

ISSN 0187 - 5779

TERRA

ENERO - MARZO DE 1998 • VOLUMEN 16 • NUMERO 1



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 Alvarez 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 Cabrales

Dr. Xavier X. Uvalle Bueno

Dra. Edna Alvarez 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.

Organo Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Enero - Marzo de 1998 Volumen 16 Número 1

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
María Elena Aguilar Sánchez
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
M.C. 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 Requero	España
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Rafael Villegas	Cuba
Dr. Eduardo Zaffaroni	Brasil

TERRA

ENERO - MARZO DE 1998 • VOLUMEN 16 • NUMERO 1

DIVISION I

- 1 Clasificación de tierras campesina para la generación y transferencia de tecnología agrícola entre pequeños productores: Caso del maíz en la región central de Veracruz.
Ricardo Cruz Balcázar, Víctor Volke Haller, Antonio Turrent Fernández y David Pájaro Huertas
- 11 Carbonato de calcio en los suelos del ex-lago de Texcoco.
Ma. del C. Gutiérrez Castorena, G. Stoops G. y C. A. Ortiz Solorio
- 21 Estimación del tonelaje de partículas de suelo que potencialmente contribuyen a la contaminación del aire en el área metropolitana de Monterrey, México.
José Návar y Eduardo Treviño

DIVISION II

- 33 Efecto de reguladores del crecimiento y tipo de sustrato en el enraizamiento de *Kalanchoe*.
E. Villanueva R., P. Sánchez G., N. Rodríguez M., E. Villanueva N., E. Ortiz M. y J. A. Gutiérrez E.
- 43 Aplicación de ácido salicílico para incrementar el rendimiento agronómico en tres variedades de trigo.
Rodrigo López Tejeda, Víctor Camacho Rodríguez y Marco Antonio Gutiérrez Coronado
- 49 Evaluación de ácidos carboxílicos y nitrato de calcio para incrementar calidad, cantidad y vida de anaquel en tres tipos de melón.
Luis F. Román Moreno y Marco Antonio Gutiérrez Coronado

- 55 Colonización micorrízica arbuscular, actividad fosfatásica y longitud radical como respuesta a estrés de fósforo en trigo y triticale cultivados en un Andisol.
Portilla Cruz I., Molina Gayosso E., Cruz-Flores G., Ortiz Monasterio I. y Manske G. G. B.
- 63 Estudio de adaptabilidad del triticale a diferentes dosis de calcio y fósforo en Andisoles.
G. Cruz-Flores, S. Aviles Marín y J. C. Cortés Castelán
- 71 Harina de hueso adicionada a suelos de la zona cafetalera de Los Altos de Chiapas, México.
Luciano Pool Novelo, Noé S. León Martínez y Víctor Pérezgrovas Garza
- 79 Modelo de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de fertilización para cultivos.
Víctor Volke Haller, Jorge D. Etchevers B., Adán Sanjuan Ramírez y Tomás Silva Palomino

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

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

Dr. Víctor 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
January - March, 1998 Volume 16 Num. 1

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
María Elena Aguilar Sánchez
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
M.C. 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

JANUARY - MARCH, 1998 • VOLUME 16 • NUMBER 1

DIVISION I

- 1 Peasant land classification for the generation and transference of agricultural technology among small producers: Maize in the central region of Veracruz.
Ricardo Cruz Balcázar, Víctor Volke Haller, Antonio Turrent Fernández, and David Pájaro Huertas
- 11 Calcium carbonate in the soils of Texcoco ex-lake.
Ma. del C. Gutiérrez Castorena, G. Stoops G., and C. A. Ortiz Solorio
- 21 Estimating tonnage of soil particles which potentially contribute to air pollution in the metropolitan area of Monterrey, Mexico.
José Návar and Eduardo Treviño

DIVISION II

- 33 Growth regulators and type of growing medium effect on the rooting of *Kalanchoe* cuttings.
E. Villanueva R., P. Sánchez G., N. Rodríguez M., E. Villanueva N., E. Ortiz M., and J. A. Gutiérrez E.
- 43 Use of salicylic acid sprays on wheat to increase yield in three wheat varieties.
Rodrigo López Tejeda, Víctor Camacho Rodríguez, and Marco Antonio Gutiérrez Coronado
- 49 Evaluation of carboxylic acids and calcium nitrate to increase quality, yield, and shelf life of three types of muskmelon.
Luis F. Román Moreno and Marco Antonio Gutiérrez Coronado

DIVISION III

55 Mycorrhizal arbuscular colonization, phosphatase activity and root length as response to the phosphorus stress in wheat and triticale cultivated in an Andisol.

Portilla Cruz I., Molina Gayosso E., Cruz-Flores G., Ortiz Monasterio I., and Manske G. G. B.

63 Adaptability study of triticale to different levels of calcium and phosphorus in Andisols.

G. Cruz-Flores, S. Aviles Marín, and J. C. Cortés Castelán

71 Bone meal applied to soils of the coffee plantation area in Los Altos de Chiapas, Mexico.

Luciano Pool Novelo, Noé S. León Martínez, and Víctor Pérezgrovas Garza

79 Nutrient balance model to determine fertilizer recommendations for crops.

Víctor Volke Haller, Jorge D. Etchevers B., Adán Sanjuan Ramírez, and Tomás Silva Palomino

CLASIFICACION DE TIERRAS CAMPESINA PARA LA GENERACION Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA AGRICOLA ENTRE PEQUEÑOS PRODUCTORES: CASO DEL MAIZ EN LA REGION CENTRAL DE VERACRUZ

Peasant Land Classification for the Generation and Transference of Agricultural Technology among Small Producers: Maize in the Central Region of Veracruz

Ricardo Cruz Balcázar¹, Víctor Volke Haller², Antonio Turrent Fernández² y David Pájaro Huertas²

RESUMEN

La clasificación de tierras campesina es un procedimiento de estratificación del ambiente relativamente rápido y barato, que no requiere de personal altamente especializado. En la presente investigación se planteó determinar las relaciones existentes entre el conocimiento de las tierras por los campesinos y el uso del suelo y la tecnología de producción de cultivos, para desarrollar un sistema de generación y transferencia de tecnología agrícola para pequeños productores. El estudio se realizó en la región central de Veracruz, México, con el cultivo de maíz. Se consideraron tres clases de tierras campesinas y tres tecnologías: local, de capital limitado y de capital ilimitado. Se definió una función de respuesta que permitió generar tecnología mejorada. Hubo estrecha relación entre las clases de tierras con factores que afectan la productividad y el rendimiento de maíz. Se concluye que la clasificación de tierras campesina es una alternativa viable para generar, transferir y adoptar tecnología agrícola para pequeños productores, y que constituye una nueva metodología que combina los mejores aspectos del sistema tradicional con los conocimientos de los investigadores agrícolas.

Palabras clave: Clasificación de suelos, estratificación del ambiente, recomendaciones de producción.

¹ Instituto Tecnológico Agropecuario Núm. 18, SEP-SEIT-DGETA, Ursulo Galván, Ver., México

² Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx., México.

Aceptado: Marzo de 1998.

SUMMARY

The peasant classification of land is a stratification of the environment relatively quick and cheap, which does not require highly specialized personnel. In the present research, a study for determining the relationships between the peasant knowledge of land and the use of soil and the technology of crop production, was carried out to develop a system to generate and transfer agricultural technology for peasants. The study was carried out in the central region of Veracruz, Mexico, with maize. Three peasant land classes and three technologies: conventional, limited capital, and unlimited capital, were considered. A high relationship was found among the peasant class of land and the factors that affect the yield of maize. It was concluded that the peasant classification of land is a viable alternative to generate, transfer and adopt agricultural technology for peasants, and it is a new methodology that combines the best aspects of the traditional knowledge with the modern knowledge.

Index words: Soil classification, environmental stratification, production recommendations.

INTRODUCCION

Tanto en la generación de tecnología agrícola como en su transferencia, el enfoque seguido en las últimas décadas ha tenido sus bases en la estratificación del ambiente, ya sea por suelo, clima o manejo previo, solos o combinados, fundamentalmente a través del enfoque de agrosistemas (Laird, 1977; Turrent, 1978, 1979).

En cuanto al suelo, esta estratificación del ambiente se basa en el levantamiento de suelos, que en la actualidad, por sus requerimientos de tiempo, dinero y personal capacitado, es difícil de realizar. Una alternativa al levantamiento de suelos la constituye la clasificación de tierras campesina (Luna, 1980; Williams y Ortíz, 1981; Pájaro y Ortíz, 1987; Ortíz *et al.*, 1990; Licona, 1991; Ortíz, 1992, 1993), en términos de que es un procedimiento de estratificación del ambiente relativamente rápido y barato, y que no requiere de personal altamente especializado, además de que es un sistema de clasificación que los campesinos conocen y utilizan en el manejo de sus suelos, lo que debería favorecer la generación de una tecnología agrícola adecuada, su transferencia y adopción.

Con el propósito de evaluar la aplicación de la clasificación de tierras campesina, el objetivo planteado en el presente trabajo de investigación, consistió en determinar las relaciones existentes entre el conocimiento de las tierras por los campesinos y el uso del suelo y la tecnología de producción de cultivos, con fines de desarrollar un sistema de generación y transferencia de tecnología agrícola para pequeños productores, basado en el conocimiento que ellos tienen de su medio ecológico (suelo y clima), que por lo mismo, presente capacidad de ser aceptado por los productores y redunde en una mayor adopción de tecnología mejorada.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en el ejido La Brecha, municipio de Jamapa, localizado en la parte central del estado de Veracruz, en el ciclo primavera-verano 1993. La superficie del ejido es de 1140 ha, y el principal cultivo es el maíz, el cual ocupa 46 % de la superficie total sembrada en el ejido.

Se partió de un levantamiento de clases de tierras campesinas, y se diferenciaron diez clases de tierra, de las cuales se seleccionaron tres, las clases de tierra canela, arena y barro colorado con arena, considerando que son las que presentan la mayor superficie en el área de estudio. En las clases de tierra campesinas, se captó información sobre el uso del suelo y la tecnología local de producción, y sobre el ámbito socioeconómico de los productores.

Con base en que el maíz es el principal cultivo en el área de estudio, para la generación de tecnología de producción se establecieron 12 parcelas

experimentales, cuatro por cada una de las tres clases de tierra. En ellas se probaron tres tecnologías: la tecnología empleada por los productores, y las tecnologías de capital limitado y de capital ilimitado recomendadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) según el Manual de Diagnóstico-Recomendación para el Cultivo de Maíz en el Estado de Veracruz, a nivel de agrosistemas, definidos éstos en términos de diversos factores de diagnóstico, como: régimen hídrico, pendiente, drenaje, pH, textura, materia orgánica y profundidad del suelo; arvenses dominantes; y, sistema de labranza (Turrent *et al.*, 1991). Para esto, puesto que las tecnologías de capital limitado e ilimitado están recomendadas por agrosistemas, fue necesario ubicar los agrosistemas presentes en las tres clases de tierras definidas.

En las parcelas experimentales se tomaron las siguientes observaciones: el sistema de preparación del suelo (tractor, tractor-yunta), la fecha de siembra, la facilidad de la tierra para ser trabajada o trabajabilidad (cualitativamente: 1 = ligera, 2 = moderada y 3 = pesada), la compactación que ocurre en el suelo hasta tres semanas después de la siembra por efecto de la lluvia (cualitativamente: 0 = sin compactación, 1 = moderada y 3 = severa), la densidad de plantas real presente en cada unidad experimental, la presencia de insectos y enfermedades y el daño ocasionado, el tipo de arvense (gramíneas o de hoja ancha) y estimación del porcentaje de cobertura, los días de siembra a floración, la precipitación diaria y la presencia de sequía durante el ciclo del cultivo, la fecha en que el grano alcanzó el estado masoso, el peso en campo de la cosecha (peso total de las mazorcas deshojadas), el porcentaje de humedad de la mazorca (se usó un determinador de humedad), los costos fijos y variables del cultivo, y el rendimiento de grano del cultivo, expresado con un contenido de humedad de 14.5 %.

Además, se realizó la descripción y clasificación del suelo en las parcelas experimentales, bajo el sistema FAO/UNESCO/ISRIC, versión 1988, y con la finalidad de cuantificar la precipitación, se instalaron pluviómetros cercanos a las 12 parcelas experimentales.

La variedad de maíz para la tecnología del productor fue la que él utilizó, y para las tecnologías de capital limitado e ilimitado fue la VS-536. Por otra parte, los demás componentes se manejaron: 1) la preparación del suelo, según la tecnología local; 2) la

fuente y oportunidad de fertilización, y el control de malezas, según la recomendación del INIFAP; y, 3) el control de plagas, la dobla y la cosecha, según la tecnología local.

