes más recientes para Córdoba, España, indican que con 450 kg de N ha⁻¹, se logran aumentos hasta de 100 % en biomasa para el girasol de Sungro 380 con riego. El testigo (sin N) mostró 7000 kg ha⁻¹ de materia seca total (Alvarez del Toro, 1987).

Los estudios sobre el efecto del N en los cultivos bajo condiciones de humedad residual son muy limitados. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue determinar la influencia del N sobre

el tamaño, duración y senescencia del área foliar, la producción de biomasa y el rendimiento del girasol cultivado bajo condiciones de humedad residual.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en 1988 en Tomejil, provincia de Sevilla, España (37°28' norte, 5°38' oeste y 72 msnm), que presenta una temperatura máxima y mínima media anual (12 años) de 22 °C y 12 °C, respectivamente, una precipitación media de 580 mm y una evapotranspiración potencial de 922 mm. El suelo es un vertisol, Entic chromoxerets, limo arcilloso, la mayor parte de la arcilla es expandible, lo que da lugar a movimientos en el perfil. En los primeros 30 cm del perfil el contenido de materia orgánica es de 2 %, la densidad aparente es de 1.63 g cm⁻³ y un pH de 8.0. Durante la estación lluviosa, estos suelos pueden presentar problemas de encharcamientos en las depresiones. Dichos suelos al secarse presentan la particularidad de formar grandes grietas. El clima es de tipo Mediterráneo Subtropical (Castillo y Beltrán, 1977).

Tratamiento, Diseño Experimental y Dimensiones del Experimento

Se utilizaron dos genotipos (híbridos) de girasol AB-E353 (AB) y Sungro 380 (Sungro) y dos niveles de nitrógeno 0 (testigo) y 300 kg ha⁻¹ (la fuente de N fue urea 46 %), aplicados antes de la siembra y referidos posteriormente como n0 y N+, respectivamente. El diseño experimental fue parcelas divididas con cuatro repeticiones. La parcela mayor correspondió al genotipo y la menor al nivel de N. El tamaño de parcela (unidad experimental) fue de 5 x 10 m. La siembra se realizó el 18 de marzo a la densidad de 100 mil plantas ha⁻¹ en surcos de 50 cm., de separación. Se registró la temperatura máxima y mínima promedio de cada 10 días, así como la precipitación decenal.

Las variables en estudio fueron:

1) Fenología: Las etapas fenológicas determinadas según la guía fenológica de Schneiter y Miller (1981) fueron: emergencia; fecha en la que más de 50 % de las plántulas asomaron los cotiledones del suelo (Etapa Vc). Floración: Fecha cuando más de 50 % de las plantas de la población mostraron en la periferia del capítulo las ligulas expuestas y turgentes (etapa R5). La madurez fisiológica se registró cuando

el dorso del capítulo mostró una caloración amarilla (etapa-R9).

2) Porcentaje de radiación solar interceptada. El porcentaje de radiación solar interceptada (RI) se determinó mediante la metodología de Adams y Arkin (1977) que consiste en colocar bajo el dosel vegetal y perpendicularmente entre las hileras de las plantas una regla de longitud similar a la distancia entre hileras de plantas para contabilizar los cm sombreados. Así, la RI resulta de la ecuación siguiente: $RI = (S/R) * 100$; donde RI = porcentaje de radiación interceptada; S = cm de sombra; R = distancia entre hileras de planta (cm); 100 es una constante. Dichas mediciones se realizaron al mediodía solar (1130-1300 h) a los 45, 53, 81, 95 y 102 días después de la emergencia (dde).

Para determinar el número de hojas y área foliar se tomó una muestra de cuatro plantas por unidad experimental a los 24, 37, 65, 81 y 94 dde y para la biomasa se cosecharon cuatro plantas a los 24, 37, 65, 81, 94, 108 dde.

3) Número de hojas verdes (NH), área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF): El número de hojas verdes (NH) se contabilizó como tal a aquellas que presentaban más de 50 % de color verde que es indicativo de la presencia de clorofila y de actividad fotosintética. El área foliar (AF) se determinó con un integrador electrónico de área modelo LICOR LI300 (LI-COR, Inc. Lincoln, NE) y el índice de área foliar (IAF) como el área de las láminas foliares que ocupan un m² de superficie de suelo, mediante la ecuación siguiente:

$$IAF = \frac{(AF \text{ planta}^{-1})(DP)}{AS}$$

Donde: DP = número de plantas en el área sembrada y AS = área sembrada.

A partir de los 65 dde, cada 15 días hasta la cosecha, se contabilizó el número de hojas senescentes, considerándose como tal a aquellas que presentaron en su totalidad un color amarillo. La tasa de senescencia fue la pendiente de la recta de regresión entre el número de hojas senescentes y el tiempo.

La duración del área foliar (DAF) que indica el lapso en que el AF es funcional, se determinó representado gráficamente la curva de IAF en función del tiempo, recortando la superficie limitada por dicha curva y el eje de las abscisas y se midió con un integrador electrónico de área. La biomasa que representa la materia seca producida por el cultivo (suma de la materia de tallos, hojas y capítulos) se determinó

llevando a secado cada estructura de la planta hasta peso constante en una estufa de ventilación forzada a 80 °C por 72 horas. La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) de los 24 a los 89 dde fue la pendiente de la recta de regresión de la biomasa (peso seco, g m⁻²) y el tiempo. La radiación solar global fue registrada con un piranómetro y transformada a radiación fotosintéticamente activa multiplicando por 0.48 (Uhart y Andrade, 1995). La eficiencia en el uso de la radiación se calculó como la acumulación de biomasa en un periodo, dividida entre la RFA acumulada durante el mismo periodo. El índice de estrés propuesto por Greenwood (1976) fue utilizado para caracterizar el estrés por N (IEN) y fue calculado con la TCC mediante la ecuación:

$$IEN = [(TCCN - TCCn)/TCCn] * 100$$

Donde: IEN = Índice de estrés por N; TCCN y TCCn es la tasa de crecimiento del cultivo con N y el testigo, respectivamente. El criterio utilizado para definir el índice de estrés fue la reducción en la TCC máxima (la que se alcanza con nitrógeno) al ser factor limitativo el N. Los datos fueron procesados por análisis de varianza y por análisis de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSION

Factores Ambientales

En la Figura 1, que muestra la temperatura máxima y mínima (media decenal) y la precipitación (suma decenal), se observa que la temperatura se elevó a medida que avanzó la estación de crecimiento del girasol. Así, durante la etapa de siembra a emergencia, la temperatura máxima (T_{máx}) y mínima (T_{mín}) promedio fue de 20 a 25 °C y de 4 a 6 °C, respectivamente. Al inicio de floración la T_{máx} fue cercana a 30 °C y la mínima de 10°C. Durante la etapa reproductiva la temperatura alcanzó un máximo cercano a 40 °C y una mínima de 15 °C. En cuanto a la precipitación (PP) antes de la siembra se tuvo una PP de 5 mm. En la etapa de emergencia a inicio de floración del cultivo, se presentó un periodo regular de lluvias, el cual varió desde 5 mm hasta 50 mm decenales. Posteriormente el cultivo durante su etapa reproductiva solamente contó con un suministro de agua decenal cercano a 70 mm, lo cual pudo ser un factor limitativo para el periodo de llenado de grano y la síntesis de aceite particularmente para el cultivar Sungro de ciclo tardío.

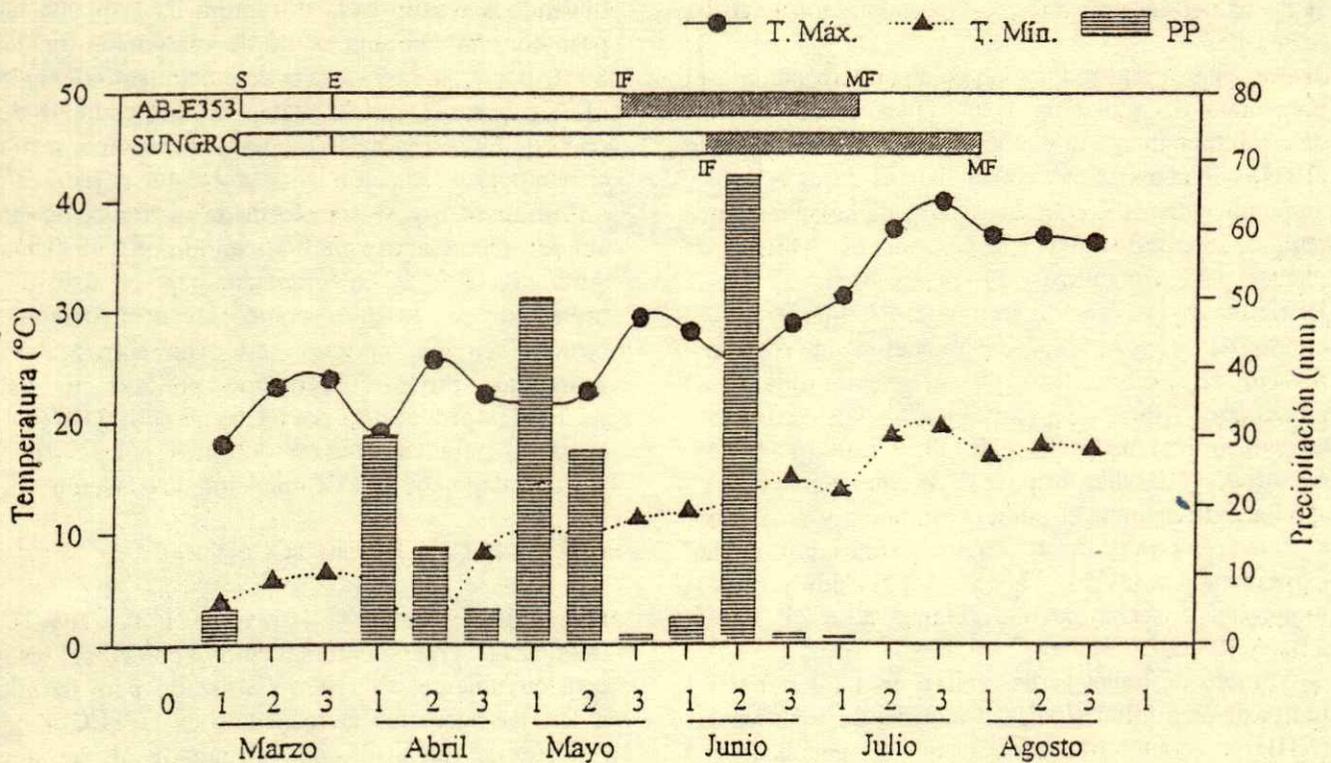


Figura 1. Temperatura (°C) máxima (T. Max.) y mínima (T. Min.) promedio decenal y precipitación (PP, mm) suma decenal para los meses de marzo a agosto en Tomejil, 1988. S = Siembra; E = Emergencia; IF = Inicio de floración; MF = Madurez fisiológica.

Fenología

Los dos cultivos de girasol emergieron a los 15 días después de la siembra. El inicio de floración ocurrió a los 61 y 75 días después de la emergencia (dde) para AB y Sungro en ambos tratamientos de N. La madurez fisiológica en AB ocurrió a los 110 y 108 dde; en Sungro a los 120 y 125 dde para N+ y n0, respectivamente.

Número de Hojas (NH) m⁻², Índice de Área Foliar (IAF), Tasa de Senescencia y Duración del Área Foliar DAF

El número de hojas (NH) no mostró cambios significativos por efecto de los tratamientos y alcanzó su máximo valor a los 65 días con 238 y 199 hojas m⁻² para ABn0 y ABN+ (Figura 2a); y 256 y 264 hojas m⁻² para Sungro n0 y Sungro N+, respectivamente (Figura 2b).

El índice de área foliar (IAF) mostró durante el desarrollo del cultivo una tendencia similar a la curva del NH (Figura 3) en donde el valor máximo también se observó a los 65 dde. Posteriormente, el NH y el

IAF disminuyeron debido a la senescencia hasta alcanzar los valores más bajos a la madurez fisiológica. Desde las primeras etapas de crecimiento el IAF de ambos genotipos con N fue superior al testigo. Estas diferencias fueron más significativas a los 65 dde en el genotipo AB (Figura 3a). Así, el IAF de ABN+ (3.6) fue 2.1 veces mayor que el testigo (1.7); en Sungro N+ (3.5) fue 0.16 veces superior al de testigo (Figura 3b). Incrementos en el IAF por N también fueron encontrados en sorgo (Jordan, 1983); maíz (Wolfe *et al.*, 1988) y en girasol de riego por Alvarez del Toro (1987). Finalmente, podemos señalar que el incremento en el IAF por N se debió principalmente a una mayor expansión foliar, puesto que el número de hojas no fue aumentado por este nutrimento.

Por otra parte, el N redujo la tasa de senescencia en el genotipo AB solamente. Así, en ABn0 ésta fue de 5.4 hojas senescentes (HS) por día, mientras que en ABN+ fue de 4.7 HS día⁻¹. En Sungro la tasa de senescencia fue de 4.2 y 4.9 HS día⁻¹ para n0 y N+, respectivamente. Las ecuaciones de regresión entre el número de hojas senescente (NHS) y el tiempo, así como su r² se presentan en el Cuadro 1.