La superficie de la unidad experimental, correspondiente a cada tecnología, fue de 12.5 m de ancho y 25 m de largo, considerando una superficie útil de 10 por 20 metros.

El diseño experimental correspondió a un diseño de parcelas divididas, tomando a las clases de tierras como parcelas de tratamientos principal y a las tecnologías como subparcelas, y se consideraron a las cuatro parcelas experimentales dentro de cada clase de tierra como repeticiones.

El análisis estadístico comprendió un análisis de varianza, con fines de comparación de las clases de tierra y las tecnologías, y de determinar las interacciones entre ambas; y, un análisis de regresión, con la finalidad de estimar una función de respuesta del rendimiento como función de las clases de tierra y tecnologías, y de factores de suelo, clima y manejo no incluidos en las clases de tierra y tecnologías.

A partir de la función de respuesta se estimaron los rendimientos para distintas tecnologías, las recomendadas de capital limitado e ilimitado, la de los productores y otras de interés según lo sugiera la función de respuesta. Con estos rendimientos y los costos e ingresos de las tecnologías consideradas, se procedió a realizar una optimización económica, mediante el procedimiento de la tasa de retorno marginal [Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT), 1988], con fines de determinar la tecnología para capital limitado e ilimitado a recomendar.

RESULTADOS

Levantamiento de las Clases de Tierras Campesinas

El levantamiento de las clases de tierras campesinas en el ejido La Brecha, mostró la presencia de diez clases de tierras, y se encontró que los agricultores clasifican sus tierras de acuerdo con características sencillas, fácilmente observables en el campo, que les permiten agruparlas en clases de acuerdo con un carácter utilitario, ya que consideran las características que presenta el suelo en la capa arable y ocasionalmente en el estrato subsuperficial, como la textura, el color, la consistencia, la posición

en el paisaje, la calidad de la tierra, la capacidad de infiltración y de retención de humedad, la facilidad o dificultad y oportunidad para el laboreo (llamada trabajabilidad), el agrietamiento y la compactación del suelo después de la lluvia en el período de germinación del cultivo, entre otras características.

De acuerdo con su superficie e importancia, la investigación se realizó en las clases de tierra canela, arena y barro colorado con arena, cuyas principales características son:

Canela. Se localiza en las cercanías del río Jamapa, en la zona de vega, por lo que la pendiente es ligera, de 0 a 2 %. El color superficial es pardo y la textura tiende a ser franca, sin que se perciba arena gruesa. Es la tierra de mayor calidad del ejido, en la cual, si la temporada es seca, el suelo conserva humedad, y si por el contrario hay exceso de humedad, el suelo es permeable y presenta condiciones adecuadas para ser trabajado y para el desarrollo radical de los cultivos. Es tierra "fuerte", en la que prosperan todos los cultivos de la región y se obtienen buenos rendimientos. Se describieron dos perfiles; en ambos, la subunidad de suelo correspondió a un Fluvisol eútrico.

Arena. Se localiza en cualquier posición fisiográfica. Son suelos arenosos, en los cuales el material parental son rocas sedimentarias, como areniscas. Su principal problema es la baja fertilidad y la baja retención de humedad. Hay consenso entre los agricultores que es indispensable, si se desean rendimientos aceptables, que la siembra se realice a principios de la temporada de lluvias, ya que de no ser así, se "foguean" las plantas, y explican que las arenas al aumentar las temperaturas se calientan de tal manera que los cultivos desarrollan "penosamente". Se describieron dos perfiles; en uno, la subunidad de suelo correspondió a un Arenosol háplico, y en el otro, a un Cambisol eútrico.

Barro colorado con arena. Se localiza en los lomeríos con pendientes mayores que 10 %. Son suelos muy pesados para trabajar, por lo que los agricultores dicen que el suelo tiene que estar "secarrón", "a punto", para poderse trabajar, esto es, porque en seco los implementos prácticamente no penetran y si está húmedo se forman grandes "maletas" de suelo con raíces; después de la siembra, con las lluvias se compacta de tal forma que limita severamente la germinación y el desarrollo posterior de las raíces, pero si no llueve, el suelo se endurece y limita fuertemente el desarrollo radical. Es tierra de

mala calidad, en la cual frecuentemente sólo se cultiva el maíz, o bien se utiliza para el pastoreo del ganado bovino. Se describieron tres perfiles; en dos de ellos, la subunidad de suelo correspondió a un Luvisol crómico, y en el otro, a un Luvisol vértico.

Agrosistemas y su Recomendación Tecnológica

Las cuatro parcelas experimentales de la clase de tierra canela corresponden al agrosistema 15. Dos parcelas de la clase de tierra arena y una parcela de la clase de tierra barro colorado con arena, pertenecen al agrosistema 86, y dos parcelas de la clase de tierra arena y tres parcelas de la clase de tierra barro colorado con arena pertenecen al agrosistema 87, según el Manual de Diagnóstico-Recomendación para el Cultivo del Maíz en el Estado de Veracruz (Turrent *et al.*, 1991). En los Cuadros 1, 2, y 3 se presentan los factores de diagnóstico para definir los agrosistemas en cada clase de tierra.

La tecnología de producción recomendada para los tres agrosistemas, de capital limitado e ilimitado,

contiene componentes tecnológicos comunes, tales como la fuente y la oportunidad de fertilización, la variedad sembrada, el número de plantas por mata, el combate de malezas y el control de las plagas, mientras que la densidad de plantas por hectárea y la dosis de fertilización es diferente.

En cuanto a la fertilización, se recomienda no usar sulfato de amonio, por lo cual se aplicó urea y fosfato diamónico (18-46-0); una tercera parte del nitrógeno y todo el fósforo se aplicaron en la siembra, y el resto del nitrógeno antes de la segunda labor de cultivo, procurando que quedara enterrado. La dosis de fertilización recomendada para la tecnología de capital ilimitado es: para el agrosistema 15, 100-40-0; para el agrosistema 86, 130-45-0; y, para el agrosistema 87, 110-40-0; mientras que para la tecnología de capital limitado, la dosis de fertilización es 60-30-0, para los tres agrosistemas.

La densidad de siembra para la tecnología de capital ilimitado consistió en 65 000 semillas viables

Cuadro 1. Agrosistemas, con base en los factores de diagnóstico para la clase de tierra canela.

Factor de diagnóstico	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4
Ciclo de cultivo†	P-V	P-V	P-V	P-V
Edafología‡	No ando	No ando	No ando	No ando
Régimen hídrico	Temporal	Temporal	Temporal	Temporal
Pendiente (%)	< 4	< 4	< 4	< 4
Drenaje	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Uso ciclo anterior	Barbecho	Barbecho	Barbecho	Barbecho
pH	6.1	6.0	6.5	5.4
Materia orgánica (%)	> 3	> 3	> 3	> 3
Altitud sobre el nivel del mar	10 m	15 m	15 m	10 m
Agrosistema	15	15	15	15

† P-V, significa ciclo primavera-verano.

‡ No ando, significa que el suelo no es Andosol.

Cuadro 2. Agrosistemas, con base en los factores de diagnóstico para la clase de tierra barro colorado con arena.

Factor de diagnóstico	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4
Ciclo de cultivo†	P-V	P-V	P-V	P-V
Edafología‡	No ando	No ando	No ando	No ando
Régimen hídrico	Temporal	Temporal	Temporal	Temporal
Pendiente (%)	4 a 15	4 a 15	4 a 15	4 a 15
Drenaje	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Uso ciclo anterior	Barbecho	Barbecho	Barbecho	Barbecho
pH	5.7	5.8	5.6	5.6
Materia orgánica (%)	> 3	> 3	> 3	1 - 3
Altitud sobre el nivel del mar	40 m	50 m	40 m	45 m
Agrosistema	87	87	87	86

† P-V, significa ciclo primavera-verano.

‡ No ando, significa que el suelo no es Andosol.

Cuadro 3. Agrosistemas, con base en los factores de diagnóstico para la clase de tierra barro colorado con arena.

Factor de diagnóstico	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4
Ciclo de cultivo†	P-V	P-V	P-V	P-V
Edafología‡	No ando	No ando	No ando	No ando
Régimen hídrico	Temporal	Temporal	Temporal	Temporal
Pendiente (%)	4 a 15	4 a 15	4 a 15	4 a 15
Drenaje	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Uso ciclo anterior	Barbecho	Barbecho	Barbecho	Barbecho
pH	6.0	6.2	6.2	5.6
Materia orgánica (%)	1 - 3	1 - 3	> 3	> 3
Altitud sobre el nivel del mar	20 m	20 m	20 m	20 m
Agrosistema	86	86	87	87

† P-V, significa ciclo primavera-verano.

‡ No ando, significa que el suelo no es Andosol.

por hectárea, y para la de capital limitado fue de 58 000 semillas viables por hectárea.

Rendimientos

Los rendimientos obtenidos para las tecnologías del productor y de capital limitado e ilimitado, por clase de tierra y agrosistemas, se presentan en el Cuadro 4.

En términos generales, los mayores rendimientos se observaron en la clase de tierra canela, para las tres tecnologías, a la vez que en las clases de tierra arena y

barro colorado con arena, se observó una mayor variación de los rendimientos y mayores rendimientos de la tecnología de capital limitado sobre la local y de la tecnología de capital ilimitado sobre la de capital limitado.

En el Cuadro 5 se presenta el análisis de varianza (para el diseño de tratamientos de parcelas divididas), para estimar el efecto de las clases de tierras y de las tecnologías, y de interacción entre ambas, a la vez que en el Cuadro 6 se presenta la comparación de medias, de acuerdo con la prueba de Tukey. Considerando un nivel de significancia de 0.05, el análisis de varianza

Cuadro 4. Rendimiento de maíz por tecnología, clase de tierra y agrosistema, en el ejido La Brecha, ciclo P-V, 1993.

Clase de tierra	Parcela número	Rendimiento por tecnología y agrosistema				
		Local	CL†	CI‡ por agrosistema		
				15	86	87
----- kg ha ⁻¹ -----						
Canela	1	4610	5892	5091		
	2	5840	5674	6081		
	3	5234	5427	5040		
	4	5137	4058	5528		
	§	5205	5263	5435		
Arena	1	3668	4790	5018		
	2	3889	4257	5752		
	3	1037	1800	3424		
	4	2505	3462	4471		
	§	2775	3577	5385		
Barro colorado con arena	1	3332	4509	5137		
	2	2445	3362	4127		
	3	2079	2275	3255		
	4	189	1589	2780		
	§	2011	2934	2780		
	¶	3330	3925	4642		

† CL = Capital limitado. ‡ CI = Capital ilimitado.

§ Promedio. ¶ Promedio general.

Cuadro 5. Análisis de varianza para estimar el efecto de las clases de tierra y de las tecnologías, y de interacción entre las clases de tierra y las tecnologías.

Fuente de variación	GL	SC	CM	Valor de F.
Clases de tierra (CT)	2	35 466 574	17 733 287	6.00*
Error A	9	26 614 935	2 957 215	
Tecnología (TT)	2	10 351 886	5 175 943	27.35**
Interacción CT x TT	4	3 550 954	887 739	4.69**
Error B	18	3 406 481	189 249	

* significancia al nivel de 0.05

** significancia al nivel de 0.01.

indica que existieron diferencias de rendimiento entre las clases de tierra y entre las tecnologías, y que las tecnologías se comportan de manera diferente entre clases de tierra, lo cual puede observarse en detalle en el Cuadro 6.

Generación de Tecnología

Con fines de generación de tecnología para las distintas clases de tierra, se procedió a estimar mediante análisis de regresión, una función de respuesta del rendimiento como función de las clases de tierra, las tecnologías y sus componentes, y factores de suelo, clima y manejo, no considerados en las clases de tierra y tecnologías, que pudiesen estar causando variaciones de los rendimientos.

De acuerdo con la metodología seguida, para la estimación de la función de respuesta se tomaron en cuenta las correlaciones entre los factores, considerando que de dos factores altamente correlacionados ($r > 0.8$), se seleccionaba uno: aquel que presentase mayor correlación con el rendimiento y que tuviese mayor significado agronómico o fuese más importante para los objetivos del estudio. A este respecto, algunos factores que presentaron asociación con las clases de tierra, y de ellos con el rendimiento, como el pH y la trabajabilidad del suelo, se expresaron en términos de las clases de tierra, debido a que éste era un factor contemplado en los objetivos del estudio. A continuación, a partir de las relaciones gráficas del rendimiento *versus* los factores, se especificó un modelo de variables simples, según la forma de la relación, para aquellos factores que mostraron una mayor relación. Con este modelo especificado, y siguiendo el procedimiento de los

residuales (Draper y Smith, 1996), con base en el criterio de bondad del menor cuadrado medio de los residuales, se obtuvo el modelo final, de variables simples e interacciones, considerando para éstas últimas un adecuado espacio de exploración conjunto.