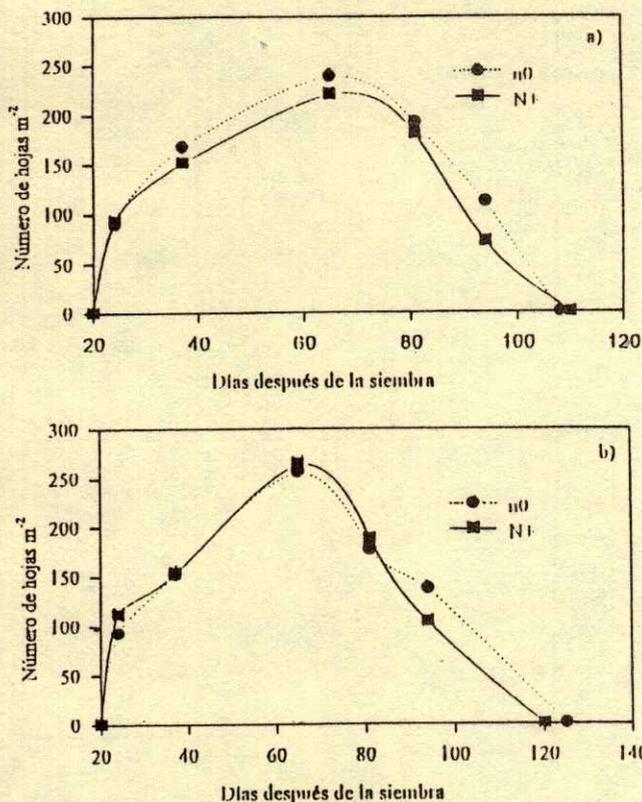


Figura 2. Número de hojas m², durante el desarrollo del girasol cvs. AB-E353 (a) y Sungro (b), en función de la fertilización nitrogenada. Tomejil. 1988. N+ y n0, con y sin fertilización nitrogenada respectivamente.

La duración del área foliar (DAF, días) mostró cambios significativos por efecto del genotipo y N (Cuadro 2). La DAF total de Sungro con N+ y la del testigo (n0) fue superior a la de AB en 49 y 45 días, respectivamente. El N amplió la DAF en ambos genotipos. Así, en AB la DAF total de N+ superó en 59 días a la de n0; la DAF de Sungro N+ fue superior en 63 días a la de Sungro n0. Por otra parte, al estudiar DAF del período de emergencia a floración (DAFv) y

Cuadro 1. Ecuaciones de regresión entre el número de hojas senescentes (NHS) y el tiempo en girasol bajo tratamientos con N.

G	Ecuación	r ²	Prob. F.
AB-E353 n0	y = -366.4 + 5.4 X	0.96	**
N+	y = -326.9 + 4.7 X	0.93	**
Sungro n0	y = -270.5 + 4.2 X	0.99	**
N+	y = -312.0 + 4.9 X	0.99	**

n0 = testigo; N+ = 300 kg N ha⁻¹.
G = Genotipo; X = Tiempo; y = NHS.
** P<0.01.

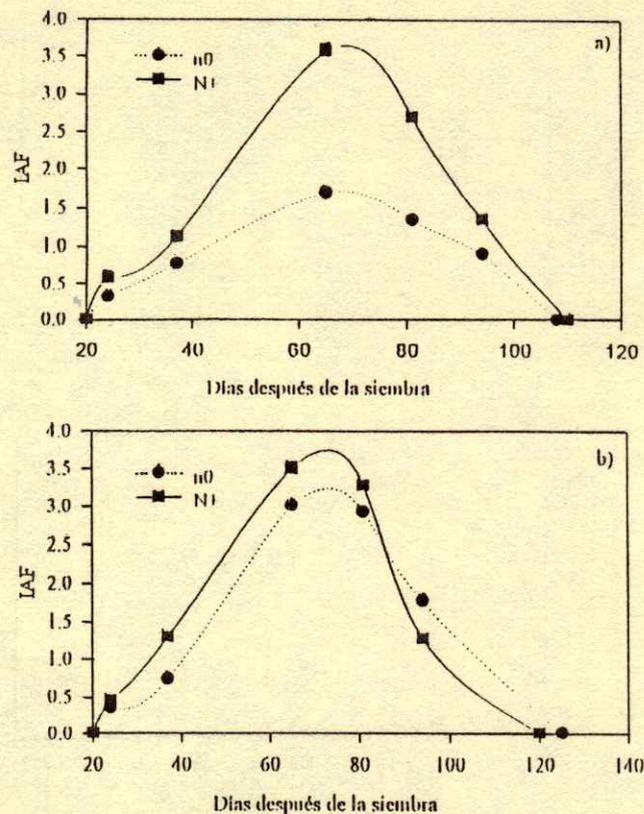


Figura 3. Índice de área foliar (IAF) durante el desarrollo del girasol cvs. AB-E353 (a) y Sungro (b), en función de la fertilización con nitrógeno. Tomejil. 1988. N+ y n0, con y sin fertilización nitrogenada respectivamente.

de floración a madurez fisiológica (DAFr), se encontró que en AB la DAFr fue superior a la DAFv. En contraste, en Sungro en parte por ser la DAFv fue superior a la DAFr. Asimismo, en ambos genotipos la DAFv y DAFr del girasol N+ fue superior al testigo (n0).

Cuadro 2. Duración del área foliar (días) en el período vegetativo (DAFv), reproductivo (DAFr) y total (DAFt) en girasol en función del N. Datos promedio de cuatro repeticiones. Tomejil. 1988.

G	N	DAFv	DAFr	DAFt
AB-E353	n0	38	73	111
	N+	66	104	170
Sungro	n0	86	70	156
	N+	140	79	219
Prob. F.	G	** (20)	NS	*(39)
	N	** (10)	13	** (14)
	G*N	NS	NS	NS

G = genotipo, N = nitrógeno; N+ = con fertilizante N; n0 = testigo (sin N).
*, **, P<0.05 y 0.01, respectivamente; NS = cambios no significativos.

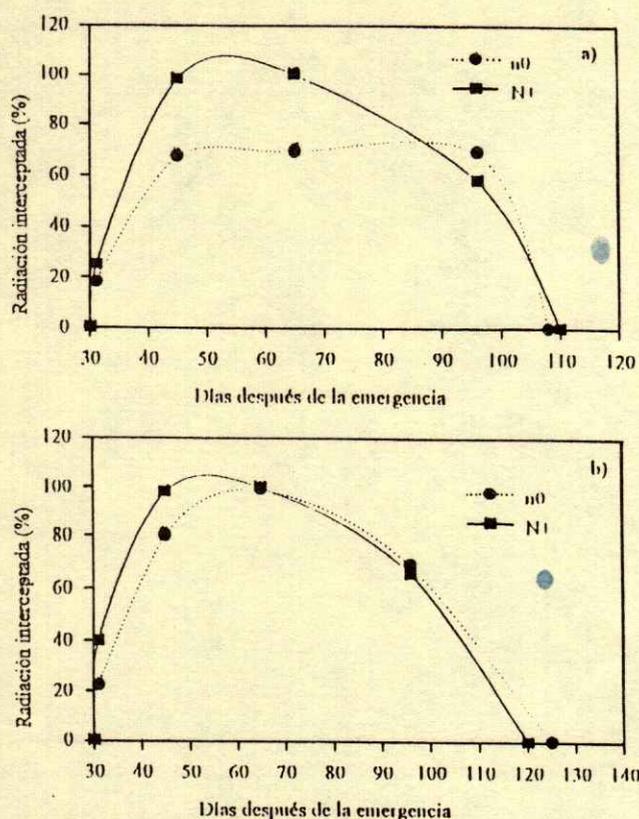


Figura 4. Radiación interceptada (%) por el dosel vegetal durante el desarrollo del girasol cvs. AB-E353 (a) y Sungro (b), en función de la fertilización nitrogenada. Tomejil. 1988. N+ y n0, con y sin fertilización nitrogenada respectivamente.

Porcentaje de Radiación Interceptada (RI, %)

El porcentaje de radiación interceptada (RI, %), en la mayoría de las etapas en que se determinó solamente mostró cambios significativos por efecto del N. Así, en las Figuras 4a y 4b se observa que, desde las primeras etapas de crecimiento, el girasol con N mostró mayor cobertura del suelo que el testigo (lo cual fue más evidente en AB). En AB y Sungro con N la máxima RI (98-100 %) se logró a partir de los 45 dde y se mantuvo hasta los 65 dde para descender a partir de esta fecha. En el testigo (n0) la máxima RI en AB fue de 69 % a los 45 dde para mantenerse hasta los 96 dde; en Sungro fue de 99 % a los 65 dde para después decrecer debido a la senescencia de hojas. Tendencias similares han sido reportadas en maíz por Uhart y Andrade (1995).

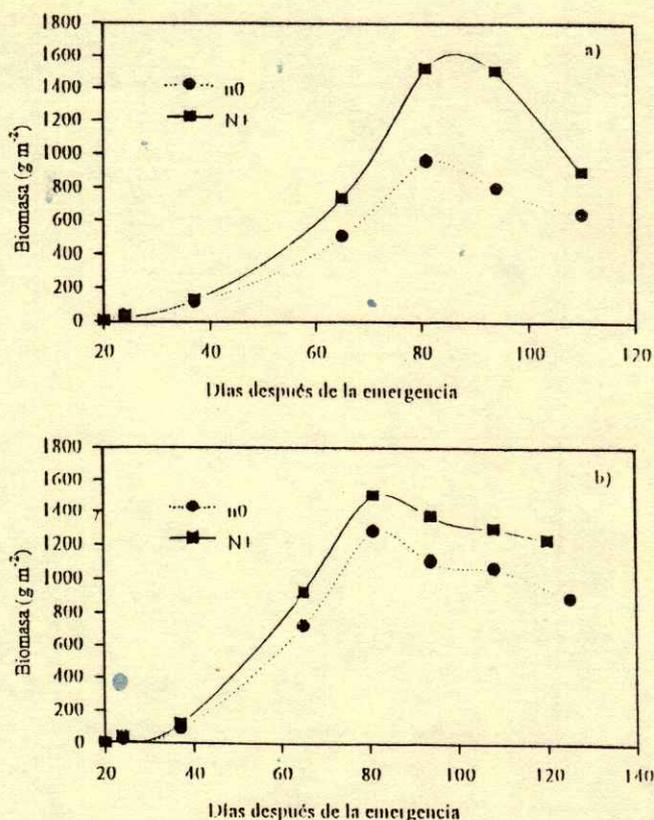


Figura 5. Dinámica de la producción de biomasa (g m^{-2}) en girasol cvs. AB-E353 (a) y Sungro (b), en función de la fertilización nitrogenada. Tomejil. 1988. N+ y n0, con y sin fertilización nitrogenada respectivamente.

Producción de Biomasa (g m^{-2}), Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) y Eficiencia en el Uso de la Radiación

En la Figura 5 se observa que la dinámica de producción de biomasa describe una pauta similar entre genotipos y nivel de N, notándose que el girasol con N mostró la mayor producción. La biomasa máxima se encontró a los 81 dde con 957 y 1523 g m^{-2} para ABn0 y ABN+; y 1277 y 1503 g m^{-2} para Sungro n0 y Sungro N+, respectivamente. Posteriormente hasta la cosecha, la producción de biomasa disminuyó. Dicha reducción se atribuye a los altos requerimientos de energía, obtenida a partir de los carbohidratos, para la síntesis de aceite y proteína (Novoa y Loomis, 1981).

A la cosecha final, en AB y Sungro el N incrementó la biomasa en 41 % y 38 % con relación al

Cuadro 3. Biomasa ($g\ m^{-2}$), índice de cosecha (IC), rendimiento de semilla (Rend, $g\ m^{-2}$), contenido de aceite (%) de las semillas, rendimiento en aceite (RA $g\ m^{-2}$) e índice de cosecha para producción de aceite (ICa) en girasol bajo tratamientos de nitrógeno. Tomejil. 1988.

Genotipo	N	Biomasa (gm^{-2})	IC	Rend gm^{-2}	Aceite %	RA gm^{-2}	ICa
AB-E353	n0	636	.33	210	48.7	102	0.16
	N+	896	.35	317	42.9	136	0.15
Sungro	n0	886	.24	215	44.3	95	0.11
	N+	1226	.22	278	43.5	121	0.10
	G	*(114.7)	NS	NS	NS	NS	NS
	N	*(81.7)	NS	*(22)	** (0.9)	** (14.8)	NS
	G*N	NS	NS	NS	*(1.2)	NS	NS

G = genotipo; N = Nitrógeno.

testigo que mostró 636 y 886 $g\ m^{-2}$, respectivamente. En ambos tratamientos de N, Sungro mostró mayor producción de biomasa que AB. Por ejemplo, en el cultivo con N, la biomasa de Sungro (1226 $g\ m^{-2}$) fue superior en 37 % a la de AB que mostró 896 $g\ m^{-2}$ (Cuadro 3).

La mayor producción de biomasa con N fue producto de una mayor tasa de crecimiento del cultivo (TCC). Así, la TCC calculada de los 24 a 81 dde para AB y Sungro fue de 23.3 y 23.8 $g\ m^{-2}\ día^{-1}$, mientras que en el testigo (n0) fue de 14.5 y 20.1 $g\ m^{-2}\ día^{-1}$, respectivamente. Cabe señalar que en AB las diferencias de TCC entre N+ y n0 fueron superiores a los de Sungro (Cuadro 4). Esto indica una mayor eficiencia en el aprovechamiento del N por AB que Sungro.

Por otra parte, en las Figuras 6a y 6b se muestra para ambos genotipos una relación entre la producción de biomasa ($g\ m^{-2}$) y la radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR, $MJ\ m^{-2}$), evaluada hasta los 81 dde. También para cada genotipo se observan curvas diferentes relacionadas con el tratamiento de N. Esto indica que por cada MJ de PAR el girasol con N produce mayor biomasa que el testigo. Sin embargo, la tasa de incremento de biomasa de N+ y n0 en ambos cultivares de girasol fueron estadísticamente iguales, según la prueba de homogeneidad de los coeficientes de regresión. Esto sugiere que la

Cuadro 4. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y ecuaciones de regresión entre la biomasa y los días después de la siembra en girasol bajo tratamientos de nitrógeno.