Esta función de respuesta se obtuvo con 36 observaciones, en un ciclo agrícola (primavera-verano 1993), y esto, más el hecho de que hubo factores que pudo haber sido importante incluirlos en el estudio, como por ejemplo la materia orgánica y la textura del suelo por las variaciones que pudieron presentar dentro de las clases de tierra (para los cuales no se contó con información) pudo dar lugar a una función de respuesta menos precisa que lo esperado. Cabe señalar sí que en cuanto al clima, el ciclo agrícola primavera-verano de 1993 considerado, fue representativo de la condición climática media que se presenta en la zona.

En estos términos, la función de respuesta obtenida fue la siguiente:

$$Y = 95.256 + 68.344 N^{0.75} + 48.677 P - 0.66566 P^2 + 104.57 (D-30) + 2602.7 F - 33.086 N^{0.75} C^{0.5} - 68.206 N^{0.75} F - 90.382 (D-30) B$$

(CMDR = 232 272; $R^2 = 0.921$)

donde: Y es el rendimiento (kg ha^{-1}), N y P son el nitrógeno y el P_2O_5 aplicados, respectivamente (kg ha^{-1}), D es la densidad de plantas (mil pl ha^{-1}), F es una variable auxiliar para frijol como cultivo previo (para cultivo previo de frijol, $F=1$, y, para otros cultivos previos o suelo en descanso, $F=0$), C es la clase de tierra campesina (para la clase de tierra canela, $C=1$, para la clase de tierra arena, $C=2$, y, para la clase de tierra barro colorado con arena, $C=3$), B es

Cuadro 6. Comparación de medias para las clases de tierra y las tecnologías, y la interacción entre clases de tierras y tecnologías, mediante la prueba de Tukey.

Factor		Rendimiento medio kg ha ⁻¹
Clase de tierra		
Canela		5301 a†
Arena		3673 ab
Barro colorado con arena		2923 b
Tecnología de producción		
Local		3330 c
Capital limitado		3925 b
Capital ilimitado		4642 a
Tecnología dentro de clase de tierra		
Clase de tierra	Tecnología	
Canela	Local	5205 a
	Capital limitado	5488 a
	Capital ilimitado	5435 a
Arena	Local	2775 c
	Capital limitado	3577 b
	Capital ilimitado	4666 a
Barro colorado con arena	Local	2011 c
	Capital limitado	2934 b
	Capital ilimitado	3825 a

† Letras diferentes indican diferencias entre medias, al nivel de probabilidad de 0.05.

una variable auxiliar para densidad de plantas (cuando hay compactación y mala preparación del suelo, combinado con exceso de lluvia a partir de la siembra hasta dos semanas después, lo que ocasiona pérdida de plantas, entonces: si hay pérdida de plantas, B=1, si no hay pérdida de plantas, B=0).

La función de respuesta comprende a los factores: 1) nitrógeno, con un efecto positivo de rendimientos marginales decrecientes, y en interacciones negativas con las clases de tierra y con la variable auxiliar para cultivo previo frijol; 2) fósforo, con un efecto positivo de rendimientos marginales decrecientes; y, 3) densidad de plantas, con un efecto positivo, y en interacción negativa con la variable auxiliar asociada a pérdida de plantas.

La variable auxiliar para cultivo previo frijol tuvo su justificación en que en una parcela de la clase de tierra canela se observó un alto rendimiento para los niveles bajo e intermedio de nitrógeno, por lo cual se supuso un efecto residual del frijol como cultivo previo. Por su parte, la variable auxiliar para explicar el menor efecto de la densidad de plantas, tuvo su justificación en que en dos parcelas de la clase de

tierra canela se observó una infección de hongos, aparentemente asociada a la mayor densidad de plantas.

Con esta función de respuesta se calcularon los rendimientos estimados para distintas tecnologías, para las cuales se hizo un análisis económico entre tecnologías dentro de cada clase de tierra, a fin de obtener las recomendaciones correspondientes, de capital limitado y de capital ilimitado.

Para este análisis, los costos se consideraron a nivel de costos variables totales, derivados de: 1) los insumos de producción, como nitrógeno, fósforo y semilla, y sus costos de transporte y de aplicación según la tecnología y clase de tierra, y las prácticas de producción que varían entre tecnología dentro y entre clases de tierras, como la preparación del suelo, el control de malezas y plagas; y, 2) la cosecha, el desgranado y el transporte del grano.

El análisis económico realizado consistió en el cálculo de la tasa de retorno marginal (CIMMYT, 1998). En el Cuadro 7 se presenta el análisis económico de la tasa de retorno marginal, para distintas tecnologías de interés y cada clase de tierra, habiéndose eliminado, de acuerdo con el análisis económico, aquellas tecnologías dominadas.

De acuerdo con el análisis económico, y considerando una tasa de retorno mínima a obtener de 100 %, la tecnología óptima dentro de cada clase de tierra y a recomendar, es:

1. Para la clase de tierra canela: a) en el caso de productores con limitaciones de capital, la recomendación es de 60 kg N ha⁻¹, 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 58 000 plantas ha⁻¹; y, b) en el caso de productores con disponibilidad de capital, la recomendación es de 100 kg N ha⁻¹, 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 65 000 plantas ha⁻¹.
2. Para la clase de tierra arena: a) en el caso de productores con limitaciones de capital, la recomendación es de 60 kg N ha⁻¹, 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 58 000 plantas ha⁻¹; y, b) en el caso de agricultores con disponibilidad de capital, la recomendación es de 110 kg N ha⁻¹, 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 65 000 plantas ha⁻¹.
3. Para la clase de tierra barro colorado con arena: a) en el caso de productores con limitaciones de capital, la recomendación es de 60 kg N ha⁻¹, 30 kg P₂O₅ ha⁻¹; y, b) en el caso de productores con disponibilidad de capital, la recomendación es de 110 kg N ha⁻¹, 40 kg P₂O₅ ha⁻¹, y 65 000 plantas ha⁻¹.

De acuerdo con lo anterior, para los productores con limitaciones de capital, la recomendación es la misma para las tres clases de tierra, esto es: 60 kg N

ha⁻¹, 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 58 000 plantas ha⁻¹, lo que corresponde a la tecnología de capital limitado recomendado actualmente por el INIFAP (Turrent *et al.*, 1991). Por su parte, para el caso de los productores sin limitaciones de capital, la recomendación es también la misma para las tres clases de tierra, esto es: 110 kg N ha⁻¹, 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 65 000 plantas ha⁻¹.

En este último caso, la recomendación difiere ligeramente de la tecnología de capital ilimitado recomendada por el INIFAP, en la clase de tierra canela; es igual a la tecnología de capital ilimitado recomendada por el INIFAP para el agrosistema 87, comprendido en la clase de tierra arena; y es igual a la tecnología de capital ilimitado recomendada por el INIFAP, en la clase de tierra barro colorado con arena (Turrent *et al.*, 1991).

De esta manera, la tecnología generada concuerda en gran medida con las recomendaciones dadas por el INIFAP, con la diferencia que se observa en la clase de tierra arena, en cuanto a que la recomendación del INIFAP en el agrosistema 86 es mayor que la recomendación generada (Turrent *et al.*, 1991).

En cuanto a los demás componentes tecnológicos, a continuación se presentan aquellos comunes para las tres clases de tierra:

1. Preparación del suelo: aun cuando pueden haber algunas diferencias en la preparación del suelo dependiendo de la textura del horizonte superficial, la recomendación general es barbecho, un paso de rastra y surcado.
2. Variedad: a) para productores poco receptivos a cambiar su práctica de cultivo tradicional, la semilla a sembrar es la criolla (o "mejorada" pero cosechada por productores, por lo que se desconoce su potencial productivo); b) para productores de capital limitado, la variedad a sembrar será el material de polinización libre recomendado por el INIFAP, como la variedad VS-536 (se excluyen los híbridos); y, c) para productores de capital ilimitado, las variedades a sembrar serán las de polinización libre, como las variedades VS-530 y VS-536, y los híbridos recomendados por el INIFAP, como el H-507, H-509, H-512 y H-513.
3. Fuente y oportunidad de fertilización: la recomendación sobre estos componentes es la dada por el INIFAP, esto es, la urea, y el fosfato diamónico, aplicando la mitad del nitrógeno y todo el

fósforo en la siembra, y el resto del nitrógeno cuando la planta tiene entre 40 y 50 cm.

4. Control de malezas: la recomendación para este componente es la dada por el INIFAP, esto es, aplicar primero 1 L de 2, 4-D Amina y 1 L de Gesaprim por hectárea, y posteriormente realizar el atierre del cultivo.

5. Otros componentes tecnológicos: los demás componentes tecnológicos, como el control de plagas, la dobla, la cosecha, etc., se realizarán como el productor acostumbra hacerlo normalmente.

Rendimientos Obtenidos y Estimados por la Función de Respuesta

Al considerar los rendimientos observados (Cuadro 4) y los estimados mediante la función de respuesta (Cuadro 7), se puede ver que existen algunas diferencias entre los rendimientos estimados y los obtenidos, para las tecnologías de capital limitado e ilimitado en las tres clases de tierras. A este respecto cabe señalar que ello se debe: 1) en la clase de tierra canela, a que en el tratamiento de tecnología de capital limitado se usó más de 60 kg N ha⁻¹ en tres de las parcelas, y en el tratamiento de tecnología de capital ilimitado en tres de las parcelas la población de plantas fue un poco menor que 65 000 plantas ha⁻¹; 2) en la clase de tierra arena, a que en el tratamiento de tecnología de capital limitado, en una parcela se tuvo una densidad de plantas muy baja y en otra ligeramente inferior, e igual cosa para el tratamiento de tecnología de capital ilimitado; y, 3) en la clase de tierra barro colorado con arena, a que en el tratamiento de capital limitado, en una de las parcelas se tuvo una densidad de plantas muy baja y en dos algo inferior, e igual cosa para el tratamiento de capital ilimitado. Puesto que las diferencias de fertilización o densidad de plantas entre las planeadas y las reales se eliminan con la función de respuesta, al trabajar en ésta con los valores planeados de ellas, los rendimientos resultantes corresponden a valores "reales". Sin embargo, para el caso de la densidad de plantas, esto implica que se deberían obtener en la práctica las densidades planeadas, lo que es necesario considerar ya que en las clases de tierra arena y barro colorado con arena, en algunas parcelas no fue posible obtener la densidad de plantas planeadas por compactación del suelo por las lluvias.

Cuadro 7. Análisis económico para distintas tecnologías dentro de las clases de tierra.

N	P ₂ O ₅	DP	Rendimiento	Costo total	Ingreso neto	Tasa de retorno marginal
----- kg ha ⁻¹ -----		pl ha ⁻¹	----- kg ha ⁻¹ -----			
Clase de tierra canela						
100	0	50 000	3301	2048	1253	-
100	0	55 000	3824	2132	1692	5.18
60	30	58 000†	4644	2305	2340	1.21
100	40	65 000‡	5752	2628	3125	2.43
110	40	65 000	5834	2666	3168	1.13
Clase de tierra arena						
80	0	50 000	2763	1920	843	-
110	0	55 000	3441	2109	1332	2.58
60	30	58 000†	4349	2265	2085	4.84
110	40	65 000§	5369	2606	2763	1.99
130	45	65 000¶	5427	2683	2788	0.32
Clase de tierra barro colorado con arena						
75	0	50 000	2467	1866	1058	-
60	30	58 000†	4122	2234	1426	3.50
110	40	65 000§	5012	2558	1751	1.74

† Tecnología de capital limitado.

§ Tecnología de capital ilimitado, agrosistema 87.

‡ Tecnología de capital ilimitado, agrosistema 15.

¶ Tecnología de capital ilimitado, agrosistema 86.

CONCLUSIONES

Se generó tecnología mejorada para maíz (ciclo primavera-verano) a partir de la tecnología actual de producción y la tecnología recomendada, con base en las clases campesinas de tierras.

La clasificación de tierras campesina se considera como una alternativa viable para generar, transferir y adoptar tecnología agrícola para los productores, debido a la facilidad con que se puede realizar el levantamiento de las clases campesinas de tierra, ya que el técnico solamente colecta el conocimiento que el campesino tiene de su tierra, la cartografía, y la caracteriza, y por la estrecha relación que existe entre las clases campesinas de tierra con la tecnología de producción de los cultivos, y por tanto, con el rendimiento.