Genotipo N	Ecuación	r ²	TCC $g\ m^{-2}\ día^{-1}$
AB-E353	n0 $y = -384 + 14.5 X$	0.98**	14.5
	N+ $y = -650 + 23.3 X$	0.96**	23.3
Sungro	n0 $y = -559 + 20.1 X$	0.98**	20.1
	N+ $y = -641 + 23.8 X$	0.98**	23.8

N+ = 300 $kg\ N\ ha^{-1}$; n0 = testigo (sin fertilización).

X = días después de la siembra; y = biomasa.

** $P < 0.01$.

mayor producción de biomasa del girasol N+ se debe principalmente a una mayor radiación interceptada por el mayor dosel generado por el N y no a una mayor eficiencia de la radiación. Tendencias similares fueron encontradas en maíz por Muchow y Davis (1988).

Índice de Estrés de N

El índice de estrés de N (IEN) es una estimación cuantitativa del efecto de una deficiencia de N sobre el crecimiento de una planta o en un cultivo. El IEN representa la proporción en que la tasa de crecimiento de una planta se reduce con relación al crecimiento máximo alcanzado con un suministro de N no limitativo. El IEN en AB fue de 60 %, mientras que en Sungro fue de 19 %. El IEN más bajo en Sungro puede deberse a la más baja respuesta al N de este genotipo, ya que por su mayor ciclo de crecimiento fue sujeto a condiciones de humedad más limitativas que el genotipo AB (Escalante, 1992).

Índice de Cosecha (IC) y Rendimiento

El índice de cosecha para producción de semilla (IC) no mostró cambios significativos por efecto de tratamientos. Cabe señalar que el IC de AB (0.34) fue superior al de Sungro (0.23). Esto en parte se atribuye a que Sungro, por su mayor ciclo de crecimiento, fue sujeto durante su etapa reproductiva a un período de déficit hídrico más severo por la escasa precipitación (Figura 1), lo que impidió una mayor acumulación de materia seca hacia la semilla. Tendencias similares se observaron en el índice de cosecha para producción de aceite (ICa) (Cuadro 3). Por otra parte, el rendimiento de semilla y el rendimiento de aceite (RA), mostraron incrementos significativos por el N solamente (Cuadro 3). En AB y Sungro el N incrementó el rendimiento de semilla en 51 % y 29 % respecto al

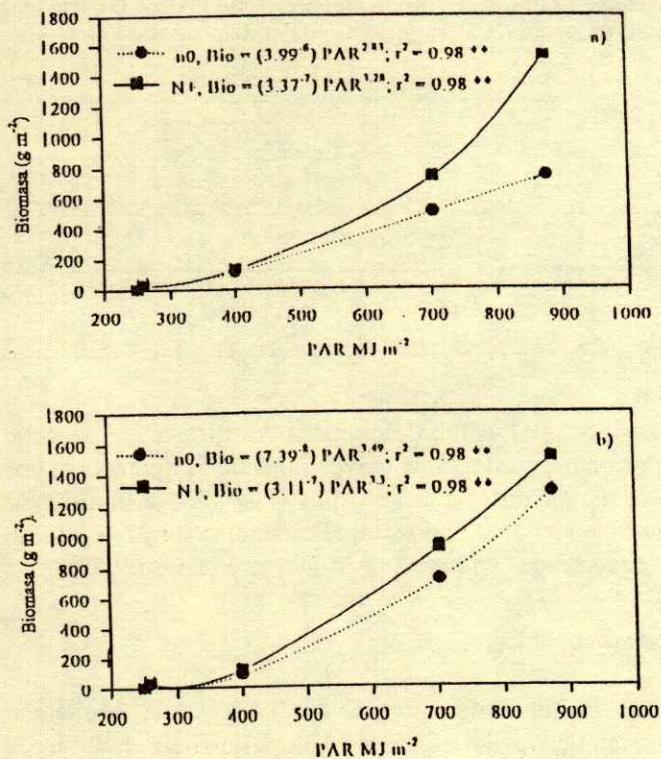


Figura 6. Relación entre la biomasa y la radiación fotosintéticamente activa (PAR, MJ m⁻²) en girasol cvs. AB-E353 (a) y Sungro (b), en función de la fertilización nitrogenada. Tomejil. 1988. Datos hasta 81 días después de la emergencia. N+ y n0, con y sin fertilización nitrogenada respectivamente.

testigo (n0) el cual mostró 210 y 215 g m⁻², respectivamente. El N incrementó el rendimiento de aceite en 33 % y 27 % en AB y Sungro, respectivamente. El RA más alto fue de 136 g m⁻² correspondiente a ABN+. Por otra parte, el contenido de aceite de la semilla en el girasol con N fue más bajo que en el testigo. En el testigo, el contenido de aceite de la semilla de AB (48.7 %) fue superior al de Sungro (44.3 %).

Relaciones entre el Rendimiento y sus Componentes.

El incremento en el rendimiento de semilla y el rendimiento de aceite fueron relacionados con una mayor duración del área foliar durante el período reproductivo ($r^2 = 0.81$). Esto manifiesta la importancia de la duración y actividad de la fuente de fotosintatos en esta etapa, en la determinación del rendimiento. Wolfe *et al.* (1983; 1988) también encontraron una relación alta ($r^2 = 0.98$) entre la DAF

Cuadro 5. Ecuaciones que estiman el rendimiento de aceite en girasol en función de la biomasa y el índice de área foliar (IAF) a los 65 dde (inicio de la etapa reproductiva).

Ecuación	R ²	Prob. F
$y = 5.94 + 0.201 \text{ Biomasa}$	0.95	*
$y = -20.26 - 28.48 \text{ IAF} + 0.29 \text{ Biomasa}$	0.99	**

*, ** P < 0.05 y 0.01, respectivamente. y = rendimiento de semilla.

durante el período reproductivo y el rendimiento de tubérculo de papa (*Solanum tuberosum* L.) y maíz (*Zea mays* L.), respectivamente. Por otra parte, al buscar por el método de Stepwise las variables que mejor estiman el rendimiento de aceite se encontró que la biomasa a los 65 dde es uno de los mejores estimadores ($r^2 = 0.95$); el coeficiente de determinación se elevó ($r^2 = 0.99$) cuando se incorporó el IAF determinada en esa fecha. Las ecuaciones que estiman el rendimiento se presentan en el Cuadro 5.

En resumen podemos señalar que la fertilización nitrogenada en girasol bajo condiciones de humedad residual, incrementó la magnitud del área foliar debido a una mayor expansión de las hojas y una mayor duración de la misma, debido en parte a una menor tasa de senescencia. De esta manera, el girasol con N mostró una mayor intercepción de la radiación solar que se reflejó en una mayor tasa de producción de biomasa, mayor rendimiento de aceite y de semilla. El índice de cosecha tanto para semilla como para aceite no mostró cambios por el N. Esto indica que el incremento en biomasa y rendimiento por el N con relación al testigo fue en una proporción similar. La menor respuesta al N de Sungro y el índice de estrés e índice de cosecha más bajo de este genotipo se debió en parte a que Sungro por ser un genotipo tardío a floración, con mayor duración del ciclo, estuvo sujeto a un estrés hídrico más severo durante la etapa reproductiva a consecuencia del agotamiento prematuro del agua del suelo como ocurre en los cultivos de humedad residual.

CONCLUSIONES

Bajo condiciones de humedad residual la fertilización nitrogenada incrementa el área foliar, su duración, la producción de biomasa y el rendimiento de semilla y de aceite en girasol. La duración del área foliar durante el período reproductivo es determinante en la producción de semilla y aceite. El genotipo AB-E353 de ciclo corto mostró mayor respuesta al N que Sungro de ciclo largo.

RECONOCIMIENTO

El autor agradece el trabajo mecanográfico de la Sra. Julia Corina Morales Pérez.

LITERATURA CITADA

- Adams, J.E. y G.F. Arkin. 1977. A light interception method for measuring row crop ground cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 789-792.
- Alvarez del Toro, J.A. 1987. Respuesta del girasol (*Helianthus annuus* L.) a un suministro variable de agua de riego y de nitrógeno. Tesis Doctoral. ETSIA. Córdoba.
- Blanchet, R., G. Cavalie, M. Piquenial, N. Gelfi, Y. Duprat y E. Martínez. 1986. Influence de la nutrition azotée sur l'assimilation nette et la formation du rendement du tournesol. *Helia* 9: 39-45.
- Bolton, F.E. 1981. Optimizing the use of water and nitrogen through soil and crop management. *Plant Soil* 58: 231-248.
- Castillo, F.E. y L.R. Beltrán. 1977. Agroclimatología de España. Cuaderno INIA. No. 7. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura. Madrid.
- Connor, D.J., J.A. Palta y T.R. Jones. 1985. Response of sunflower to strategies of irrigation. III. Crop photosynthesis and transpiration. *Field Crops Res.* 12: 281-293.
- Debata, A. y K.S. Murty. 1983. Effect of foliar application of nitrogen, phosphorus and potassium salts on flag leaf senescence in rice. *Agric. Sci. Dig.* 1: 23-26.
- Ellen, J. 1987. Effects of plant density and nitrogen fertilization in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). I. Production pattern and grain yield. *Neth. J. Agric. Sci.* 35: 137-153.
- Escalante Estrada, J.A. 1992. Interacciones entre el nitrógeno y la densidad de siembra en el cultivo del girasol (*Helianthus annuus* L.) bajo suministro limitado de agua. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad de Córdoba España.
- Evans, L.T., J.F. Wardlaw y R.A. Fischer. 1975. Wheat. pp. 101-150. *In:* L.T. Evans (ed.). *Crop physiology. Some case histories.* Cambridge Univ. Press, Cambridge, England.
- Greenwood, E.A.N. 1976. Nitrogen stress in plants. *Adv. Agron.* 28: 1-35.
- Hewitt, E.J. 1963. The essential nutrient elements requirements and interaction in plants. pp. 137-362. *In:* F.C. Steward (ed.). *Plant physiology* Vol. III. Academic Press, New York.
- Jordan, W.R. 1983. Whole plant response to water deficits: An overview. *In:* H. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair (eds). *Limitations to efficient water use in crop production.* ASA Madison, WI.
- Lemcoff, J.H. y R.S. Loomis. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Sci.* 26: 1017-1022.
- McCullough, D.E., Ph. Girardin, M. Mihajlovic, A. Aguilera y M. Tollenaar. 1994. Influence of N supply on development and dry matter accumulation of an old and new maize hybrid. *Can. J. Plant Sci.* 74: 471-477.
- Muchow, R.C. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semiarid tropical environment. III. Grain yield and nitrogen accumulation. *Field Crops Res.* 18: 31-43.
- Muchow, R.C. y R. Davis. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semiarid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Res.* 18: 17-30.
- Novoa, R. y R.S. Loomis. 1981. Nitrogen and plant production. pp. 177-204. *In:* J. Monteith and C. Webb (eds). *Soil water and nitrogen in Mediterranean-type environments,* Martinus-Nijhoff/Dr. W. Junk, The Hague.
- Noodén, L.D. y J.J. Guiamét. 1989. Regulation of assimilation and senescence by the fruit in monocarpic plants. *Physiol. Plant* 77: 267-274.
- Pearman, I., S.M. Thomas y G.N. Thorne. 1977. Effects of nitrogen fertilizer on growth and yield of spring wheat. *Ann. Bot.* 41: 93-108.
- Schneider, A.A. y J.F. Miller. 1981. Description of sunflower growth stages. *Crop Sci.* 21: 901-903.
- Steer, B.T., P.D. Coaldrake, C.J. Pearson y C.P. Canty. 1986. Effects of nitrogen supply and population density on plant development and yield components of irrigated sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Field Crops Res.* 13: 99-115.
- Thorne, G.M. 1974. Physiology of grain yield of wheat and barley. pp. 5-25. *In:* Rep. Rothamstead. Exp. Sta. 1973. Part 2.
- Uhart, S.A. y F.H. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency in maize. I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Sci.* 35: 1376-1383.
- Wolfe, D.W., E. Fereres y R.E. Voss. 1983. Growth and yield response of two potato cultivars to various levels of applied water. *Irrig. Sci.* 3: 211-222.
- Wolfe, D.W., D.W. Henderson, T.C. Hsiao y A. Alvino. 1988. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves. *Agron. J.* 80: 865-870.

POTENCIAL DE LA BIORREMEDIACION DE SUELO Y AGUA IMPACTADOS POR PETROLEO EN EL TROPICO MEXICANO

Bioremediation Potential of Oil Impacted Soil and Water in the Mexican Tropics

Randy H. Adams Schroeder¹, Verónica I. Domínguez Rodríguez y Leonardo García Hernández

RESUMEN

En este artículo se evalúa la tecnología de biorremediación para el tratamiento de sitios contaminados con petróleo en el trópico mexicano. Se describen brevemente su origen, principios básicos, aplicación correcta y limitaciones, y el empleo adecuado de productos bacterianos comerciales. Se estudia el potencial de la biorremediación en ecosistemas tropicales y se presentan varios estudios relacionados con la biorremediación. Entre ellos, el tratamiento de desechos de la industria petrolera, y biorremediación en el trópico. Además, se incluyen investigaciones recientes realizadas en nuestro propio laboratorio. Finalmente, se analizan las posibilidades de desarrollo tecnológico para la biorremediación de los hidrocarburos del petróleo en los ecosistemas tropicales del sureste mexicano.

Palabras clave: Bacteria, Tabasco, PEMEX, remediación, hidrocarburos.

SUMMARY

In this article we review the technology of bioremediation for treatment of petroleum contaminated sites in tropical Mexico. Briefly, we describe its origin and basic principles, correct application and limitations, and the proper use of commercial bacterial mixtures. We explore the potential of bioremediation in tropical ecosystems and present various studies related to petroleum industry waste bioremediation and bioremediation in the tropics, including recent investigations performed in our own laboratory. Finally, we pursue the possibilities of

future technology development for bioremediation of petroleum hydrocarbons in the tropical ecosystems of southeastern Mexico.

Index words: Bacteria, Tabasco, PEMEX, remediation, hydrocarbons.

INTRODUCCION

En el sureste mexicano se encuentran un sinnúmero de sitios con diferentes niveles de impacto ambiental, resultado de la actividad petrolera de aproximadamente cincuenta años. Se debe buscar soluciones tecnológicas apropiadas para las condiciones características de esta zona tropical. En este contexto se debe recalcar el valor de desarrollar tecnologías de biorremediación como alternativas para la recuperación de ecosistemas y agroecosistemas impactados. Es importante que dichas tecnologías tomen en cuenta las propiedades del trópico, sobre todo las temperaturas elevadas y la alta precipitación.

La misma industria petrolera ha empezado investigaciones en esta área en los últimos años. Petróleos Mexicanos (PEMEX), con ayuda del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), ha empezado a buscar medidas efectivas en términos de costo-beneficio para recuperar algunos de los sitios contaminados más problemáticos en el sureste mexicano, especialmente en los estados de Veracruz, Tabasco, Chiapas y Campeche. La biorremediación es una de las tecnologías que se están investigando y está resultando una de las más prometedoras y menos costosas. Debido a los datos obtenidos en una evaluación reciente realizada por PEMEX y el IMP en Tabasco occidental (Ledesma *et al.*, 1994), actualmente se considera a la biorremediación como uno de los medios más apropiados para la restauración de muchos sitios contaminados. Así, muchas de las convocatorias realizadas por PEMEX para la recuperación de sitios contaminados especifican la biorremediación.

¹ Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, Km 0.5 Carretera Villahermosa-Cárdenas, Villahermosa, Tabasco, México.
e-mail: susan@mpsnet.com.mx

Recibido: Marzo de 1999.
Aceptado: Junio de 1999.

Desafortunadamente, hay mucha equivocación e información falsa acerca de la biorremediación entre profesionales ambientales y en la industria petrolera mexicana. Una parte de esta equivocación se ha generado por vendedores demasiado entusiastas de los productos bacterianos comerciales, y otra parte probablemente resulta de una carencia general de enseñanza formal de las ciencias biológicas entre profesionales de la industria petrolera. Esta falta de comprensión acerca del manejo apropiado y limitaciones de la biorremediación frecuentemente lleva a resultados erróneos, y a menudo aumenta los costos de restauración. En este artículo se intenta aclarar algunas de las confusiones, presentando ejemplos concretos de la aplicación de biorremediación, así como la ilustración del potencial que ofrece para la restauración de sitios contaminados en el sureste de México.

ANTECEDENTES

Impacto Ambiental en Tabasco

Extensión. En Tabasco es difícil determinar con exactitud la extensión de terreno contaminado debido a los intereses políticos y económicos en la región, la exageración y confusión en que se encuentran. En los últimos años se ha ido politizando el tema de "la contaminación" y existe toda una "industria de la reclamación". Beltrán (1993) reporta que hay aproximadamente 7200 ha afectadas, de ellas más de 90 % está en pantanos o zonas inundables. Más recientemente, PEMEX, con apoyo del IMP, ha identificado aproximadamente 300 ha contaminadas en el estado y 178 presas contaminadas con desechos aceitosos que están proyectadas para restauración (LaJous, 1997). Mucha de esta diferencia se podría atribuir a la definición de "áreas contaminadas", y a los criterios usados para determinarla. Según nuestra experiencia en el campo, e incluso según la elaboración de criterios preliminares de concentraciones benignas de hidrocarburos para diferentes ecosistemas y agroecosistemas en la región (Adams *et al.*, 1996; Olan, 1999), la segunda estimación se acerca más a la realidad.

Con respecto a contaminación de acuíferos, ha sido poca la preocupación hasta la fecha. Esto probablemente se debe a la abundancia de agua que recibe la región [de aprox. 1600 a 2000 mm precipitación anual

(West *et al.*, 1987)] y al uso de agua superficial para consumo doméstico en muchos municipios.

Tipos y fuentes. Son varias las fuentes de contaminación, pero cuatro de ellas se consideran más comunes: 1) lodos de perforación de tipo inversa y recortes, 2) suelo contaminado por derrames de tuberías corroídas, 3) "tiraderos" de desechos semisólidos, y 4) sitios contaminados por descargas de petroquímicas y refinerías.

Los lodos de perforación de tipo inverso se usan durante la perforación de ciertos perfiles. Estos contienen un tipo de aceite muy similar a diesel en concentraciones de aprox. 10 %, y son sumamente arcillosos. Estos desechos típicamente incluyen recortes contaminados. Este material se deposita en presas. Anteriormente, muchas de estas presas eran construidas de materiales permeables y filtraban los hidrocarburos al medio ambiente. La política de la industria petrolera hoy en día es de confinar estos desechos en presas hechas con materiales más impermeables y bajo techo (para prevenir desbordes). Periódicamente, estos desechos son recolectados para tratamiento (Vinalay, 1998).

La segunda fuente importante de contaminación por hidrocarburos de petróleo viene de tuberías corroídas. Existen algunos campos petroleros con alrededor de cincuenta años de antigüedad. Muchos de éstos están en zonas pantanosas o en manglares u otras selvas inundables. Cuando se instalaron los ductos conectando los pozos individuales a baterías de separación, y desde ahí, hasta las petroquímicas y refinerías, no se apreciaba la corrosión anaerobia (debido principalmente a bacterias reductoras de sulfato (Atlas y Bartha, 1987), y como resultado muchos ductos están corroídos y derramándose. Ultimamente, PEMEX está instalando tuberías con protección, o de materiales no corroibles para afrontar este problema. Los tipos de suelos más comúnmente afectados son de zonas bajas, las mismas que presentan altos contenidos de materia orgánica y arcilla [típicamente histosoles y gleysoles (Palma y Cisneros, 1996)]. Los suelos menos afectados son, por lo general, los más aptos para la agricultura, que poseen texturas menos finas y alta fertilidad (como los fluvisoles y algunos vertisoles). Algunos sitios contaminados se encuentran en la planicie costera reciente, entre suelos arcillosos (regosoles). Aunque el número de estos últimos sitios es mucho menor, es más preocupante su contaminación en términos del

probable impacto a acuíferos, debido a su alta permeabilidad.

También existen varios "tiraderos" de desechos aceitosos semisólidos en la región. Debido a las características climatológicas del sureste mexicano (sobre todo la alta precipitación), no está permitido manejar confinamientos industriales en la región, como los que se encuentran en otras partes de la república, como en Mina, NL, o San Luis Potosí (Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-CRP004-ECOL/1993 (1993); Bremer, 1995). Debido a esta limitación, así como la generación de grandes cantidades de desechos aceitosos (lodos de perforación, vegetación pantanosa y suelos contaminados por derrames, y lodos de sistemas para el tratamiento de agua residual en petroquímicas y refinerías), los distritos petroleros han usado presas de pozos petroleros para confinamiento. Regularmente, usan la presa principal de desechos de un pozo petrolero que nunca produjo petróleo, o un pozo antiguo que no produce y que está tapado. Estas presas nunca fueron diseñadas para recibir las cantidades de desechos que se colocan en ellas y muchas no son construidas de materiales impermeables. Muchas veces se termina todo el espacio en la presa pero se sigue depositando desechos en el sitio, sobre la "pera" (plataforma de relleno), al lado de la presa. Este manejo inadecuado de desechos frecuentemente resulta en escurrimientos e infiltraciones de hidrocarburos al medio ambiente cercano.

Además de las fuentes antes mencionadas, existen varias descargas de petroquímicas y refinerías. Muchas de éstas tienen sistemas antiguos de tratamiento de aguas residuales de tipo API (American Petroleum Institute) que separan las fracciones más densas y menos densas del agua por gravedad. Generalmente no son adecuados para controlar la cantidad de aceite que pasa en el flujo, resultando la contaminación de áreas aledañas a estas descargas (comúnmente a pantanos, canales, ríos o lagunas). Estas aguas regularmente contienen sales (de los yacimientos de petróleo) en adición a los hidrocarburos, lo que puede afectar adversamente a los pantanos y cuerpos de agua.

Niveles de contaminación. Los niveles de contaminación varían mucho según las fuentes de hidrocarburos y la antigüedad de las instalaciones petroleras. En el extremo occidente del estado, donde la mayoría de las instalaciones son más antiguas (algunas

alrededor de 50 años), es más común tener derrames de hidrocarburos de tubos corroídos. Por lo general la extensión de un derrame es una mancha de aproximadamente 5 ha, en la cual la concentración de hidrocarburos puede ser hasta de 30 %. Alrededor de estas áreas se extiende la contaminación, pero en concentraciones mucho menores y presentan una toxicidad muy baja hasta ser casi nula (Rodríguez, 1997).

En la zona del estado con actividad petrolera más reciente, en el norte y noreste, las técnicas usadas para cuidar el medio ambiente fueron mejorando a través de los años. En esta zona los ductos son más nuevos, y muchos tienen recubrimientos para reducir la corrosión. Debido a esto, los derrames por corrosión de líneas son mucho menores. Además, el diseño, construcción y manejo de presas de desechos fueron mejorando y se encuentran mucho menos problemas por filtraciones y escurrimientos (Vinalay, 1998). En esta parte del estado es raro encontrar zonas con manchas obvias de aceite. Cerca de pozos petroleros la extensión de hidrocarburos es normalmente mucho menos de 1 ha y con concentraciones menores que 1000 ppm (muchas veces menores que 200 ppm), y que presentan una toxicidad casi nula (Dominguez, 1998).

Cabe mencionar que la nueva política de PEMEX es no dejar desechos aceitosos en presas durante la perforación de pozos. Cuando entra a la fase de perforación que requiere lodos de tipo inverso, éstos se reciclan todo lo posible, y los ya gastados, así como los recortes contaminados, se depositan en una presa de concreto con techo de lámina. (El techo es para prevenir desbordes que resultan de los "aguaceros", o lluvias fuertes de la región.) Periódicamente estos desechos son recolectados para tratamiento en un sitio que es céntrico para varios pozos.

Desarrollo Tecnológico de la Biorremediación

La biorremediación fue usada en una forma no refinada durante muchos años por la industria petrolera de los Estados Unidos de Norteamérica. Posteriormente fue entendida de una manera científica. Esta tecnología surgió del conocimiento empírico de los operadores de las refinerías del petróleo, quienes desecharon los lodos de los separadores tipo API (Instituto Americano del Petróleo) y otros residuos aceitosos en forma de una capa delgada sobre la parte

superior del suelo en un sitio próximo a la refinería. Se dieron cuenta que estos residuos desaparecían durante el curso de varios meses. Previo a una mayor regulación y estricto control, esta técnica, llamada "land farming" (granjeo) fue ampliamente usada sin comprender los procesos que causaban la degradación de los lodos (King *et al.*, 1992).

Científicos académicos e industriales determinaron que algunos microorganismos, sobre todo algunas bacterias, podían utilizar los hidrocarburos del petróleo como alimento y fuente de energía. Posteriormente, algunas investigaciones demostraron que estos microorganismos eran los principales responsables de la descomposición de aceites en el suelo de los "land farm". Durante la biodegradación de los hidrocarburos del petróleo las bacterias oxidan el petróleo a dióxido de carbono, agua y energía, y aproximadamente 50 % del carbono en el petróleo es usado para biomasa bacteriana (Sharabí y Bartha, 1993). Algunos de los hidrocarburos son muy resistentes, especialmente los hidrocarburos poliaromáticos (HPAs), los cuales no son utilizados totalmente, pero pueden ser oxidados parcialmente e incorporados en el material húmico del suelo (Atlas, 1986).

Subsecuentemente, se hicieron investigaciones para determinar las condiciones óptimas de "biodegradación" para reproducir estas condiciones en el campo, y así acelerar el proceso de "land farming". Se descubrió la necesidad de mantener el suelo muy húmedo (aproximadamente de 50 a 75 % de la capacidad de campo), para mantener el contenido de humedad en las células bacterianas. También se descubrió que es muy importante mantener el suelo en condiciones aeróbicas, porque la transformación de los hidrocarburos del petróleo en condiciones anaeróbicas es muy lenta o algunas veces inexistente (Gibson y Subramaina, 1984). De igual modo, la adición de nutrientes inorgánicos, especialmente nitrógeno y fósforo establecen en gran medida un estímulo para la biorremediación. Esto se debe a que los hidrocarburos de petróleo son casi exclusivamente hidrógeno y carbón, por lo que contienen muy pocas cantidades de otros elementos esenciales para las células bacterianas, como son nitrógeno, fósforo, potasio y algunos minerales traza (Luria, 1960).

La mayoría de estos descubrimientos sobre el metabolismo de la biodegradación de hidrocarburos fueron realizados en laboratorios académicos. Posteriormente, ingenieros y otros profesionistas,

trabajando en la industria petrolera misma, así como en empresas dedicadas a la restauración ambiental, implementaron estos descubrimientos en el campo. La mayoría de los diseños usaron el esquema de los primeros "land farm" pero con más control. Usaron membranas plásticas abajo de la celda para no contaminar el suelo nativo e implementaron un sistema de drenaje para mantener condiciones aerobias y recuperar los lixiviados. Por lo general, se usaron tractores para remover el suelo contaminado y airearlo. Los nutrientes se agregaron a la celda en forma de polvo o soluciones que después se incorporaban al suelo contaminado, usando la misma remoción del tractor. Se mantuvo la humedad en la celda bombeando agua sobre el suelo periódicamente y removiéndolo. En el Cuadro 1 se presentan algunos de los requerimientos esenciales de la biorremediación.

PRUEBAS DE FACTIBILIDAD

Antes de empezar un proyecto de biorremediación es preferible realizar un estudio de factibilidad para caracterizar las propiedades específicas del sitio. Estas pruebas ayudan a optimizar las condiciones para el manejo técnico del proyecto, y también son importantes para evitar "sorpresas" que puedan complicar el proyecto, haciéndolo más tardado y costoso. Hay dos aspectos de dicho estudio: 1) la caracterización de las propiedades fisico-químicas del material (suelo, lodo, sedimento) a tratar y del contaminante, y 2) la determinación del potencial de los microorganismos del sitio para descomponer los hidrocarburos.