Se propone la siguiente metodología de generación y transferencia de tecnología agrícola para pequeños productores en el estado de Veracruz, con base en las clases campesinas de tierra: 1) levantamiento de clases campesinas de tierras, que permita la definición y cartografía de unidades edafoclimáticas, lo que representa una aproximación práctica que estudia factores inmodificables de suelo y clima que sean importantes y fácilmente identificables; 2) caracterización de los factores de manejo de los cultivos por clase campesina de tierra, además de los sistemas de cultivo existentes y de

aquellos factores de suelo y clima que afectan los rendimientos del cultivo y su respuesta a los factores tecnológicos; 3) selección de los sitios y número de experimentos que permitan estudiar las alternativas para resolver los problemas tecnológicos detectados en el levantamiento de las clases campesinas de tierras, con una adecuada representatividad; 4) definición de las tecnologías a probar, además de la tecnología local, lo que en el presente caso se hizo con base en las tecnologías recomendadas por agrosistemas para la zona; 5) someter a evaluación las recomendaciones tecnológicas generadas en el punto anterior, con respecto al grado de adopción por los pequeños productores, complementando la tecnología generada con los comentarios y experiencias de los campesinos;

y, 6) transferencia de la tecnología agrícola mejorada, con base en la estratificación del ambiente en agrosistemas desde el punto de vista técnico o en las clases campesinas de tierras bajo el enfoque de los ejidatarios.

La aportación principal de la metodología desarrollada se refiere al papel protagónico que se le asigna al productor, considerando que sus conocimientos, producto de su experiencia personal y del conocimiento tradicional, constituyen el principal factor en el mejoramiento de su propio sistema agropecuario. Permite además que el mismo productor realice las labores que requieren los

experimentos, ya que los ensayos se realizan en su parcela, elemento fundamental en la adopción de la nueva tecnología, puesto que le permite sopesar los resultados y si éstos son positivos y adecuados a sus circunstancias, este campesino cooperante se convertirá en uno de los principales difusores de la recomendación tecnológica generada para la clase campesina de tierra en la que se ubicó el experimento. Finalmente, el resultado es una nueva metodología que combina los mejores aspectos del sistema tradicional con los conocimientos de los investigadores agrícolas.

LITERATURA CITADA

- Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y Trigo. (CIMMYT). 1988. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: un manual metodológico de evaluación económica. Escrito por Perrin R.K., D.L. Winkelmann, E.R. Moscardi y J.R. Anderson. Edición completamente revisada. El Batán, Méx., México.
- Draper, N.R. y H. Smith. 1966. Applied regression analysis. John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- FAO/UNESCO/ISRIC. 1988. Mapa mundial de suelos. Versión en español preparada por la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Santiago de Compostela, España.
- Laird, R.J. 1977. Investigación agronómica para el desarrollo de la agricultura tradicional. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx., México.
- Licona V., A.L. 1991. Metodología para el levantamiento de tierras campesinas a nivel regional y la técnica de producción agrícola en ejidos del centro de Veracruz. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México.
- Luna O., P. 1980. Clasificación campesina de los terrenos del ex-lago de Texcoco y su relación con el levantamiento de suelos. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx., México.
- Ortiz S., C.A. 1992. Hablemos de suelos. Revista Agro-productividad 1: 3-10. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México.
- Ortiz S., C.A. 1993. Evolución de la ciencia del suelo en México. Revista Ciencia, Publicación especial: 23-32, Méx., México.
- Ortiz S., C.A., D. Pájaro H. y V.M. Ordaz Ch. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México.
- Pájaro H., D. y C.A. Ortiz S. 1987. El levantamiento de suelos y su relación con la clasificación y cartografía de las clases de tierras campesinas. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. (Informe mimeografiado).
- Turrent F., A. 1978. El agrosistema, un concepto útil dentro de la disciplina de productividad. Escritos sobre la Metodología de la Investigación en Productividad de Agrosistemas. Num. 3. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx., México.
- Turrent F., A. 1979. El método CP para el diseño de agrosistemas. Escritos sobre la Metodología de la Investigación en Productividad de Agrosistemas Núm. 8. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx., México.
- Turrent, F.A., J.L. Aguilar A., J.L. Zúñiga G., V.A. Esqueda E. y J. Villanueva B. 1991. Manual de diagnóstico-recomendación para el cultivo de maíz en el estado de Veracruz. Segunda edición. Publicación especial Núm: 5. SARH, INIFAP, SEDAP, México.
- Williams, B.J. y C.A. Ortiz S. 1981. Middle American folk soil taxonomy. Annals of Association of American Geographers 71(3): 335-358.

CARBONATO DE CALCIO EN LOS SUELOS DEL EX LAGO DE TEXCOCO

Calcium Carbonate in the Soils of Texcoco Ex Lake

Ma. del C. Gutiérrez Castorena¹, G. Stoops G.² y C. A. Ortiz Solorio¹

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar las diferentes acumulaciones del carbonato de calcio en los suelos del ex lago de Texcoco, tomándose como marco de referencia a las clases de tierras campesinas que se presentan en esa zona para determinar si son de origen lacustre o pedogenético. Se realizaron estudios de campo, además de análisis macro y micro-morfológicos detallados. Los resultados obtenidos muestran que las acumulaciones del carbonato son principalmente de origen lacustre y están relacionadas con antiguas playas del lago donde se formaron nódulos concéntricos; o en aguas poco profundas donde se presentó una alta actividad biológica y el carbonato se precipitó micriticamente en conjunto con restos de microorganismos. Las acumulaciones lacustres están sufriendo procesos diagenéticos (carbonato secundario) y se están formando horizontes cálcicos y petrocálcicos en los suelos de textura fina.

Palabras clave: *Acumulación de carbonato de calcio, lacustre y pedogenético.*

SUMMARY

The objective of the present research was to study the different accumulation of calcium carbonate in the soils of Texcoco ex lake. The land classes present in that area were taken in account in order to determine the lacustrine or pedogenetic origin. Fieldwork, macro- and especially micro-morphological analysis were carried out in different soils. The results showed that the carbonate accumulation mainly have lacustrine origin and it is related with old beaches, where concentric nodules were formed; or in shallow waters, in which the carbonates were precipitated as micritic crystals with remains of micro-organisms.

¹ Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Méx.

² Ghent University, Krijgslaan 281, B 9000 Gent, Belgium.

Aceptado: Marzo de 1998.

The lacustrine accumulations are suffering diagenetic processes (forming secondary carbonate) and calcic and petrocalcic horizons have been developing on clay soils.

Index words: *Calcium carbonate accumulation, lacustrine and pedogenetic origin.*

INTRODUCCION

Los suelos del ex lago de Texcoco presentan horizontes enriquecidos con carbonato de calcio compuestos por diferentes rasgos calcíticos, sin embargo, es en las tierras blancas localizadas en las laderas y en los montículos presentes en el ex lago de Texcoco, donde la acumulación del carbonato es más intensa a grado tal que origina la formación de los horizontes cálcicos y petrocálcicos, no obstante, los procesos involucrados en su formación no están claramente identificados.

La acumulación del carbonato de calcio en los suelos es un rasgo característico de las regiones áridas y semiáridas, resultado intrínseco de la escasa precipitación, y donde ésta se deriva tanto de materiales calcáreos como no calcáreos. En el caso de los suelos del ex lago de Texcoco, la acumulación del carbonato está relacionada con lechos de aguas salinas, por lo que los procesos de acumulación pueden tener analogías con los que se presentan en ambientes marinos ricos en calcio, más que en aquellas áreas donde influye la escasa precipitación.

Las laderas de la cadena montañosa que rodea al ex lago de Texcoco están formadas por rocas ígneas y tobas volcánicas. Sobre las tobas existe un material localmente denominado tepetate blanco, el cual se caracteriza por presentar altos contenidos de carbonato de calcio (Gutiérrez y Ortiz, 1992). Siendo muy probable que los escurrimientos superficiales que atravesaban al tepetate blanco desprendieran y transportaran al calcio en forma de catión o como bicarbonato y lo depositaran en el lago, donde adquirieron rasgos específicos de acuerdo con las condiciones ambientales.

Existe en la literatura una gran cantidad de trabajos relacionados con el carbonato de calcio depositado en

ambientes marinos, se conoce su origen ya sea como resultado de la actividad biológica o precipitación química y su diagénesis, sin embargo, el origen de muchos de los rasgos calcíticos continentales es poco conocido y el papel de la actividad biológica en su génesis es controversial. Freytet y Plaziat (1979) realizaron un estudio sobre algunas formas de carbonatos continentales y su modo de formación, no obstante, la diferenciación de los rasgos calcíticos que se forman en el suelo y en los sedimentos, generalmente son idénticos a los geológicos, haciendo casi imposible establecer su origen (Bullock *et al.*, 1985). Drees y Wilding (1987) realizaron un estudio comparativo de rasgos geológicos y pedogenéticos con el cual tratan de establecer las bases para su diferenciación, aunque hasta el momento se considera que sólo en suelos desarrollados a partir de materiales no calcáreos, es posible concluir con certeza que los carbonatos son de origen pedogenético (West *et al.*, 1988).

Los suelos del ex lago de Texcoco son de origen aluvial-lacustre y se desarrollaron a partir de sedimentos, producto de la alteración de rocas ígneas (Gutiérrez, 1997). Este hecho puede hacer posible la diferenciación entre los rasgos que tienen un origen sedimentario de los pedogenéticos, sin que esté de por medio una acumulación de carbonato a partir de rocas calizas que haría todavía más difícil su diferenciación.

Para entender la naturaleza de las acumulaciones del calcio durante la presencia del lago (procesos lacustres) y su dinámica después del secado (procesos

pedogenéticos), se plantearon los siguientes objetivos: (1) describir la macro y micromorfología de las acumulaciones del carbonato de calcio de los suelos del ex lago de Texcoco, (2) identificar y diferenciar los rasgos calcíticos de acuerdo con su origen, sedimentario o pedológico y (3) clasificar a los materiales calcáreos utilizando la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1994).

MATERIALES Y METODOS

La presente investigación se realizó en la zona ribereña del ex lago de Texcoco, en el municipio de Atenco y Texcoco, Edo de México (Figura 1). La zona es una planicie aluvial lacustre; su geología corresponde al Cuaternario; el clima es BS KW (W) (i') (semiseco), con una precipitación media anual de 600 mm, una temperatura media anual de 18 °C y la evaporación es seis veces mayor que la precipitación (1195 mm y 190.4 mm, respectivamente); la vegetación dominante está formada por *Distichlis spicata* (pasto salado), *Suaeda nigra* (romerito) y *Schinus molle* (pirul); los suelos dominantes son Entisols, Mollisols y Vertisols y de acuerdo con los productores locales existen en el área de estudio seis clases de tierras: arenosas, blancas, barro, cacahuatudas, lama y salinas las cuales presentan características macro y micromorfológicas bien definidas (Gutiérrez y Ortiz, 1997). En la zona de estudio se practica una agricultura de riego y de secano.

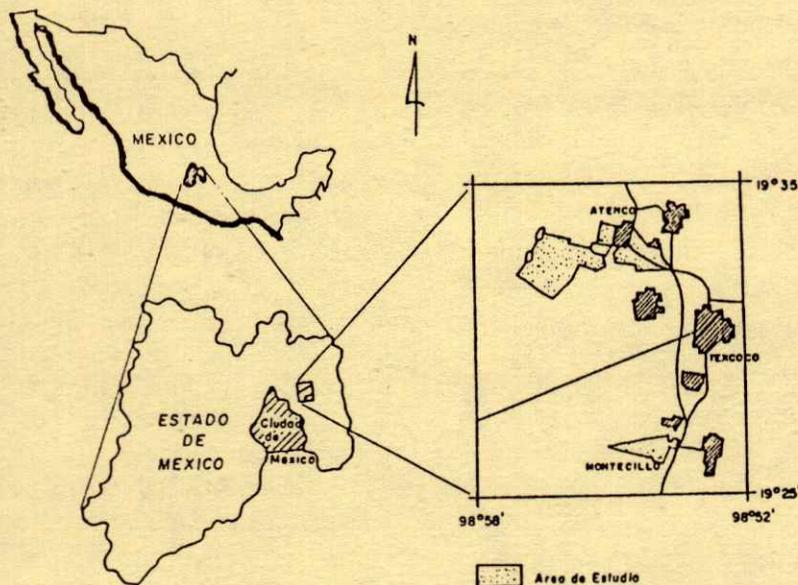


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

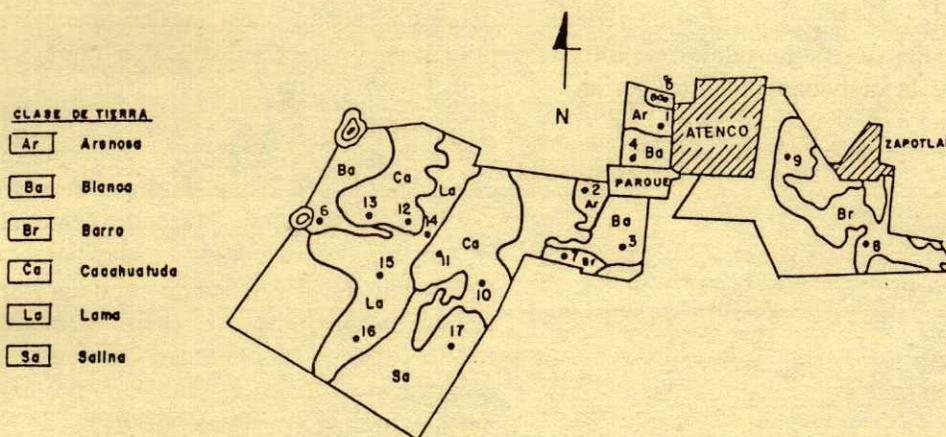


Figura 2. Localización de los sitios de muestreo así como su ubicación en las diferentes tierras (a partir de Pájaro y Ortiz, 1990).