La caracterización fisico-química consiste en la determinación de varias propiedades importantes para la biorremediación, tales como el pH, la conductividad, textura, carbono orgánico, nutrientes inorgánicos (como N, P, K, Ca, Mg), tipo y concentración de hidrocarburo, así como la toxicidad del material. Este último se puede determinar con la prueba de Microtox (Kanga, 1998). Esta prueba utiliza bacterias marinas bioluminiscentes. Se exponen las bacterias a diferentes concentraciones del material a tratar y se mide la reducción en bioluminiscencia (la producción biológica de cantidades pequeñas de luz). Después, se determina la función de dosis-respuesta para calcular la toxicidad.

Además de estas pruebas, frecuentemente se determina la actividad microbiana del material en su

Cuadro 1. Requerimientos y factores importantes para la biorremediación.

Factor	Observaciones
Tipo de hidrocarburos	Mejor con combustibles, lubricantes, petróleo crudo. Más difícil con aceite hidráulico, hidrocarburos muy viscosos, o hidrocarburos contaminados con otros compuestos (como metales, plaguicidas, etc.).
Tipo de material	Mejor con materiales de textura mediana o franca, con alto contenido de materia orgánica. Más difícil con materiales muy arcillosos.
pH	En zonas pantanosas, o en algunos suelos ácidos de sabana (como los ferrosoles, acrisoles y luvisoles) se puede manejar un pH de 4 a 6 sin mucho problema si se utilizan bacterias nativas. En la mayoría de suelos un pH de 6 a 8 es más adecuado.
Salinidad	Puede variar mucho. Si está en una zona de manglares debe de usar bacterias nativas, las cuales son adaptadas a las condiciones. El suelo contaminado de un marisma puede tener demasiadas sales para usar la biorremediación.
Aireación	Es importante mantener condiciones aerobias debido a que las tasas de biodegradación en condiciones anóxicas son aprox. 50 a 100 veces menores. Esto se logra utilizando un buen sistema de drenaje, y aireando el suelo frecuentemente (mínimo de cada tres días) con maquinaria (como un tractor).
Lixiviados	Es importante tener un buen sistema para colectar los lixiviados de una celda de "land farming". Estos se pueden usar para rehumedecer la celda, así conservando los nutrientes y bacterias en ella.
Techo	Es muy recomendable usar un techo sobre celdas de "land farming" en climas tropicales debido a las lluvias fuertes que pueden inundar una celda.
Nutrientes	Se necesita mantener las concentraciones de nutrientes inorgánicos en el rango de aprox. 100 ppm N, >10 ppm P, y >1 ppm K. El empleo de fertilizantes agrícolas comunes frecuentemente cumple con esta necesidad.
Temperatura	La biorremediación funciona en un rango de temperatura de aprox. 5 a 40 °C, pero es mejor en una temperatura de aprox. 30 a 35 grados, idóneo para climas tropicales.
Bacterias nativas	Es probablemente tan bien o mejor usar las bacterias nativas del sitio debido a que éstas ya están adaptadas a las condiciones particulares del sitio, y su desarrollo cuesta mucho menos que la compra de fórmulas comerciales de bacterias.
Acondicionadores	Para mejorar el drenaje y mantenimiento de humedad en la celda se puede agregar otros materiales como arena, paja, cáscara de nuez, etc.
Humedad	Es necesario mantener la humedad de una celda de "land farming" en el rango de aprox. 50 a 75 % de la capacidad de campo del material a tratar (ya con su acondicionamiento).

estado no alterado. Esto se hace por pruebas como las de respiración microbiana, o por pruebas enzimáticas, como las de catalasa, o deshidrogenasa (Woodward y Day, 1996; Mayo, 1999).

El potencial de los microorganismos para la biodegradación se puede obtener de una manera rápida para sólo ver si existen bacterias en un estado activo, o de una manera más a fondo para, además, determinar las condiciones óptimas de biorremediación y aproximar el tiempo requerido para sanear el sitio.

La prueba rápida se hace en fase líquida, agregando un poco de hidrocarburo a un medio que contiene nutrientes inorgánicos en concentraciones abundantes. A esta mezcla se agrega un poco de suelo, o un filtrado de suelo del sitio y se coloca la mezcla en un agitador para airearla. Se mide el crecimiento de los microorganismos por espectrometría. Esto le ayuda a averiguar si existen bacterias en el sitio que son

capaces de descomponer hidrocarburos, y si su crecimiento es relativamente rápido o lento.

El estudio de biodegradación más intensivo trata de simular las condiciones de campo en laboratorio. En el caso de un tratamiento de suelos, normalmente se coloca el suelo con sus acondicionadores y nutrientes (y a veces bacterias comerciales) en un contenedor, como una charola. Manualmente se mantienen las condiciones de aireación y humedad como se propone hacer en el campo, agregando agua cuando es necesario, y removiendo el suelo para airearlo periódicamente. Puede variar el manejo de varios contenedores para probar la eficiencia de diferentes tratamientos, incluyendo: diferentes concentraciones de nutrientes, empleo de acondicionadores, como paja o arena, uso de un surfactante u otros productos, como fórmulas comerciales de bacterias (si se cree que las bacterias nativas no tendrían una capacidad alta de

biodegradación). De estas charolas se toman muestras periódicamente para determinar concentraciones de hidrocarburos, reducción en toxicidad, y posiblemente otros parámetros, como nutrientes, pH y actividad microbiana.

Este segundo tipo de estudio más intensivo de biodegradación es más costoso y tardado, pero es una inversión en el proyecto que ayuda en optimizar el proceso, determinar cuáles son las mejores condiciones para la biodegradación de hidrocarburos en un sitio en particular, así como estimar la tasa de biodegradación y así el tiempo para terminar el proyecto a escala industrial.

En el sureste mexicano no se están realizando estos tipos de estudios de factibilidad. Las empresas que están saneando sitios típicamente usan su experiencia empírica ganada en otros sitios cuyas características parecen similares. En la actualidad hemos observado que frecuentemente se encuentran problemas con el manejo de la biorremediación, los cuales generalmente tienen fundamento en la falta de experiencia en el manejo de materiales con tan altas concentraciones de materia orgánica o arcilla, concentraciones de hidrocarburos muy altas, y condiciones climáticas tropicales (sobre todo la alta precipitación). Debido a estos problemas es común que no se logren disminuir las concentraciones de hidrocarburos hasta el nivel especificado por contrato, y/o que se atrasen los proyectos hasta 50 % o más.

TRATAMIENTO *IN SITU* VS. *EX SITU*

Las pruebas antes mencionadas son para tratamiento por biorremediación *ex situ*: en donde se excava el material a tratar y se le maneja en un sistema controlado, como una celda de "land farming" o en algún tipo de biorreactor. Pero hay ocasiones en las que es más factible realizar un proyecto de biorremediación *in situ*. En este tipo de proyecto se deja el material contaminado en donde se encuentra (como abajo de un edificio, u otra instalación petrolera, o en el subsuelo, a profundidad), y se tratan de modificar las condiciones en donde está la contaminación para estimular la biodegradación, y así sanear el sitio (Severn *et al.*, 1993). Típicamente, los componentes más limitativos en el subsuelo para la biodegradación de hidrocarburos es un aceptador final de electrones (como oxígeno, nitrato o sulfato) y, a veces, nutrientes inorgánicos (como nitrógeno y

fosfato). La manera más efectiva para proveer estos componentes es a través de pozos para la extracción o inyección de aire (Cuadro 2). En ella se comparan las ventajas y aplicaciones de cada tipo de biorremediación.

Para este tipo de proyecto (*in situ*) se requiere una caracterización mejor aún que en un proyecto de biorremediación *ex situ*. Es necesario caracterizar el sitio en términos de hidrogeología: flujo de agua subterránea, flujo de contaminantes en el subsuelo. A este punto es recomendable buscar profesionistas con experiencia en hidrogeología. Una parte de las pruebas que tienen que hacer, además de la caracterización físico-química antes mencionada, así como la de hidrogeología, es una sobre la zona de influencia de pozos. Conociendo la extensión de influencia de un pozo, según las condiciones del subsuelo, uno puede determinar el número y las localizaciones de pozos que necesita usar.

EMPLEO APROPIADO DE PRODUCTOS BACTERIANOS COMERCIALES

Al iniciar un proyecto de biorremediación frecuentemente se hacen las siguientes preguntas: ¿Qué tipo de bacterias se aplican?, ¿Qué tanto se debe aplicar?, ¿Será efectiva la introducción de bacterias?, y ¿Qué pruebas tiene el vendedor de que el empleo de su fórmula de bacterias será mejor que las nativas? Actualmente, PEMEX solicita propuestas para biorremediación con documentación comprobatoria de la eficiencia de las fórmulas bacterianas que se proponen emplear.

Sin embargo, virtualmente todos los suelos y sedimentos que se han expuesto a hidrocarburos del petróleo contienen bacterias degradadoras de hidrocarburos (King *et al.*, 1992), y es muy probable que sea mejor la adaptación de las condiciones locales del suelo que la importación de bacterias aisladas provenientes de otros campos petroleros, en diferentes suelos y condiciones climáticas. En este contexto, se han elaborado varios estudios en la región en los últimos años que demuestran la presencia de bacterias que son biodegradadoras de petróleo; Ferrer (1997) encontró bacterias nativas capaces de biodegradar hidrocarburos de petróleo en zonas pantanosas en Mecoaacán, Tabasco, en 1994; Adams *et al.* (1995) evaluaron la actividad microbiana aerobia en suelos representativos de la zona petrolera en Tabasco y el

Cuadro 2. Comparación de técnicas de biorremediación *ex situ* vs *in situ*.

	<i>Ex situ</i>	<i>In situ</i>
Aplicación	Contaminación superficial, no profunda, variedad de materiales	Contaminación profunda, abajo de edificios, pavimento, etc.
Procesos	Controlar las condiciones en una celda o biorreactor para optimizar la biodegradación	Modificar las condiciones en el subsuelo para optimizar la biodegradación
Ventajas	Mejor control de condiciones	Menos costosa que <i>ex situ</i> para contaminación a profundidad, y se puede usar abajo de instalaciones
Desventajas	Puede ser más costosa que <i>in situ</i>	Control de las condiciones es más difícil y depende mucho de las condiciones subterráneas
Limitaciones	Casi sin limitaciones	Mucho más difícil en suelos muy arcillosos y con hidrocarburos muy viscosos
Observaciones	Típicamente se hace en celdas de fase sólida o "land farm". Para contaminación superficial de vegetación pantanosa contaminada, algunos lodos de perforación y recortes contaminados, suelo agrícola contaminado	Mejor para contaminación subterránea abajo de plantas petroquímicas. Muy útil para contaminación subterránea cerca de pozos petroleros y otras instalaciones petroleras en suelos arenosos en zonas costeras.

norte de Chiapas; y Mayo (1999) evaluó la actividad microbiana tanto aerobia como anaerobia en zonas pantanosas petroleras.

Desde este punto de vista, puede ser tan efectivo (y probablemente menos costoso) estimular las bacterias nativas de los suelos y sedimentos contaminados que usar bacterias importadas. Experiencias recientes en los Estados Unidos de Norteamérica han indicado, que un proyecto de biorremediación con una fuente externa de bacterias, generalmente se adelanta sólo unos días (King *et al.*, 1992). Comparando a gran escala la remediación nativa con la de importación de bacterias, la recuperación de petróleo combustible No. 6 no indicó una diferencia en tiempo y eficiencia, pero el costo fue aproximadamente diez veces mayor utilizando bacterias introducidas (Adams *et al.*, 1992). Ultimamente, en el estado de Tabasco, se evaluaron varias fórmulas comerciales de bacterias en comparación con la estimulación de bacterias nativas. En este estudio la estimulación de las nativas fue más efectiva para la biorremediación de vegetación pantanosa impregnada con hidrocarburos que el empleo de bacterias foráneas (Adams y Rodríguez, 1997; Rodríguez, 1997).

De cualquier modo, hay ocasiones cuando la inoculación es útil. Esto puede suceder cuando las poblaciones de bacterias nativas son pocas o las que existen no tienen un metabolismo saludable. Esta situación se presenta en tierras de muy baja fertilidad con bajos porcentajes de materia orgánica y poca

captación de agua (tal como desiertos o tierras semiáridas) o en tierras sumamente contaminadas por solventes, gasolina o por hidrocarburos muy ligeros (Adams y Severn, 1993; Nakhjiri y Adams, 1993). En tales casos es conveniente agregar una fuente externa de bacterias.

Alternativamente, se podrían aislar microbios nativos del sitio contaminado y cultivarlos en un estanque fermentador, y subsecuentemente reintroducirlos a su hábitat natural. Esto aumenta en gran escala el crecimiento de bacterias degradadoras de petróleo en los suelos, y asegura que las bacterias aplicadas se ajustarán a las condiciones del sitio. Esto mismo se hizo con mucho éxito para tratar suelos contaminados por lodos de perforación en sitios muy alcalinos en la cuenca del lago Maracaibo en Venezuela (Soto *et al.*, 1997).