Para estudiar la macro y micromorfología de las acumulaciones del carbonato de calcio, se ubicaron las diferentes clases de tierras en Atenco con base en el mapa elaborado por Pájaro y Ortiz (1990) y se seleccionaron 30 perfiles representativos (Figura 2). Los perfiles de suelos se describieron siguiendo las guías propuestas por FAO (1990) y se muestrearon por capas u horizontes. Además se colectaron muestras alteradas de suelos para los análisis de laboratorio y muestras inalteradas para los estudios micromorfológicos.

Los análisis de laboratorio se realizaron según el Manual para la Clasificación de Suelos de Van Reeuwijk (1993), las muestras inalteradas se impregnaron con resina poliéster (Murphy, 1986) y las secciones delgadas se describieron detalladamente caracterizando especialmente las formas del carbonato, con base en la metodología de Bullock *et al.* (1985).

Para determinar la naturaleza mineralógica de los carbonatos, se utilizaron técnicas selectivas de tinción y secciones delgadas sin cubrir (Morras, 1972). Se empleó una solución Feigl para determinar la presencia de aragonita, que se tiñe de color negro; el rojo de Alizarina para los cristales de calcita, que se tornan de blancos a rojos, y al ferricianuro de potasio para determinar la presencia de dolomita con Fe, cuando los cristales presentan una coloración azul. Se analizó un nódulo concéntrico calcítico e isotrópico con el microscopio electrónico de barrido (MEB) equipado con un microanalizador de rayos X para determinar su morfología y composición química.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la sedimentología es importante la descripción del arreglo de los cristales del carbonato, ya que aportan evidencias sobre las condiciones ambientales en las que se forman (Sobecky y Wilding, 1983; Zheng y Federoff, 1990), de tal manera que para entender la complejidad de los rasgos calcíticos encontrados en la zona de estudio se clasificaron de acuerdo con su morfología y origen como se muestra en el Cuadro 1 y posteriormente se discutió cada uno de ellos para establecer sus principales procesos de formación y acumulación en el suelo.

Rasgos Calcíticos Lacustres (Figura 4)

Durante la presencia del lago de Texcoco, el carbonato de calcio se depositó y formó dos estratos con morfología diferente en conjunto con otros sedimentos (Figura 3). Los estratos calcíticos típicos que se formaron se clasificaron de acuerdo con su morfología en:

Estrato laminar. Es un estrato continuo que se extiende desde la parte superior de los montículos hasta las partes planas del ex lago, formando un estrato continuo y homogéneo y alcanza grandes extensiones en las tierras blancas. Presenta un color blanco (10YR 6/2); estructura masiva y laminar, de consistencia firme a dura; textura franco y con poros canales de 5 mm diámetro y distribuidos verticalmente. Se localiza a partir de 50 cm de profundidad en

Cuadro 1. Rasgos calcíticos de los suelos del ex lago de Texcoco.

Rasgos Calcíticos Lacustres

Estrato laminar. Compuesto por restos de microorganismos (ostrácodos, pelecípodos y algas) y una Fábrica-b calcítica con cristales micríticos distribuidos horizontalmente.

Estrato nodular. Formado por nódulos concéntricos y concéntricos nucleados con cristales distribuidos tangencial y radialmente.

Rasgos Calcíticos Pedogenéticos

Carbonatos secundarios. Formados por nódulos típicos y de impregnación, hipo-revestimientos e intercalaciones micríticas.

Horizonte cálcico. Fábrica-b calcítica con cristales micríticos distribuidos aleatoriamente

Horizontes Petrocálccicos. Rellenos laminares micríticos o esparíticos y carbonato acicular.

las tierras blancas y después de 70 cm en las tierras cacahuatudas y de barro, siempre que estén asociadas con las primeras.

Este estrato se formó en aguas moderadamente profundas, estables con alta actividad biológica, principalmente compuestas por algas estromatoidales, diatomeas, ostrácodos y pelecípodos, factores que provocaron que los carbonatos se precipitaran laminar y micríticamente en conjunto con los restos de esos microorganismos; tal como lo indica De Paepe (1991), para formar un estrato laminar. Esta acumulación se caracteriza por presentar una **Fábrica-b calcítica con cristales micríticos** los cuales se distribuyen paralelamente a la superficie. La presencia de los

microorganismos se explica por la alta concentración de calcio, pH's alcalinos y materia orgánica en las aguas del lago, condiciones ideales que favorecieron su proliferación y en donde el calcio representó el material indispensable para la construcción de su caparazón (Pennak, 1979).

Estrato nodular. Formado por numerosos nódulos calcíticos, de 1 a 2 mm de diámetro, de color blanco (10YR 7/2). Se puede presentar cementado entre los 20 y 40 cm de profundidad en las tierras blancas o no cementado a partir de los 50 cm de profundidad en las tierras cacahuatudas y de barro y se caracteriza por formar una discontinuidad litológica fuertemente contrastante con los estratos suprayacentes arcillosos característicos de estas tierras. El levantamiento estratigráfico muestra que estos estratos nodulares son discontinuos y se distribuyen en forma de cuchillas siguiendo el contorno de los montículos hasta llegar a las partes planas, lo que indica el movimiento constante del nivel del agua del lago y por lo tanto la ubicación de las playas. Los nódulos identificados son **típicos**, compuestos por cristales micríticos y esparíticos, de 1 mm de diámetro y **concéntricos nucleados**, formados por un núcleo de cristales micríticos o por un mineral. Las capas de los nódulos pueden estar compuestas por cristales micríticos orientados en forma tangencial o radial, presentar un material pardo amarillento e isotrópico o bien revestimientos o hipo-revestimientos de fierro y manganeso.

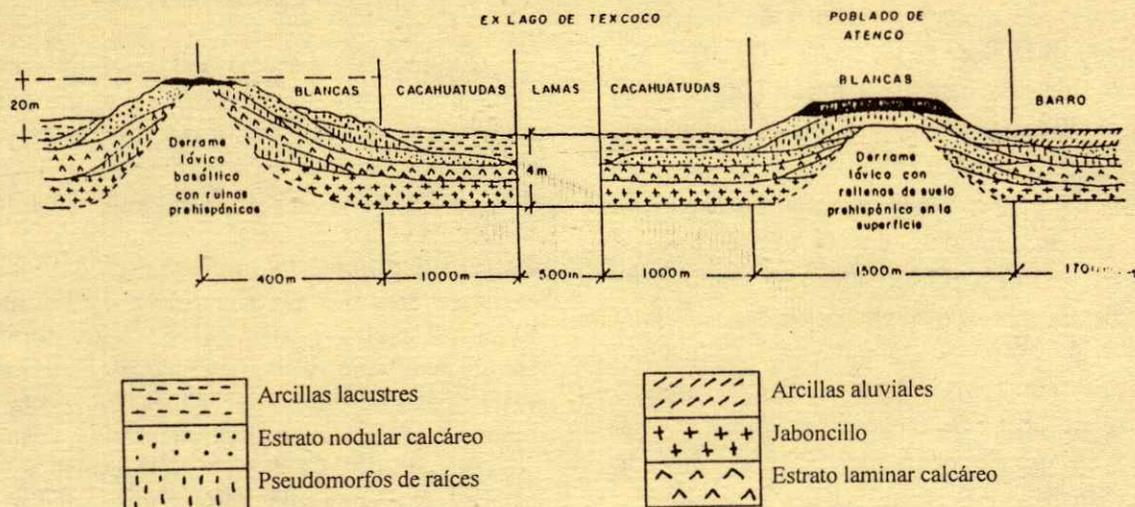


Figura 3. Estratigrafía de las acumulaciones del carbonato de calcio en los suelos del ex lago de Texcoco.



a

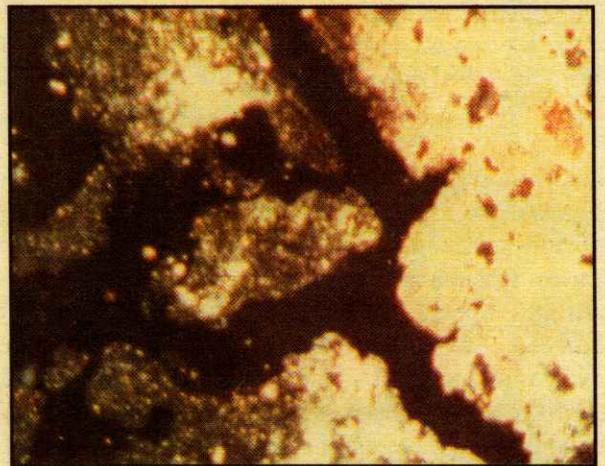


b

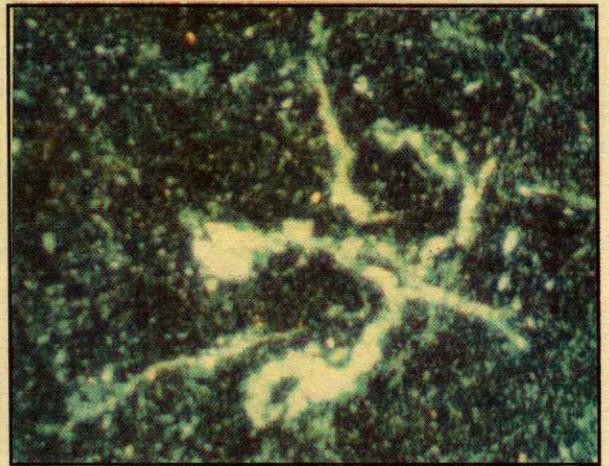


c

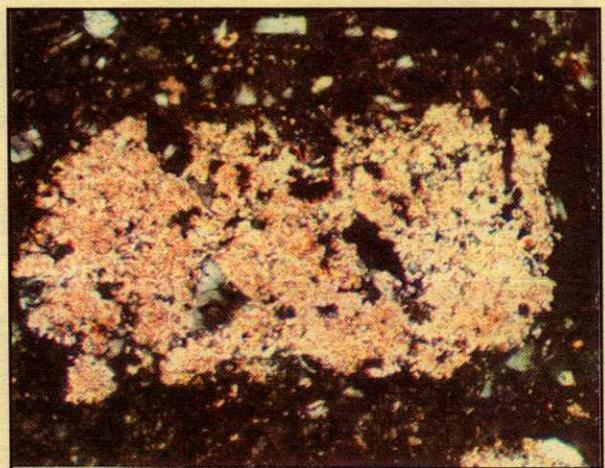
Figura 4. Rasgos calcílicos lacustres. a. Nódulo concéntrico radial. b. Nódulo nucleado. c. Acumulación de Micrita con microorganismos.



a



b



c

Figura 5. Rasgos pedológicos calcílicos micríticos. a. Hipo-revestimiento. b. Intercalación. c. Nódulo amiboidal.

Cuando los nódulos concéntricos son de origen geológico se les denomina como oolitos y generalmente están asociados con restos de microorganismos (Drees y Wilding, 1987). La intensa acumulación de nódulos concéntricos (oolitos) en los suelos del ex lago de Texcoco se detectó en las partes bajas de los montículos, estrechamente relacionados con antiguas playas del lago (Gutiérrez *et al.*, 1995). El origen de los nódulos concéntricos en el ex lago está relacionado con varios factores al presentarse oolitos mezclados con cristales orientados radial y tangencialmente y con diferentes tamaños. Es probable que los nódulos radiales se formaron a partir de una precipitación físico-química del carbonato (Bathurst, 1971), actividad biológica por la presencia de algas (Friedman *et al.*, 1973) y materiales orgánicos (Kahle, 1974), además de la agitación suave en aguas someras característica de las playas (Heinrich, 1972). Sin embargo, la presencia de nódulos tangenciales indica cambios bruscos en la agitación de las olas del lago (Land *et al.*, 1979) lo cual permitió la concentración del bióxido de carbono. El bajo nivel de las aguas de estas áreas y la intensa evaporación de la zona (Sanders, 1983) hasta de 1000 mm durante la estación seca (Servicio Meteorológico Nacional, 1975), provocaron la liberación del bióxido de carbono y la precipitación del carbonato de calcio. Este proceso facultó la generación de depositaciones secuenciales del carbonato para formar los nódulos.

Sanders (1980) menciona que el lago es hipersalino, condición que favorecería la precipitación del carbonato en forma de aragonita la cual se caracteriza por presentar cristales radiales. El análisis de tinción de los oolitos mostró que están formados por calcita, al teñirse de color rojo y no por aragonita como ha sido reportado por Friedman *et al.* (1973) cuando se desarrollan en ambientes hipersalinos, o por calcita-Mg (Folk (1974), cuando ocurren variaciones en la concentración de los ácidos orgánicos en el ambiente en el momento de la depositación. No se encontraron evidencias que permitan mencionar que los oolitos se formaron por un proceso diagenético de aragonita a calcita.

La presencia de materiales amorfos silíceos dentro de los nódulos calcíticos, indica también la importancia de los cambios del pH en la precipitación de la sílice y de los carbonatos en el lago.

Con el microscopio electrónico de barrido se observó que estos compuestos presentan límites abruptos lo que puede indicar que los cambios en el pH del lago fueron drásticos propiciando su precipitación alternada. Según Ortega (1993), la solubilidad de los carbonatos

disminuye drásticamente a pH arriba de 8, en tanto que la solubilidad de la sílice se incrementa después de este pH. Estos cambios microambientales favorecieron la precipitación de la sílice y de carbonatos que, de acuerdo con Chadwick *et al.* (1987) son compuestos antagónicos al precipitarse en diferentes superficies.

Los estratos nodulares son de origen lacustre y no pedogenéticos como lo establecen Drees y Wilding (1987) quienes mencionan la importancia del manto freático en su formación. Los revestimientos e hiporevestimientos de fierro sobre los nódulos se precipitaron una vez que los sedimentos estuvieron expuestos a procesos óxido-reducción originados por cambios en la humedad, procesos que han sido reconocidos como pedogenéticos por Seghal y Stoops (1972).

Rasgos Calcíticos Pedogenéticos (Figura 5)

Carbonato secundario. En los últimos eventos de depositación de sedimentos, los estratos nodulares o los laminares fueron abruptamente sepultados por sedimentos arcillosos lacustres o arcillosos aluviales, restringiendo la acumulación del carbonato nodular sólo en los montículos para dar origen a las tierras blancas. En las partes planas se continuó modificando las acumulaciones de los sedimentos por la entrada de corrientes pluviales, lo cual destruyó la secuencia de estratos calcáreos (laminar y nodular) y arcillosos (Figura 3) y se depositaron materiales limosos que formaron a las tierras de lama (Gutiérrez, 1997), las cuales se caracterizan por no presentar reacción con HCl.

Los rasgos pedológicos calcíticos se formaron cuando afloraron los sedimentos y se presentaron fluctuaciones en el manto freático. Los procesos pedogenéticos comenzaron a actuar en la reorganización de los cristales del carbonato (de origen sedimentario) a través de su

disolución y precipitación y formación de rasgos con una fábrica interna totalmente diferente. La dinámica del carbonato bajo la influencia pedogenética se observa claramente en los suelos de textura fina donde antes del secado, los sedimentos no presentaban carbonatos. Los factores más importantes que contribuyeron a la acumulación del carbonato y formación de rasgos calcíticos en las tierras arcillosas fueron la influencia del manto freático, la estructura y textura.

Los estratos formados por carbonatos están sujetos a procesos de disolución, por la influencia del manto freático que los mantiene en estado de saturación.

Además la evaporación intensa, tres veces mayor que la precipitación (Servicio Meteorológico Nacional, 1975), está provocando que los carbonatos se muevan con el flujo del agua de tipo ascenso capilar dentro de los microporos de los estratos de textura arcillosos y se precipiten dentro del perfil en las fronteras del cambio textural, las cuales alteran significativamente la velocidad del movimiento y el patrón de la distribución del agua dentro del espacio poroso (Stuart y Dixon, 1973). En estas condiciones el carbonato se precipitó en forma de nódulos de impregnación con cristales micríticos en la masa basal, con formas amiboidales cuando son irregulares o nucleados cuando envolvieron minerales dejando otros de la misma naturaleza en la masa basal, lo que indica su origen pedogenético (Seghal y Stoops, 1972). De acuerdo con Mermut y St. Arnaut (1981), estos rasgos calcíticos se forman en condiciones húmedas del suelo y por evaporación las sales son transportadas hacia los horizontes superficiales donde se precipitan. Como resultado del movimiento de las soluciones ricas en carbonatos a lo largo de los poros, el carbonato se precipitó rellenándolos o penetrando a la masa basal y se formaron hiporevestimientos (Brewer, 1964) durante la estación seca. En la estación húmeda, el material del suelo se colapsó y los rellenos calcíticos quedaron dentro de la masa basal y se formaron intercalaciones simples micríticas. De acuerdo con Courty *et al.* (1987) los hiporevestimientos son rasgos que indican que hay actividad moderna del carbonato en el suelo. Sin embargo, el ascenso capilar de los carbonatos sólo alcanza a los horizontes intermedios pero nunca en la superficie, por la presencia de bloques subangulares fuertemente desarrollados de consistencia de firme a dura, grietas de más de 3 cm de ancho y costras de varios milímetros de espesor, que impiden el movimiento ascendente de los carbonatos y su precipitación en la superficie (Wieder y Yaalon, 1982). Las lluvias pueden generar el lavado de sales de los horizontes superficiales y con ello explicar la reacción nula al HCl de estos horizontes, no obstante, en el presente estudio los suelos se muestrearon antes de la estación de lluvias, después de un periodo seco de ocho meses, tiempo suficiente para la acumulación de sales en la superficie.

Horizonte calcico. El ascenso constante y la precipitación del carbonato de calcio en los horizontes arcillosos adyacentes a los estratos calcáreos, están formando un horizonte calcico el cual se caracteriza por la presencia de una fábrica-b cristalítica donde los rasgos calcíticos como las intercalaciones, los hiporevestimientos, los nódulos no se pueden observar

individualmente y la masa basal original ya no se puede identificar. La Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1994) define al horizonte calcico como el producto de la acumulación iluvial de carbonatos secundarios en el suelo, donde predominantemente implica un proceso de descenso y acumulación del carbonato en los horizontes inferiores (Gile *et al.*, 1966). Sin embargo, la acumulación del carbonato en las tierras cacahuatudas y de barro es de tipo ascendente, como lo han propuesto Rabenhorst y Wilding (1986), sólo que en el caso de los suelos del ex lago de Texcoco, la acumulación se presenta a partir de un estrato calcáreo de origen lacustre formado por el intemperismo de rocas ígneas y no por rocas calizas, además en la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1975) se menciona la importancia del manto freático y estratos calcáreos en la formación de un horizonte calcico.

Horizontes petrocálcicos. Este tipo de horizontes endurecidos se caracterizan por la presencia de diferentes tipos de **rellenos de tipo denso completo** formados por cristales micríticos y esparíticos o por materiales amorfos los cuales se formaron por los ciclos húmedos y secos procesos característicos de los suelos del ex lago de Texcoco.

En el suelo se forma un horizonte cementado cuando el material cementante es un compuesto secundario, es decir, un material autógeno que se precipita en el lugar a partir de la solución del suelo más que del material parental (Soil Survey Staff, 1994). La cementación incipiente ocasionada por el carbonato de calcio se manifiesta por la acumulación de cristales en la superficie de los espacios vacíos, agregados y poros canales de raíces y fauna del suelos (Flach *et al.*, 1969), después avanza invadiendo progresivamente todos los poros hasta formar una masa homogénea de cristales distribuidos en toda la matriz (Chadwick *et al.*, 1987).

En los suelos del ex lago de Texcoco, específicamente en las tierras blancas se presentan cuatro horizontes fuertemente cementados por carbonato de calcio con características macro y micromorfológicas diferentes. Sus principales características son:

1. Horizonte nodular con rellenos micríticos. Es un horizonte de transición entre el estrato nodular y el laminar. El carbonato de calcio de estos estratos está sufriendo procesos diagenéticos (principalmente disolución) y se está produciendo carbonato secundario el cual se está precipitando en los poros. El endurecimiento de este estrato se realizó a través de la lixiviación y precipitación del carbonato en los

horizontes inferiores (Gile *et al.*, 1966). Por las características macro y micromorfológicas, este horizonte se designó como un horizonte petrocálcico

2. Horizonte nodular calcítico con rellenos de materiales amorfos. La exposición temporal a la superficie de los estratos nodulares e inundaciones constantes permitieron la formación de rellenos laminares silíceos entre los nódulos hasta provocar su cementación. Los escasos procesos de intemperismo evidenciados por la abundancia de vidrios volcánicos y olivina, minerales fácilmente alterables (Gutiérrez, 1997), indican que la sílice no se originó como resultado de la alteración del vidrio volcánico, sino que tuvo un origen externo, probablemente a partir de aguas saturadas durante los periodos de inundación. Los revestimientos microlaminados son evidencias de que la penetración de la sílice, desde la superficie hasta los horizontes más profundos, fue lenta hasta rellenar los poros y cementar el material. Este horizonte puede designarse como duripán, pues la sílice se encuentra en la solución del suelo a partir de aguas ricas en sílice y no del material madre.

3. Horizonte laminar calcáreo. Este horizonte se desarrolla a partir del estrato laminar donde los cristales micríticos se presentan empaquetados densamente junto con restos de microorganismos. Se formó por secamiento de los sedimentos cuando afloraron a la superficie. No tiene rasgos como hipo-revestimientos, revestimientos o rellenos que indiquen movimiento del carbonato de calcio en el perfil del suelo, por lo que no tiene un equivalente en la taxonomía de suelos y no se pudo clasificar dentro de este sistema.

4. Horizonte amorfo silicio-calcítico. Compuesto por agregados con materiales amorfos y fisuras rellenas con cristales micríticos o cristales aciculares. Se formó por el afloramiento de los sedimentos e inundaciones periódicas. Esto permitió el agrietamiento de los sedimentos lacustres arcillosos (jaboncillo) y la posterior penetración del carbonato de calcio del estrato suprayacente para precipitarse rápidamente en las fisuras en forma micrítica. La cementación de este horizonte fue un proceso posterior, una vez que se conjuntaron el carbonato de calcio secundario y la sílice de los agregados. Este horizonte endurecido puede clasificarse como un horizonte petrocálcico, sin embargo, no se encontró en la literatura un proceso donde se haya presentado cementación por la combinación de dos estratos compuestos por materiales cementantes de distinta naturaleza.

CONCLUSIONES

Las acumulaciones de carbonato de calcio observadas se dividen en lacustres y pedogénicas. Las lacustres son abundantes y llegan a formar estratos laminares y nodulares bien definidos en las tierras blancas. Los estratos laminares se formaron por la intensa actividad biológica y altas concentraciones de calcio y aguas tranquilas y moderadamente profundas, que provocaron que el carbonato se precipitara micríticamente. Los nódulos calcíticos se formaron en las playas en aguas agitadas y ricas en carbonato de calcio y con fuertes evaporaciones, lo que generó la disminución en la concentración del bióxido de carbono y, por lo tanto, favoreció la precipitación del carbonato de calcio.

El carbonato pedogenético se está formando a partir de los carbonatos lacustres por procesos de disolución y evaporación, en suelos con textura fina hasta generar un horizonte calcítico. El horizonte petrocálcico no está relacionado con el calcítico y se formó por la combinación de procesos lacustres (acumulación) y pedogenéticos (diagénesis).

Todos los carbonatos son de calcita y no de aragonita a pesar de las condiciones de hipersalinidad que imperan en el lago.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Dra. Claudia Hidalgo Moreno, del Colegio de Postgraduados, y a la Dra. Klaudia Oleschko, de la UNAM, sus correcciones y comentarios.