Si uno desea utilizar productos bacterianos comerciales, se merece una selección cuidadosa del producto. Frecuentemente, vendedores realizan "demostraciones" de las habilidades especiales de su inóculo, aplicando los microorganismos en un sitio, fertilizado y cultivado. Usualmente, se mide la concentración total de hidrocarburos de petróleo total (TPH), antes, durante y después del tratamiento, para demostrar que la fórmula introducida ha provocado una fuerte reducción en la concentración de hidrocarburos. Estos "casos de demostración" necesitan ser revisados muy cuidadosamente. Usualmente, un testigo científico (una parcela que se

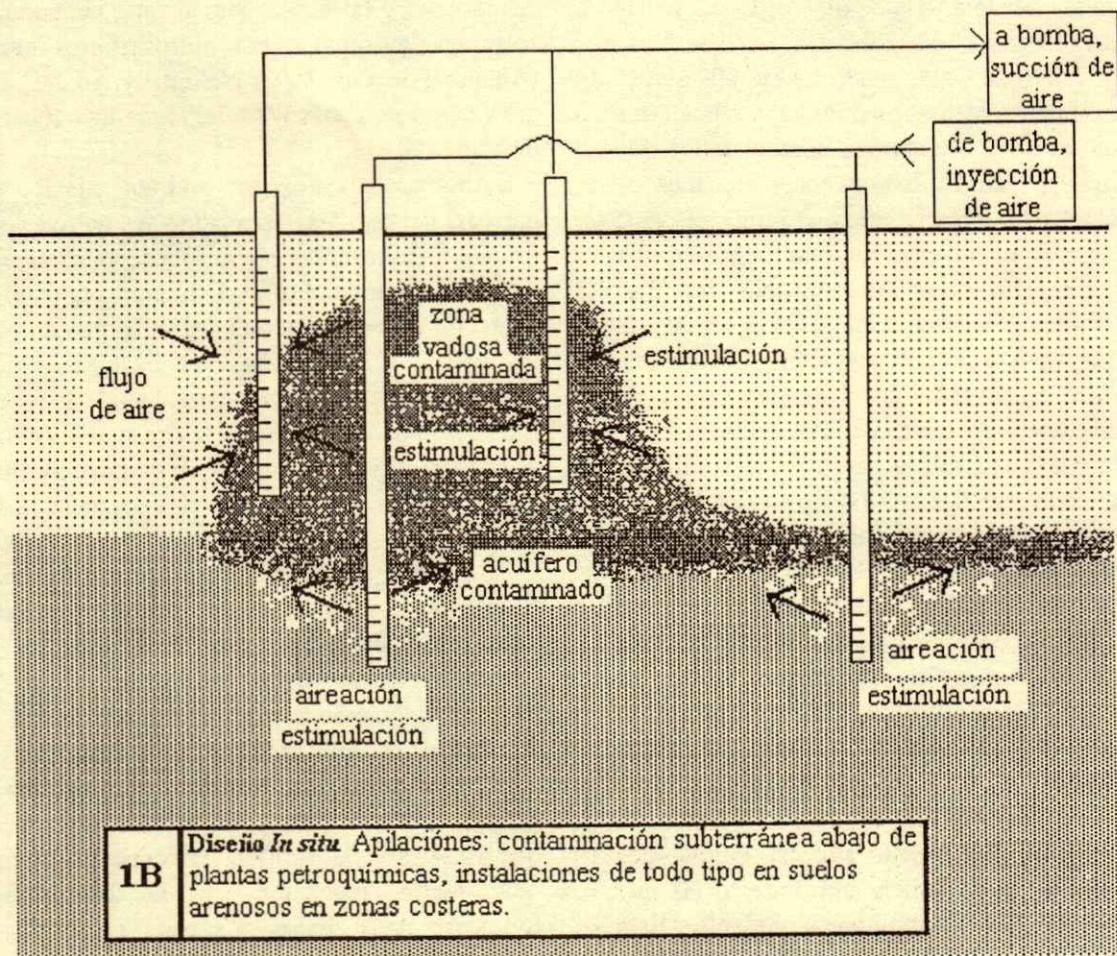
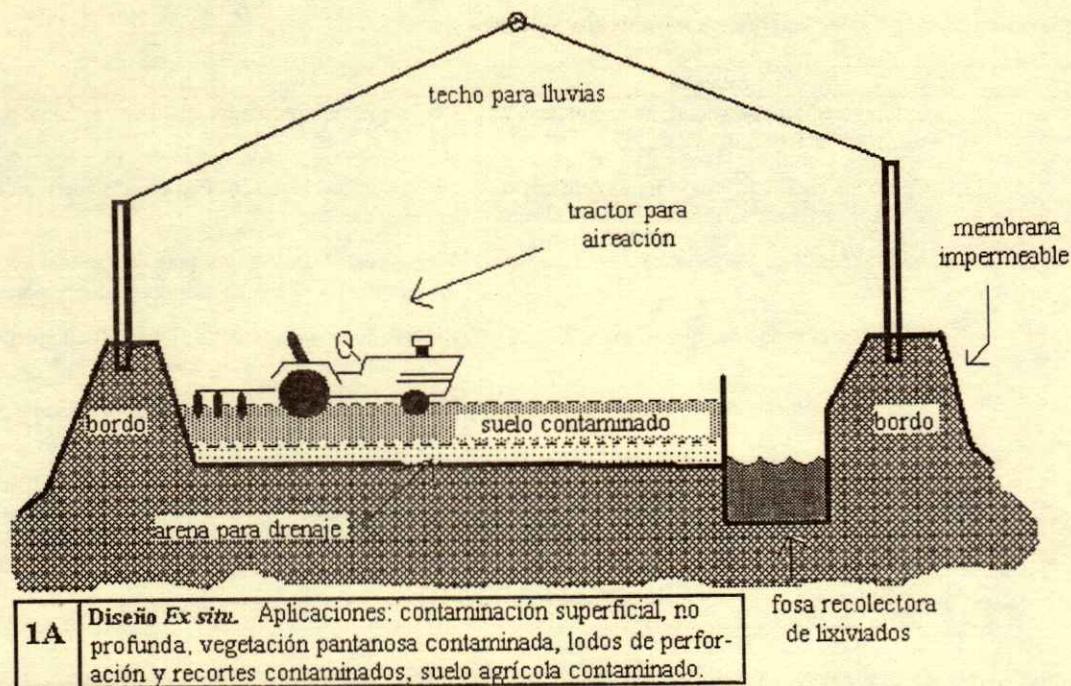


Figura 1. Diseños típicos de biorremediación *ex situ* e *in situ*.

fertiliza y cultiva, pero que no se inocula) no se incluye como parte de la demostración. Cuando ésta es la situación, no es posible determinar si la biodegradación observada se debe a las capacidades avanzadas de la fórmula bacteriana introducida, o a la estimulación de las bacterias nativas. Antes de gastar cantidades fuertes en la compra de una fórmula bacteriana externa (que puede no ser superior a las bacterias nativas) se debe demostrar científicamente que es significativamente mejor, y también efectiva en términos de costo-beneficio.

LIMITACIONES DE LA BIORREMEDIACION

A este punto es importante mencionar que la biorremediación tiene sus limitaciones y no se debe esperar una panacea. Aunque los hidrocarburos en el intervalo de gasolina y diesel (n-alcanos) se biodegradan fácilmente, es relativamente difícil la restauración de sitios altamente contaminados por hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) a través de la biorremediación (Atlas, 1986). Esto se debe principalmente a la viscosidad alta y solubilidad baja de los HPAs, las cuales limitan el área superficial disponible para el ataque de las enzimas bacterianas. Otros factores limitativos pueden ser las concentraciones tóxicas de los hidrocarburos de bajo peso molecular, y las concentraciones altas de metales (que no son biodegradables). En el Cuadro 3 se presentan varios factores que limitan la biorremediación. A causa de esto se debe de considerar la biorremediación como una de las alternativas de tecnologías para el saneamiento de sitios contaminados por hidrocarburos. Se tiene que evaluar su efectividad en términos de costo-beneficio y compararla con otras tecnologías. De cualquier modo, usualmente se compensan estas limitaciones por el ahorro en los costos, en comparación con otras tecnologías de restauración. La biorremediación es típicamente 30 a 40 % del costo del tratamiento químico, la incineración o el relleno industrial (King *et al.*, 1992).

POTENCIAL DE LA BIORREMEDIACION

La biorremediación es un método especialmente atractivo de restauración por varias razones: 1) porque usualmente es mucho menos costosa que las tecnologías alternativas, 2) porque es natural y normalmente no requiere el uso de agentes químicos

(como solventes o detergentes), 3) porque transforma los contaminantes a productos no peligrosos, o los destruye completamente, en lugar de simplemente transferirlos a una fase diferente o a otra localidad (tal como se hace con volatilización y rellenos industriales). Esta tecnología también tiene un gran potencial para restauración en el trópico mexicano, debido a su aspecto biológico, que se favorece fuertemente en condiciones calurosas y húmedas (Brock *et al.*, 1994). Actualmente, existen varios indicadores de que la biorremediación será una tecnología de restauración importante para la región:

- Estudios preliminares de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) indican que la biodegradación pasiva es probablemente responsable de la destoxificación de los desechos del petróleo en varias localidades en el estado de Tabasco (Ferrer, 1997).

- Areas de producción similares en Tamaulipas (cerca de Tampico) demuestran destoxificación de desechos aceitosos, con incorporación del aceite en el humus del suelo y el inicio de revegetación dentro de un período de dos años, todo lo anterior debido a los procesos pasivos (Torres *et al.*, 1993).

- Estudios preliminares de laboratorio en desechos similares de áreas de producción petrolera en Argentina, mostraron que se pueden reducir concentraciones de hidrocarburos hasta en 75 % en 20 días, y se puede reducir la toxicidad aguda hasta cinco veces (Adams y Marczewski, 1993).

- Mucha de la contaminación por hidrocarburos en el sureste de México es provocada por petróleo crudo, que generalmente es más biodegradable que los productos refinados del petróleo (Frankenberger y Johnson, 1982).

- Estudios recientes de la UJAT indican mayor actividad microbiana en suelos moderadamente contaminados que en suelos no contaminados, pero del mismo tipo (Adams *et al.*, 1995). Además, se han aislados microorganismos oleofílicos de varios suelos y lodos de perforación en Tabasco y el norte de Chiapas.

- Investigaciones de biorremediación en el occidente de Tabasco demostraron una descomposición en medios de cultivo (líquido) de casi 70 % de hidrocarburos del tipo fuertemente intemperizado durante un período de 17 días por estimulación de bacterias nativas, resultando en un incremento de bacterias de 70 000 veces (Wilson *et al.*, 1993).

Cuadro 3. Factores importantes en la aplicación de biorremediación de hidrocarburos.

Factor	Observación	Resolución
Concentración alta de hidrocarburos pesados	Area superficial disponible al ataque enzimático bajo	Incrementar período de tratamiento Incorporar emulsificantes en el proceso de tratamiento Emplear una biorremediación en lodos en forma de "land farm"
Co-contaminación con metales pesados	Metales pesados no son biodegradables	Determinar si las concentraciones residuales de metales son aceptables por análisis de riesgo Emplear biorremediación como pretratamiento en una tecnología de aislamiento
Concentraciones tóxicas de hidrocarburos ligeros	Los hidrocarburos de bajo peso molecular presentan propiedades de solventes que disuelven membranas celulares de bacterias	Volatilizar el suelo del sitio antes del inicio del tratamiento por biorremediación Diluir suelo altamente contaminado con suelo poco contaminado o nativo no contaminado
Suelo o sedimento de textura fina	Intercambio bajo de gases puede resultar en condiciones anaerobias y reducir la tasa de reacción	Incorporar materiales de baja densidad (arena, paja, turba, etc.) Emplear una biorremediación en lodos en vez de forma sólida, en forma de "land farm"

- Se han encontrado casos de restauración pasiva muy rápida en selvas inundables, pantanos y manglares en el estado de Tabasco, supuestamente debido a la actividad de bacterias y plantas nativas (Adams *et al.*, 1996; 1997).

- Ultimamente, se han usado bacterias nativas en un proyecto piloto de biorremediación, las cuales funcionaron mejor que varios productos comerciales de bacterias (Adams y Rodríguez, 1997).

Se presentan los detalles de algunos de estos resultados en secciones subsecuentes de este artículo.

CASOS DE ESTUDIO

A continuación se presentan algunos casos de estudio. Estos fueron seleccionados por su relación con la cuestión de biorremediación en el trópico mexicano. El primer caso evalúa la biodegradación en lodos de perforación en la Patagonia, Argentina. Aunque viene de una zona con un clima diferente, se trata de un tipo de desecho típico de los que se encuentran en la perforación de pozos en el sureste mexicano. A causa de los factores climáticos, sobre todo mayor temperatura, es probable que las tasas de biodegradación serían mayores aún en el trópico mexicano que en la Patagonia.

El segundo caso de estudio que se presenta viene de otra localidad tropical, en las islas de Hawaii. Los resultados de este estudio pueden ser similares a los esperados en Tabasco y sus alrededores debido a las similitudes de clima, pero se debe de mencionar que los suelos de Hawaii son, en su mayoría, de otro génesis que los del sureste mexicano, y pueden variar las expectativas. (Los suelos de Hawaii son típicamente de origen volcánico reciente o coral; los de la zona petrolera en el trópico mexicano son principalmente de origen fluvial.) Es importante recalcar que estos casos de estudio se presentan sólo como ejemplos de los posibles resultados que se podrían esperar en México. Cabe mencionar que cada sitio tiene sus particularidades y no es posible generalizar a grandes rasgos. (Por tal razón se recomienda realizar pruebas de factibilidad para cada sitio particular.) Sin embargo, estos casos de estudio son ilustrativos del potencial de la biorremediación, y por esta razón se presentan a continuación.

Evaluación del Potencial de Biorremediación en Campos Petroleros

Como parte de la privatización de la industria petrolera Argentina, varios campos petroleros fueron

caracterizados y se evaluaron opciones del tratamiento. Una de las alternativas investigadas era la biorremediación, en este caso la biorremediación de presas de desecho sin membrana, las cuales contenían principalmente lodos de perforación de emulsión inversa y recortes contaminados. Se solicitó un estudio de factibilidad para estimar el potencial de microorganismos nativos para biorremediación (Adams y Marczewski, 1993).