LITERATURA CITADA

- Bathurst, R.C.G. 1971. Carbonate sediments and their diagenesis: Developments in sedimentology 12, Elsevier Pub., N.Y. USA.
- Brewer, R. 1964. Fabric and minerals analysis of soil. Wiley, New York, N.Y. USA.
- Bullock, P., N. Federoff, A. Jongerius, G. Stoops y T. Tursina. 1985. Handbook for soil thin section description. Waine Research Publications, Wolverhampton, England.
- Chadwick, O.A., D.M. Hendricks y W.D. Nettleton. 1987. Silica in duric soil. I. A depositional model. Soil Sci. Am. J. 51: 975-982.
- Courty, M.A., R.P. Dhir y H. Raghavan. 1987. Microfabrics of calcium carbonates accumulations in arid soil of the Western India (Rajasthan). pp 227-234. In: Soil Micromorphology: Proceedings of the VIIth International Working Meeting of Soil Micromorphology. Paris, France.
- De Paepe, P. 1991. Principles of petrology. International Training Center. Ghent Belgium.
- Drees, L.R. y L.P. Wilding. 1987. Micromorphic record and interpretation of carbonate forms in the Rolling Plains of Texas. Geoderma 40: 157-176.

- FAO. 1990. Guidelines for soil profile description. 3er (revised) ed. FAO, Roma/ISRIC. Wageningen, Netherlands.
- Flach, K.W., W.D. Nettleton, L.H. Gile y J.G. Cady. 1969. Pedocementation: induration by silica, carbonates and sesquioxides in the cuaternary. *Soil Sci.* 107: 442-453.
- Folk, R.J. 1974. The natural history of crystalline calcium carbonate: effect of magnesium content and salinity. *J. Sediment. Petrol.* 44: 40-53.
- Freyt, P. y J.C. Plaziat. 1979. Les ooïdes calcariés continentaux: diversité des formes, des gisements, des modes de formation. *Rech Géog. à Strasbourg* 12: 69-80.
- Friedman, G.M., A.J. Amiel, M. Braun y D.S. Miller. 1973. Generation of carbonate particles and laminites in algal mats-example from sea-marginal hypersaline pool, Gulf of Aquaba, Red Sea: *Am. Assoc. Petroleum Geologists. Bull.* 57: 541-557.
- Gile, L.H., F.F. Peterson y R.B. Grossman. 1966. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soil. *Soil Sci.* 101: 347-360.
- Gutiérrez C., Ma del C. 1987. Los suelos de la ribera del ex lago de Texcoco. Macro y micromorfología. Tesis de Doctorado. Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Gutiérrez C., Ma del C. y C.A. Ortiz-Solorio. 1992. Caracterización de los suelos antropogénicos con problemas de labranza en el ex lago de Texcoco. *Agrociencia serie Agua-Suelo-Clima.* 3(2): 29-47.
- Gutiérrez C., Ma del C., C. A. Ortiz S. y C. Tavarez E. 1995. Los antrosuelos del Valle de México. *Memorias del XXI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo.* Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hgo. México.
- Heinrich, W.M. 1972. Petrografía microscópica. Trad. Pablo Mtz. S. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Kahle, Ch. F. 1974. Ooids from great salt lake Utah, as analogue for genesis and diagenesis of ooids in marine limestones. *J. of Sedimentary Petrology.* 44: 30-39.
- Land, L.S., E.W. Behrens y S.A. Frishman. 1979. The ooids of Baffin, Texas. *J. of Sedimentary Petrology.* 49: 1269-1278.
- Mermut, A.R. y R.J. St. Arnaud. 1981. A micromorphological study of calcareous soil horizons in Saskatchewan Soil. *Can. J. Soil Sci.* 61: 243-260.
- Morras, R. 1972. L'identification des matériaux carbonatés par coloration différentielle. Note Technique No 1. Geologisch Instituut. Rijksuniversiteit Gent, Belgie.
- Murphy, C.P. 1986. Thin section preparation of soil and sediments. Ab. Academic publishers. Great Britain.
- Ortega E., M. 1993. Causas del ensalitramiento y su efecto sobre los suelos. Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Méx.
- Pájaro H., D. y C.A. Ortiz S. 1990. El levantamiento de suelos y su relación con la clasificación y cartografía de clases de tierras campesinas. pp. 19-40. *In: Primer Seminario de Investigación y Servicio en el oriente del Estado de México.* Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Pennak, R.W. 1979. Fresh-water invertebrates of the United States. Wiley- Interscience Publication. USA.
- Rabenhorst, M.C. y L.P. Wilding. 1986. Pedogenesis on the Edwards Plateau, Texas. II New model for the formation of petrocalcic horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 693-699.
- Sanders, H.J. 1983. Reorganizing and improving environmental condition in the high Valley of Mexico. *Applied Geography and Development* 16: 105-116.
- Seghal, J.L. y G. Stoops. 1972. Pedogenic calcic accumulation in arid and semiarid regions of the Indo-Genetic alluvial plain of Erstwhile Punjab (India). Their morphology and origin. *Geoderma* 8: 59-72.
- Servicio Meteorológico Nacional. 1975. Normales climatológicas periodo 1941-1970. Dirección General de Geografía y Meteorología. México.
- Sobecky, T. M. y L.P. Wilding. 1983. Formation of calcic and argillic horizon in selected soil of Texas coast prairie. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 707-715.
- Soil Survey Staff. 1975. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. US Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Agriculture Handbook No. 436.
- 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.
- Stuart, D.M. y R.M. Dixon. 1973. Water movement and caliche formation in layered and semiarid soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37: 323-324.
- Van Reeuwijk, L.P. 1993. Procedures for soil analysis. Tech. Pap. No. 9. 4th ed. ISRIC. Wageningen, Netherlands.
- West, L.T, L.R. Drees, L.P. Wilding y M.C. Rabenhorst. 1988. Differentiation of pedogenic and lithogenic forms in Texas. *Geoderma* 43: 271-287.
- Wieder M. y D.H. Yaalon. 1982. Micromorphological fabrics and development stages of carbonate nodular forms related to soil characteristics. *Geoderma* 28: 203-220.
- Zheng, N. y N. Federoff. 1990. Genesis of calcium carbonate in loess and paleosols in Central China. *In: L.A. Douglas (eds). "Soil micromorphology".* Elsevier Science Publishers. B.V. Amsterdam, Netherlands.

ESTIMACION DEL TONELAJE DE PARTICULAS DE SUELO QUE POTENCIALMENTE CONTRIBUYEN A LA CONTAMINACION DEL AIRE EN EL AREA METROPOLITANA DE MONTERREY, MEXICO

Estimating Tonnage of Soil Particles which Potentially Contribute to Air Pollution in the Metropolitan Area of Monterrey, Mexico

José Návar¹ y Eduardo Treviño

RESUMEN

Este trabajo tuvo por objetivo evaluar las fuentes naturales de contaminación del aire del área metropolitana de Monterrey. El área metropolitana de Monterrey se dividió en cinco sectores y la superficie por uso de suelo por sector fue estimada en fotografías aéreas. El muestreo de suelos, coberturas vegetales y características topográficas se realizaron de mayo a julio de 1995. Se aplicó la ecuación universal de la pérdida de suelo por viento para estimar el total de partículas de suelo que la erosión eólica puede suspender en la atmósfera. La ecuación fue también calibrada para las emisiones de partículas menores a 10 micras. Estos modelos se utilizaron independientemente para cada uso del suelo de cada sector. Observaciones visuales y sobre las fotografías aéreas, coincidentes con las evaluaciones realizadas, identificaron los caminos, calles y colonias sin pavimentar, los terrenos planos desprovistos de vegetación y las construcciones en laderas como las fuentes potenciales más importantes de la contaminación del aire por partículas de suelo. El sector San Bernabé contribuyó con la mayor proporción a la contaminación del aire por partículas de suelo. Por esta razón, las áreas y sector mencionados deben de ser prioritarias cuando se realicen medidas de control de la erosión eólica en el área metropolitana de Monterrey. Basada en el análisis de sensibilidad, la recomendación que se propone es el manejo adecuado de la cobertura vegetal para reducir las emisiones de partículas de suelo a la atmósfera del área metropolitana de Monterrey.

Palabras clave: Erosión eólica, PM_{10} , ecuación universal de erosión eólica.

¹Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Apartado Postal 41, 67700 Linares, Nuevo León, México.

Aceptado: Diciembre de 1997.

SUMMARY

The aim of this report was to evaluate the natural sources of air pollution in the metropolitan area of Monterrey. The metropolitan area of Monterrey was divided into five sectors to be consistent with the air monitoring stations. Sampling of soils, plant cover, and topographic characteristics were conducted from May to July of 1995. The wind soil loss equation was applied to evaluate total amount of soil particles which potentially can pollute the air. The equation was additionally corrected to evaluate emissions of soil particles with less than 10 microns in diameter. These models were independently worked by land use by sector. Field and photographic observations coincident with model estimates identified unpaved roads, streets, settlements, flat fields without vegetation, and settlements in slopes as the most important sources of soil particle emissions. The San Bernabe sector contributed with the largest proportion of soil particles polluting the air. Therefore these areas must receive immediate attention to control air pollution by natural sources in the metropolitan area of Monterrey. Based on the sensitivity analysis, the recommendation proposed was an adequate management of plant cover in the interest of reducing wind soil erosion in the metropolitan area of Monterrey.

Index words: Wind erosion, PM_{10} , universal soil loss equation by wind.

INTRODUCCION

La erosión eólica es el proceso por el cual el viento recoge y transporta partículas de suelo hacia la atmósfera (Wilson y Cooke, 1980). Este proceso reviste particular importancia en los climas áridos y semiáridos, porque son sitios carentes o con escasa cobertura vegetal (Wilson y Cooke, 1980; Schwab *et*

al., 1981; Morgan, 1990). Ecosistemas dominados por períodos estacionales secos están también sujetos a la erosión eólica (Woodruff y Siddoway, 1965). Chepill (en Troeh *et al.*, 1980) señala que las causas básicas de la erosión eólica son pocas y sencillas de comprender: cuando el suelo se encuentra disgregado, dividido finamente y seco, cuando la superficie del suelo se encuentra desprovista de vegetación, y cuando la velocidad del viento es alta, la erosión eólica puede presentarse en forma notoria. De igual forma, la erosión eólica se reduce notablemente cuando el suelo se ha compactado, humedecido y aglomerado en agregados estables y lo suficientemente grandes para resistir la fuerza erosiva del viento, cuando la superficie del suelo se ha ondulado por el efecto de la cubierta vegetal, incorporado residuos vegetales, o cuando la velocidad del viento cerca del suelo ha sido reducida.

Los efectos físicos y económicos de la erosión eólica han sido reportados ampliamente para terrenos agrícolas y praderas por Wilson y Cooke (1980). Para áreas metropolitanas, Wark y Warner (1990) también señalan que las partículas de suelo suspendidas a causa de la erosión eólica provocan daños a la salud humana, al tráfico aéreo y al terrestre, a la propiedad privada y en general modifica algunos procesos naturales de los ecosistemas. Por esta razón, las principales metrópolis del mundo han iniciado programas de monitoreo de la calidad del aire, los cuales raramente identifican las fuentes potenciales de emisión de partículas de suelo a la atmósfera. La diversidad e interacción de estas partículas hacen difícil la identificación de las principales actividades humanas que contribuyen al incremento de la contaminación atmosférica. Por esta razón, la estimación a través del uso de modelos permite evaluar las fuentes naturales potenciales que contribuyen a la emisión de partículas a la atmósfera y pueden señalar aspectos sobre los mejores esquemas de manejo de recursos que contribuyan a eliminar o reducir notoriamente los niveles de contaminación ambiental.

La ecuación universal de la pérdida de suelo por viento es un modelo empírico, similar a la ecuación universal de la pérdida de suelo por agua de Wischmeier *et al.* (1958), desarrollado por Woodruff y Siddoway (1965), y predice la erosión total anual o por tormenta de viento. Debido a que las partículas de suelo suspendidas tienen diferentes velocidades de sedimentación, la ecuación ha sido modificada para

considerar exclusivamente partículas de suelo menores que 10 micras (US EPA, 1980), las cuales permanecen suspendidas mayores períodos de tiempo en la atmósfera.

Este trabajo tuvo como objetivos principales: estimar la contribución de la erosión eólica, determinar los sitios potenciales de mayor contribución y definir objetivamente esquemas de manejo para reducir la carga de partículas de suelo suspendidas en la atmósfera del área metropolitana de Monterrey.

MATERIALES Y METODOS

El Area Metropolitana de Monterrey

El área metropolitana de Monterrey (AMM) se encuentra en el nordeste de México y comprende las municipalidades de: San Pedro, Santa Catarina, San Nicolás, Guadalupe, Apodaca, Escobedo, Juárez, García y Monterrey, con una área total de 236 963 ha.