Las muestras de lodo fueron mezcladas con volúmenes iguales de tierra nativa no contaminada (una marga arenosa), para mejorar condiciones de aireación y reducir la toxicidad. Subsecuentemente, se examinó esta mezcla en una prueba de metabolismo microbiano y reducción de la concentración del petróleo. El total de material utilizado en cada tratamiento fue aprox. 150 g.

La mezcla del lodo-suelo fue tratada con uno de tres métodos: 1) proporcionar humedad únicamente, 2) añadir humedad más fertilizante, y 3) humedad y fertilizante más la adición de un cultivo de bacterias autóctonas aisladas de lodos de perforación del sitio.

Se midió el metabolismo microbiano semanalmente. Así también, se midieron concentraciones del petróleo y toxicidad aguda por el ensayo Microtox (Bulich *et al.*, 1992) antes y después de tres semanas de incubación.

Se muestran los resultados del estudio en el Cuadro 4 y la Figura 2. Como se puede observar en el cuadro, el tratamiento por biorremediación resultó en una reducción de hidrocarburos de petróleo de casi 1000 partes por millón (ppm) en tres semanas, y una reducción en toxicidad de más de cinco veces. Durante este período la actividad microbiana logró crecer en forma logarítmica (Figura 2). Se estimó que la biorremediación podría reducir la toxicidad hasta niveles aceptables (1000 ppm) y sanear el sitio hasta niveles internacionales [Model Toxics Control Act Cleanup Regulation, Cap. 173-340 WAC, Washington State Department of Ecology (1991a; b)] en aproximadamente seis meses. Estos resultados proporcionaron la información necesaria para proceder con biorremediación como una opción de tratamiento.

Evaluación del Potencial de Biorremediación en Suelos Tropicales

Aunque la mayoría de los proyectos de biorremediación se han realizado en climas templados,

y se desarrollaron como tecnología en ese clima, las investigaciones sobre el potencial de biorremediación en áreas tropicales han empezado a rendir resultados favorables. Se efectuó uno de los primeros estudios en ciertas áreas de Hawaii, donde investigadores han estudiado la habilidad de microorganismos nativos para degradar hidrocarburos de petróleo (Robert e Israel, 1994). Aislaron varias cepas de bacterias oleofílicas incluyendo *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas oleovorans*, *Pseudomonas fluorescens* y especies de *Acinetobacter* y de *Flavobacterium*; también varias especies gram positivas. Estos microorganismos son de los mismos tipos y géneros que se conocen por su habilidad de degradar hidrocarburos en climas templados. Fueron capaces de utilizar varios tipos de hidrocarburos alifáticos y aromáticos (diesel, aceite mineral, hexadecano, fenantreno) y fueron estimulados por la adición de fertilizante y diesel (aprox. 1000 ppm) como una fuente de alimentación. En estos últimos experimentos se incrementaron las poblaciones de bacterias oleofílicas y se aumentó la actividad microbiana considerablemente. Muestras de áreas contaminadas con diesel, aceite pesado, y de áreas de cultivos de piña y maíz mostraron incrementos en la población microbiana de 140, 72, 100 y 7.7 veces, respectivamente. De igual manera, el incremento en la actividad

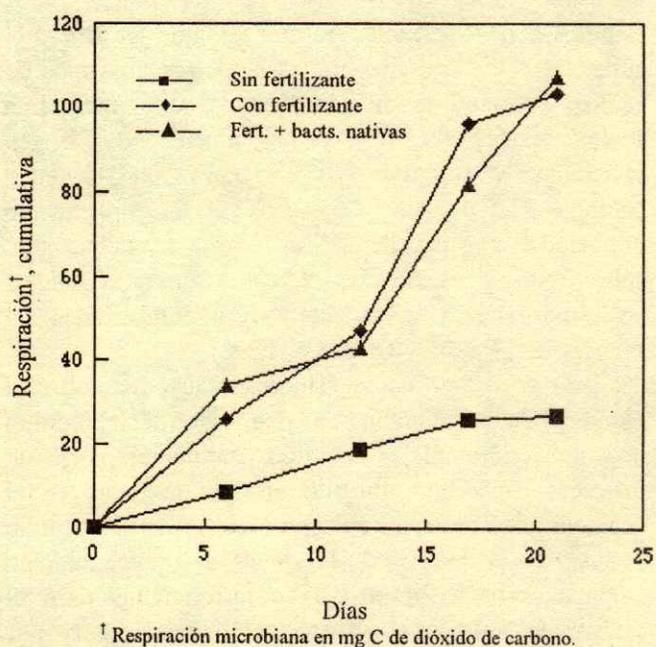


Figura 2. Estimulación de bacterias degradadores de petróleo de la Patagonia (Adams y Marczewski, 1993).

Cuadro 4. Reducción en concentraciones del petróleo y toxicidad en lodos de perforación tratados por biorremediación en Argentina.

Parámetro	Suelo nativo	Lodos de perforación	
		antes de biorremediación	después de biorremediación
Toxicidad relativa (CE ₅₀ [†] Suelo nativo/ CE ₅₀ de la muestra)	1 por definición, CE ₅₀ >100 000 ppm	60.5 (100 000 ppp/ 1653 ppm)	11.6 (100 000 pppm/ 8594 ppm, reducción de 5.2 veces)
Concentración de hidrocarburos (ppm) intervalo de: gasolina/diesel	0	331/7790	240/6970 (reducción de 91/820 ppm, respectivamente, o un total de -911 ppm, =12%)

[†]CE₅₀ = Concentración efectiva 50, la concentración de muestra que reduce la bioluminiscencia 50 % en el bioensayo de Microtox, con *Photobacterium phosphoreum* (ver Bulich *et al.*, 1992; Kanga, 1998 por detalles).

Datos presentados del tratamiento con mayor actividad microbiana (ver texto).

microbiana (medida por el ensayo enzimático de deshidrogenasa) fue de >320 % en la muestra contaminada con aceite pesado, de 232 % en el cultivo de piña, y de 325 % en la muestra del cultivo de maíz.

Evaluación del Potencial de Biorremediación en el Sureste Mexicano

Además de los estudios preliminares en Hawaii, también se han realizado investigaciones recientes sobre el potencial de biorremediación en suelos tropicales en el sureste de México (Wilson *et al.*, 1993; Ledesma *et al.*, 1994; Adams *et al.*, 1995). Estos estudios son importantes porque, aunque Hawaii y el sureste mexicano tienen climas similares, los tipos de suelos y su hidrología son bastante diferentes. Los suelos hawaianos son principalmente de origen volcánico y relativamente jóvenes en términos geológicos (Robert, 1993). Los suelos típicamente impactados por petróleo en el sureste mexicano son, sobre todo, de depósitos recientes aluviales, suelos costeros arenosos, o terrazas muy intemperizadas del Pleistoceno (Palma y Cisneros, 1996).

Uno de los primeros estudios realizados sobre el potencial de biorremediación en la región fue elaborado por una compañía consultora ambiental para un proyecto específico ubicado en los pantanos en el occidente de Tabasco (Wilson *et al.*, 1993). El estudio se basó en el análisis de las tasas de biodegradación empleando bacterias nativas e introducidas para el saneamiento de agua y vegetación impregnada por hidrocarburos. Este estudio determinó que la biorremediación era una alternativa viable para la recuperación del agua pero no para la recuperación de

raíces contaminadas. En el campo, la biorremediación resultó en una reducción de hidrocarburos totales de petróleo de aprox. 3400 ppm a aprox. 70 ppm en un período estimado de un mes.

Brevemente después de este estudio, otras dos compañías se contrataron para realizar proyectos de biorremediación en la misma parte del estado, incluyendo pantanos. La estrategia era mezclar vegetación impregnada de aceite con lodos subyacentes y extraer la mezcla, dejando escurrir el agua y aceite flotante. Posteriormente, se pusieron los sólidos en celdas delgadas de "land farming", se aplicaron bacterias y nutrientes. Además, frecuentemente se araba el "suelo" con tractor. Aunque los datos disponibles no están completos, ambas compañías eran capaces de lograr un saneamiento satisfactorio en un período cercano a un año. La vida media de los hidrocarburos en las bioceldas era aproximadamente de 80 a 140 días (Ledesma *et al.*, 1994).

Para evaluar el potencial de la biorremediación (y biodegradación pasiva) de una manera más sistemática, realizamos un proyecto en el cual se determinó la actividad microbiana (por respiración) en suelos típicos de los contaminados en la región, así como en recortes de perforación (Adams *et al.*, 1995) (Cuadro 5). Se colectaron muestras de las siguientes áreas: sabana, área inundable estacionalmente, pantano de espadaño (*Typha* sp), pantano de "molinillo" (*Cyperus giganteus*), manglar, y franja costera arenosa. En la Figura 3 se presentan resultados de muestras contaminadas y no contaminadas de los mismos sitios en pares. En la mayoría de los casos la actividad microbiana era mayor en la muestra contaminada, lo que sugiere que la contaminación por hidrocarburos

Cuadro 5. Características de sitios seleccionados para el estudio de actividad microbiana en los suelos y lodos de perforación del sureste de México.

Muestra	Localización	Clasificación tentativa de suelos	Condiciones ambientales
A1	Campo Cactus 61A Reforma, Chiapas	Luvisol crómico (suelo muy intemperizado, rojizo y ácido, bajo en materia orgánica)	Pasto esparcido, sabana
A2	Campo Cactus 61A	Lodos de perforación, base de aceite	Fosa de retención
B1	Campo Luna 22 Frontera, Tabasco	Regosol eútrico (suelo costero arenoso, ligeramente enriquecido en materia orgánica)	Pasto denso
B2	Campo Luna 22	Lodos de perforación, base de aceite	Fosa de retención
C1	Campo Mecoacán 79 Mecoacán, Tabasco	Gleysol, epipedon mólico (suelo superficial, oscuro, rico en materia orgánica)	Inundable estacionalmente, vegetación acuática/pastizales
C2	Campo Mecoacán 79	Gleysol, epipedon mólico	Ligeramente contaminado, petróleo crudo y lodos de perforación
D1	B. Juárez, área 7 km al norte de la carretera Fed. 180, Tabasco	Gleysol, epipedon hístico (suelo superficial, rico en fibras orgánicas)	Pantano de espadaño
D2	Campo Sánchez Magallanes 159, Villa B. Juárez, Tab.	Gleysol, epipedon hístico	Pantano alterado, molinillo con popal, moderadamente contaminado, petróleo crudo y lodos de perforación
E1	Campo Mecoacán 48 Mecoacán, Tabasco	Histosol, epipedon "fibrico", (suelo orgánico compuesto principalmente por fibras)	Pantano de espadaño
E2	Mecoacán 47	Histosol, epipedon "fibrico"	Pantano de espadaño con algo de molinillo, fuertemente contaminado por petróleo crudo y lodos de perforación
F1	Campo Mecoacán 14 Mecoacán, Tabasco	Histosol, epipedon "hémico", (suelo orgánico denso, compuesto por vegetación parcialmente putrificada)	Principalmente mangle negro
F2	Campo Mecoacán 51	Histosol, epipedon "hémico"	Principalmente mangle negro; en "zona muerta", fuertemente contaminada, petróleo crudo/lodos de perforación

tiene un efecto estimulante en general. También parece ser que hay un incremento general en actividad microbiana en los suelos que típicamente tienen contenidos mayores de materia orgánica. Experimentos más recientes en nuestro laboratorio han confirmado esta tendencia. La actividad microbiana era mayor en pantanos y manglares, que típicamente son altos en contenido de materia orgánica; así también era baja en suelo de la sabana y en suelo arenoso costero, normalmente bajos en materia orgánica.

CONCLUSIONES

La biorremediación, como una tecnología, tiene un gran potencial en la recuperación de sitios contaminados por hidrocarburos de petróleo en el

tropico mexicano, y generalmente es más barata que otras alternativas de restauración. De cualquier modo, se necesita considerar los factores determinantes para un sistema de biorremediación, y se deben entender las limitaciones de esta tecnología y compensarlas. En este contexto es recomendable elaborar un estudio de factibilidad para evitar problemas en el proyecto y para optimizar las condiciones del tratamiento.

Se puede utilizar la biorremediación para el tratamiento de residuos característicos aceitosos de los hidrocarburos de petróleo, ya que reduce fuertemente las concentraciones de hidrocarburos y su toxicidad. Investigaciones del potencial de biorremediación en suelos tropicales indican, que hay microorganismos degradadores de petróleo en ellos, éstos pueden usar una gran variedad de hidrocarburos como fuentes de

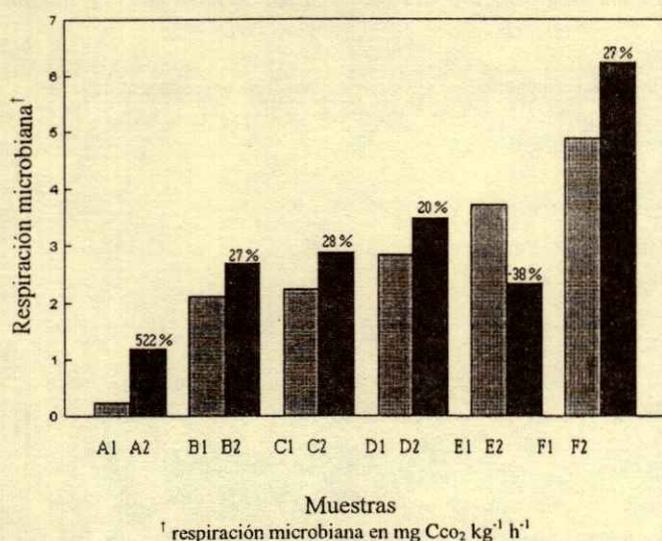


Figura 3. Actividad microbiana en suelos del sureste mexicano.

Actividad microbiana determinada por respiración. Se presentan pares de determinaciones; cada par viene del mismo sitio. La primera determinación en cada par es en suelo no contaminado, y la segunda es de suelo contaminado o recortes de perforación contaminados. Los valores indicados arriba de la segunda columna en cada par representan el incremento (o disminución) en actividad relativa a la muestra no contaminada del mismo sitio (Adams *et al.*, 1995).

alimento, y además pertenecen a los mismos géneros científicos que las bacterias oleofílicas de regiones templadas. Estas se estimulan considerablemente en presencia de hidrocarburos.

Los estudios recientes, realizados en el trópico petrolero mexicano, indican la existencia de bacterias nativas degradadoras de petróleo en suelos regionales y recortes de perforación, las cuales se adaptan a las condiciones climáticas del trópico. Además, la contaminación por petróleo tiende a estimular las poblaciones microbianas de esta región. La aplicación de estos resultados tiene un gran potencial para la remediación de los sitios impactados por hidrocarburos en la región. Propiamente aplicada, la utilización de microorganismos nativos en la biorremediación debe resultar en un aumento de la eficiencia en la remediación a un costo significativamente bajo.

Es importante adecuar y desarrollar tecnologías propias de la zona tropical petrolera mexicana. Estos deben de considerar las características propias del trópico (tales como la alta temperatura y considerable precipitación) y, en donde es posible, aprovechar de éstas. Las condiciones climáticas de esta zona son idóneas para la biodegradación. Ahora se requiere elaborar las tecnologías (incluyendo su diseño,

implementación y manejo) que aprovechen estas mismas. Además, se necesita seguir experimentando y observando para encontrar otros procesos del trópico importantes para la restauración, [tales como: foto-oxidación, oxidación química, y la fitorremediación (la remediación por plantas)] y buscar cómo utilizarlos.

Para esto es importante, también considerar los factores socio-económicos de la región. Muchas de las tecnologías de remediación que vienen de países desarrollados están elaboradas para realizar una obra en poco tiempo, empleando poco espacio. Esto es debido a que muchas de estas tecnologías se aplican en zonas urbanas, en donde el espacio es limitado, y el potencial de una propiedad de rendir ingresos (como rentas, o de la producción de una planta industrial, por ejemplo) es alto. Por tal razón se sacrifica economía por tiempo y la reducción en el espacio requerido. En la zona petrolera del trópico mexicano, la gran mayoría de localizaciones contaminadas por hidrocarburos son en áreas rurales, y muchas de ellas en zonas bajas. Estas áreas generalmente son pocas aprovechables para la ganadería y agricultura, y su rendimiento es relativamente bajo. En esta situación no debe de haber prisa para su restauración. Aquí sería mejor desarrollar tecnologías menos rápidas, y más económicas (como la biorremediación y fitorremediación). En este contexto sería mejor buscar tecnologías de biorremediación menos intensivas en su aplicación, que son más tardadas, pero tan efectivas y mucho menos costosas. Algunas posibilidades podrían ser algún tipo de composteo, o una combinación de mitigación física con fitorremediación. Entre éstas están muchas posibilidades para aprovechar del gran potencial que presenta la biorremediación de petróleo en el trópico mexicano.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a Amy Saberiyan por su ayuda técnica con la evaluación de actividad microbiana en suelos argentinos, a Dale Kramer por su ayuda administrativa en pruebas de inóculos comerciales vs. inóculos nativos, Dr. Shawn Severn por la dirección del proyecto general, y al Dr. Françoise Robert y S. Israel por compartir sus datos acerca del potencial de biodegradación en tierras de Hawaii.

De la misma forma agradecemos a Laudiel Vinalay Carrillo, Manuel Arias Rodríguez, y Roberto López Ramírez por su ayuda técnica en la evaluación de

tierras del trópico de México, a Gaspar López Ocaña, por su participación en capturar y editar este trabajo, y a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, y a PEMEX Exploración y Producción, Región Sur por su apoyo económico y administrativo.

LITERATURA CITADA

- Adams, R. y S. Marczewski. 1993. Biofeasibility study, YPF project, Patagonia region, Argentina. Reporte no publicado. RZA AGRA, Inc. Kirkland, Washington. 11-08952.
- Adams, R. y A. Rodríguez. 1997. Evaluación comparativa de productos para la biorremediación de sitios impactados por hidrocarburos de petróleo en el trópico húmedo. IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente. RICA/Univ. Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. 11-13 Dic.
- Adams, R. y S. Severn. 1993. Bio-treatment and land farming study, Canadian Forces Base, Shilo, Manitoba. Reporte no publicado. RZA AGRA, Inc., Kirkland, Washington. WX-03275.
- Adams, R., D. Kramer, M. Johnston y S. Severn. 1992. A full scale comparison of introduced vs. indigenous microorganisms for bioremediation of a bulk plant. Memorias del VI Anual Conference of the Colorado Hazardous Wastes Management Society. Denver, Colorado, 22 y 23 Oct.
- Adams, R.H., G. Armenta y L. García. 1995. Bioremediation in the petroleum producing region of southeast Mexico: microbial activity in contaminated soils and spent drilling muds. Memorias del Second Inter-American Environmental Congress. 30 Aug. a 1 Sept. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Monterrey, NL, México.
- Adams, R.H., L. Vinalay y V.I. Domínguez. 1996. Diagnóstico ambiental de localizaciones de pozos petroleros pertenecientes al complejo Miguel Ángel Zenteno Basurto ubicados en la cuenca del Río González y la zona lacustre Julivá - Santa Anita. Reporte no publicado. Convenio de cooperación y apoyo a la investigación No. 001-96. PEMEX Exploración y Producción - Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa.
- Adams, R.H., O. Castillo, J. Zavala y D. Palma. 1999. Recuperación con mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) de áreas impactadas por hidrocarburos y su manejo como agrosilvo-ecosistema en la zona costera de Huimanguillo y Cárdenas, Tabasco. Reporte final de proyecto relativo al uso sustentable y conocimiento de recursos biológicos de la zona Maya de México. CONABIO/Fundación MacArthur. No. Ref. MO76.
- Atlas, R.M. 1986. Biodegradation of hydrocarbons in the environment. pp. 211-222. In: G.S. Omen (ed.). Environmental biotechnology, reducing risks from environmental chemicals through biotechnology. Plenum Press, Nueva York.
- Atlas, R.M. y R. Bartha. 1987. Microbial ecology: fundamentals and applications. (2a ed.). The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. Menlo Park, California.
- Beltrán, J.E. 1993. Los impactos del petróleo. In: Tabasco: Realidad y perspectivas. Gobierno del Estado de Tabasco. Villahermosa.
- Bremer, M.H. 1995. Inventario nacional de sitios para confinamiento de residuos peligrosos. Memorias de la II Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente. 29 Ago. - 1 Sept. RICA/Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Monterrey, NL, México.
- Brock, T.D., M.T. Madigan, J.M. Martinko y J. Parker. 1994. Biology of microorganisms, 7th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey.
- Bulich, A.A., M.W. Greene y S.R. Underwood. 1992. Measurement of soil and sediment toxicity to bioluminescent bacteria when in direct contact for a fixed time period. Memorias de Water Environment Federation, 65th Annual Conference & Exposition, Nueva Orleans, Louisiana, 20-24 Sept.
- Diario Oficial de la Federación, 22 octubre de 1993; Norma Oficial Mexicana NOM-CRP004-ECOL/1993.
- Domínguez R., V.I. 1998. Problemática geomorfológica por desechos de perforación petrolera en la zona lacustre Julivá-Santa Anita, Tabasco. Tesis de Licenciatura en Ing. Ambiental, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Ferrer, M.I. 1997. Selección de tecnologías de restauración biológica para lodos de perforación en tres campos petroleros. Tesis de Maestría en Ciencias con especialidad en Ing. Ambiental, Instituto Politécnico Nacional, México, DF.
- Frankenberger, W.T. y W.B. Johnson. 1982. Influence of crude oil and refined petroleum products on soil dehydrogenase activity. J. Environ. Qual. 11: 602-607.
- Gibson, D.T. y V. Subramaina. 1984. Microbial degradation of aromatic hydrocarbons. pp. 52-83. In: D.T. Gibson (ed.). Microbial degradation of organic compounds. Marcel Dekker, Inc., Nueva York.
- Kanga L., K. 1998. Evaluación de técnicas para el manejo de humedad en celdas de biorremediación para la restauración de sitios impactados por hidrocarburos en el sureste de México. Tesis de Licenciatura en Ecología, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- King, R.B., G.M. Long y J.K. Sheldon. 1992. Practical environmental bioremediation. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- LaJous Vargas, A. 1997. Compromisos de Pemex con la protección del medio ambiente en el estado de Tabasco. Inauguración de la construcción de una nueva planta procesadora de gas natural en el C.P.Q. Ciudad Pemex, 26 de Julio de 1997. Presentado en *Presente*, Villahermosa, Tabasco. 14-15 A
- Ledesma, J.L., L. Arroyo y J.L. Hernandez. 1994. Toxicología ambiental, análisis de la contaminación ambiental por derrames de hidrocarburos en el estado de Tabasco y su biorremediación por medio de tecnología de punta. Reporte no publicado. Instituto Tecnológico de Minatitlán. Minatitlán, Veracruz.
- Luria, S.E. 1960. Data for a bacterium, *Escherichia coli*. pp. 5-35. In: I.C. Gunsalus y R.Y. Stainer (eds.). The Bacteria. Vol. 1, Cap. 1. Academic Press, Nueva York.

- Mayo, T.M. 1999. Adecuación y evaluación del ensayo de deshidrogenasa para investigación diagnóstica en tierras bajas de Tabasco. Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. En revisión.
- Nakhjiri, K.S. y R. Adams. 1993. Results of biofeasibility test, review of analytical data, and suggested remediation technologies, Sea-Tac Airport, Employee North Parking Lot. Reporte no publicado. RZA AGRA, Inc. Kirkland, Washington. W-8865.
- Olan C., D. 1999. Estimación de concentraciones benignas de hidrocarburos alifáticos y poliaromáticos cancerígenos en el activo petrolero de Cinco Presidentes, Veracruz y Tabasco. Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. En Revisión.
- Palma L., D. y J. Cisneros. 1996. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Vol. 1 Fundación PROCEDE Tabasco A.C. Villahermosa, Tabasco, México.
- Palma L., D., J. Cisneros, A. Trujillo, N. Granados y J.E. Serrano. 1985. Caracterización de los suelos de Tabasco. Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaria de Educación, Cultura y Recreación, Dirección de Educación Superior e Investigación Científica, Departamento de Educación Superior.
- Robert, F.M. 1993. Bioremediation potential of petroleum hydrocarbon-contaminated soils under tropical conditions. Propuesta de investigación para el Hawaii State Water Research Institute Program (SWRIP), Water Resources Research Act, Section 104.
- Robert, F. y S. Israel. 1994. Response of bacterial populations to petroleum hydrocarbon contamination in tropical soils. Presentación en el 94th Am. Soc. Microbiol. Gen. Meeting, 23-27, Mayo, Las Vegas, Nevada.
- Rodríguez, A. 1997. Diseño y evaluación de los métodos físicos y de biorremediación aplicables a las áreas afectadas por las actividades de exploración y producción petrolera en los campos Sánchez Magallanes, Cinco Presidentes, San Ramón, Ogarrio, y La Venta en el Distrito de Agua Dulce, Región Sur. Reporte no publicado. PEMEX Exploración y Producción, Contrato No. CORS-S-244/94. Villahermosa, Tabasco.
- Severn, S.R.T., R.H. Adams y C.A. Hutley. 1993. Bioremediation: strategies to running successful projects. Reporte empresarial. RZA AGRA, Inc., Kirkland, Washington.
- Sharabi, N.E.-D. y R. Bartha. 1993. Testing some assumptions about biodegradability in soil as measured by carbon dioxide evolution. *Appl. Environ. Microbiol.* 59: 1201-1205.
- Soto A., G.J., A. Gurges F., C. Cárdenas, A. Arango y S. Delgado. 1997. Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburo utilizando bacterias autóctonas, Maracaibo. IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente. RICA/anivo Simón Bolívar, Caracas Venezuela. 11-13 Dic.
- Torres, C., R. Adams, D. Sergent y M.I. Ferrer. 1993. Propuesta para la restauración de suelo y lodos contaminados por hidrocarburos, en Altamira, Tamaulipas. Propuesta empresarial. SHB AGRA de México, S.A. de C.V., México, DF. Proposal no. 930501 MX.
- Vinalay C., L. 1998. Diagnóstico sobre el manejo y disposición de lodos de perforación en la zona lacustre Julivá-Santa Anita, Tabasco, México. Tesis de Licenciatura en Ing. Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Washington State Department of Ecology, Toxics Cleanup Program. 1991a. Guidance for remediation of releases from underground storage tanks. Doc. no. 91-30, Olympia, Washington.
- Washington State Department of Ecology, Toxics Cleanup Program. 1991b. The model toxics control act cleanup regulation, Chapter 173-340 WAC, Olympia, Washington.
- West, R.C., N.P. Psuty y B.G. Thom. 1987. Las tierras bajas de Tabasco en el sureste de México. Gobierno del Estado de Tabasco, Villahermosa.
- Wilson, J.J., S. Taylor y M.D. Bishop. 1993. Laboratorio y resultados de la aplicación en el sitio de tratamientos de biorremediación y desorción térmica para la restauración de derrames intemperizados de petróleo en el estado de Tabasco, México. Presentado en Petro y Chem, 4 Nov., México, DF.
- Woodward, R. y M.J. Day. 1996. Intrinsic bioremediation: preparation, planning, monitoring, control. *In*: PEMEX Seminar, May 1996. Arco Chemical Co., Applied Hydrology Associates, Inc, Sierra Environmental Services, Inc. Memorias del seminario: Las actividades petroleras en áreas bajas de importancia ecológica. PEMEX, Villahermosa, Tab. 17-19 de Mayo.