El clima del AMM, de acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen modificado por García, es seco estepario cálido y extremo con lluvias irregulares a fines de verano (Bs(h')hw(e')) (Limón y Leal, 1995). La orografía, la dirección de los vientos y otros factores geográficos son responsables de gradientes climáticos notorios dentro de la metrópoli. La zona norte es semi-cálida, la zona sur corresponde a un clima templado sub-húmedo, la zona centro, denominada la isla de calor, presenta temperaturas y precipitaciones promedio anual de 22.1 °C y 635 mm y la zona occidental es semi-árida, con temperaturas promedio anual de entre 21 y 22 °C y precipitaciones promedio anual de entre 350 y 500 mm. En general, el área presenta balances hidrológicos negativos aun con precipitaciones mensuales con probabilidades de excedencia de 20 % (Návar *et al.*, 1994).

Los suelos dominantes del AMM, de acuerdo con la clasificación de la FAO, son los Vertisoles con Feozem Calcárico (textura del suelo fina) y Castañozems Lúvicos como subdominantes. Otros suelos de menor importancia en cuanto a superficie ocupada son Rendzina + Litosol (textura del suelo media), Xerosol háplico + Feozem crómico (textura del suelo media) y Rendzina + Litosol (textura del suelo media) (Fuente: Cartas Edafológicas de INEGI).

La vegetación del área es muy diversa y está influenciada por el relieve, el contraste altitudinal, el gradiente climático, los suelos y otros factores

geográficos (Alanís y Cervantes, 1995). Dentro de los tipos de vegetación que predominan se encuentran: 1) bosques mixtos dominados por *Pinus-Quercus*, los cuales se desarrollan en las partes medias y altas de la Sierra Madre Oriental; 2) los matorrales submontanos localizados entre los bosques de *Quercus* y el matorral xerófilo; 3) matorral espinoso con arbustos bajos localizados en la planicie superior y 4) matorral desértico rosetófilo característico de climas más áridos. En el AMM existen otras comunidades vegetales como los pastizales, la vegetación ripárica, los chaparrales, los mezquitales y vegetación secundaria.

El AMM se encuentra ubicada en la región hidrológica del río Bravo (Fuente: Cartas de Ecurrimientos Superficiales de INEGI), dentro de la cuenca del río San Juan. Los ríos de mayor importancia son: el río Santa Catarina y su afluente el río la Silla y cruzan el AMM de oeste a este y el Pesquería, el cual se encuentra localizado al margen norte de la ciudad.

Sectorización del Area Metropolitana de Monterrey

El AMM se dividió en los sectores siguientes: 1) Guadalupe, 2) San Nicolás de los Garza,

3) Obispado, 4) Santa Catarina y 5) San Bernabé; consistentes con ubicación de las estaciones de monitoreo ambiental. Estos sectores cubren aproximadamente las porciones sur, norte-oriental, centro-sur, suroeste y noroeste del AMM, respectivamente (Figura 1).

Inventario de Usos del Suelo

El inventario de usos del suelo se realizó con fotografías aéreas, en blanco y negro, tomadas en abril de 1995 con escala 1:75 000. Con las fotografías aéreas se formó un mosaico en donde se separaron las áreas correspondientes a cada sector. Las áreas se analizaron usando estereoscopia y, de esta manera, se graficaron los polígonos correspondientes de los diferentes usos del suelo para cada sector del AMM.

Los usos del suelo considerados fueron: 1) vegetación nativa, 2) pastizales inducidos, 3) terrenos planos sin vegetación, 4) terrenos agrícolas abandonados, 5) terrenos agrícolas sin irrigación, 6) terrenos agrícolas irrigados, 7) áreas urbanas sin pavimentar, asentamientos humanos irregulares sin pavimentar, 8) zonas en construcción en pendientes pronunciadas y 9) zonas de extracción de material a cielo abierto, tanto activas como abandonadas o como depósitos industriales

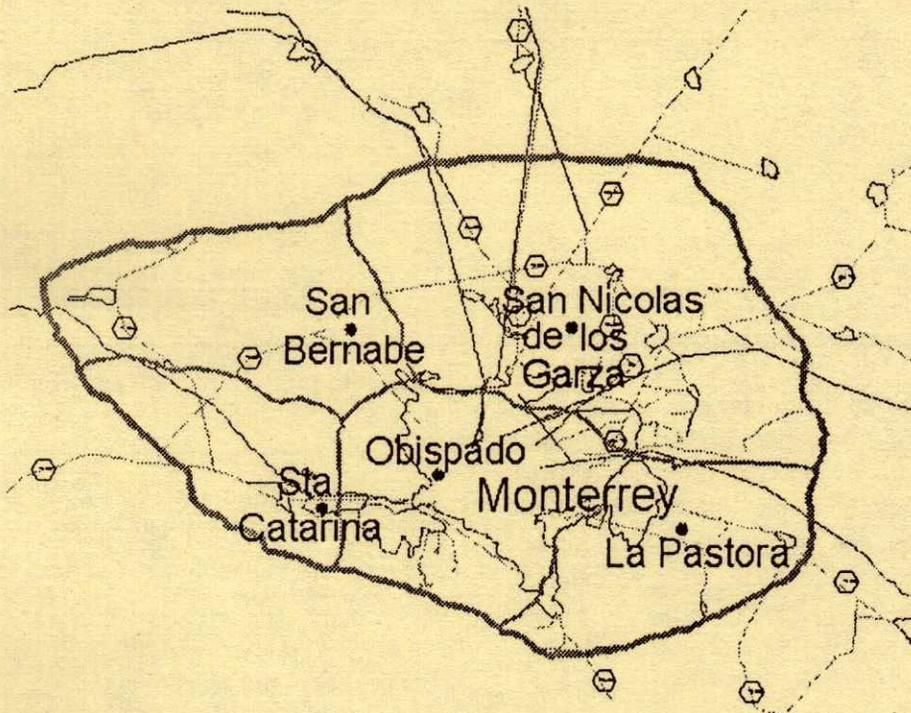


Figura 1. Sectorización del área metropolitana de Monterrey.

Identificación Visual de las Fuentes Naturales de la Contaminación del Aire

La identificación preliminar de las fuentes naturales de la contaminación del aire por erosión eólica fue realizada mediante el análisis de las fotografías aéreas y las visitas al área metropolitana de Monterrey, considerando las experiencias previas del personal involucrado, así como las entrevistas a los pobladores de las áreas observadas. Las visitas a campo se realizaron desde mayo a julio de 1995.

Evaluación de las Fuentes Naturales de la Contaminación del Aire

La ecuación universal de la pérdida de suelo por viento (EUPSW). La metodología para estimar la contribución potencial de las áreas naturales a la erosión eólica total fue la EUPSW, reportada y discutida en los textos de Conservación de Suelo y Agua (Kirkby y Morgan, 1980; Troeh *et al.*, 1980; Schwab *et al.*, 1981; Morgan 1990), así como en los reportes de Woodruff y Siddoway (1965), Skidmore y Woodruff (1968) y Skidmore *et al.*, (1970). La ecuación evalúa la pérdida total anual del suelo en toneladas por hectárea por año (Ecuación 1).

$$E = [f(I', C', K', L', V')] \quad (1)$$

donde:

f = Función

E = Pérdida anual del suelo por viento ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

I' = Erodabilidad del suelo ($t \text{ ha}^{-1}$)

C' = Factor climático (sin dimensiones)

K' = Factor de rugosidad del suelo (sin dimensiones)

L' = Longitud media del campo (m)

V' = Factor de cobertura vegetal (sin dimensiones)

El factor de erodabilidad del suelo, I'. El factor I' se estimó por medio de 58 muestras de suelo, tomadas de los usos del suelo de los cinco sectores del AMM, con al menos tres repeticiones por tipo de suelo. Las muestras se tamizaron con mallas de 0.84 mm de diámetro y el porcentaje de suelo con agregados mayores que 0.84 mm de diámetro fueron utilizados en la estimación de I. El factor I fue calibrado por medio de la pendiente de los surcos, s(%), a

barlovento. Para el caso de terrenos planos o caminos sin surcos notorios, el factor I no fue calibrado de ninguna manera (Troeh *et al.*, 1980).

El factor climático, C'. El factor C' fue estimado para El Observatorio Meteorológico de Monterrey por medio de la Ecuación 2 (Morgan, 1990).

$$C = \frac{v^3}{(P-E)^2} \cdot \frac{100}{2.9} \quad (2)$$

$$P-E = \sum_{i=1}^n \left[\frac{P_i}{T_i - 10} \right]^{\frac{10}{9}}$$

donde:

P = Precipitación mensual del mes i (pulgadas)

T = Temperatura mensual del mes i (°F)

V = Velocidad del viento promedio anual ($m \text{ s}^{-1}$)

Por falta de datos de precipitación y temperaturas mensuales para los sectores, el factor C' se estimó para El Observatorio Meteorológico de Monterrey (OME) y éste fue calibrado usando la precipitación y temperatura anual de cada sector por un factor estimado para el OME. El factor de corrección fue calculado por la Ecuación 3.

$$\frac{\bar{P}}{\bar{T} - 10} * fc = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{P_i}{T_i - 10} \right]^{\frac{10}{9}} \quad (3)$$

donde:

P = Precipitación promedio anual (pulgadas)

T = Temperatura promedio anual (°F)

El factor de corrección fue usado para estimar (P-E) en la Ecuación 3 y con los datos de velocidad del viento proporcionados por el gobierno del estado de Nuevo León, el factor C' fue estimado para cada sector. El factor de corrección, fc, resultó ser 77.7 C' y fue también calibrado por 100/2.9 para Garden City, Kansas (Woodruff y Siddoway, 1965).

El factor de rugosidad superficial del suelo, K'. El factor K' fue estimado por el procedimiento descrito por Troeh *et al.* (1980) a través de un parámetro Kr, el cual se estimó por el Modelo 4.

$$K_r = \frac{1: X}{1:4} * h \quad (4)$$

donde:

X = l/h;

l = Longitud de surcos o promontorios (cm)

h = Altura de surcos o promontorios (cm)

El factor de angostura del campo, L'. El factor L' fue estimado de acuerdo con el procedimiento detallado por Troeh *et al.* (1980). Debido a que los histogramas de frecuencia de la dirección predominante del viento en las cinco estaciones de monitoreo ambiental presentaron predominancia del sudeste a noroeste, con un ángulo A de 10°, el factor K₅₀ fue el máximo reportado por los métodos descritos, 1.16. Es decir, las fuerzas del viento son paralelas al AMM. El parámetro D₅₀=(L*K₅₀); L' = D₅₀ - 10B; donde B = Altura de las barreras o cortinas rompevientos (m), considera las barreras u obstáculos del viento. Este procedimiento fue usado exclusivamente para terreno agrícolas y pastizales inducidos porque la mayoría de los agricultores utilizan cercas vivas o barreras perimetrales en sus terrenos. El factor L' para áreas planas desprovistas de vegetación, construcción en laderas, zonas extractivas activas y abandonadas y depósitos industriales fue supuesto a ser 0.32 como fue descrito por US EPA (1990).

El factor de vegetación, V'. El factor V' fue estimado con muestras de vegetación tomadas de los diferentes usos del suelo, en áreas de entre 1 y 2 m². La vegetación fue cortada, llevada al laboratorio, secada y pesada. El peso fue extrapolado a kg ha⁻¹. El peso específico fue también estimado por el principio del peso, sumersión, volumen desplazado y peso de agua y material vegetativo. El factor V' fue interpolado de la metodología reportada por Troeh *et al.* (1980), con los valores estimados sobre el peso total seco.

Los factores I', K', C', L' y V' proporcionaron información suficiente para estimar la erosión eólica. Para esto se usaron los nomogramas reportados por Troeh *et al.* (1980) para los terrenos agrícolas en sus diferentes modalidades, pastizales inducidos y vegetación nativa. Para evaluar el aporte de partículas de la superficie ocupada por los caminos, calles sin pavimentar o áreas sin urbanizar, sitios

en construcción sin pavimentar en terrenos con pendientes altas, terrenos planos desprovistos de vegetación, depósitos industriales y zonas de extracción activas y abandonadas consideraron la metodología elaborada por US EPA (1980), la cual es esencialmente descrita por el Modelo 1 con las modificaciones para L' K' y V'. El Comité de Recursos del Aire del estado de California (US EPA, 1980) sugirió un valor constante de 0.32 para L', de 1 para K' y de 1 para V'; por la ausencia de factores control en estos tipos de uso del suelo.

Estimaciones del volumen de partículas menores que 10 micrones. La EUPSW se corrigió por el PM₁₀ y se denominó EUPSWPM₁₀ con la Ecuación 5.

$$E_{PM_{10}} = E \cdot a \cdot k \quad (5)$$

donde:

a = Porción de las pérdidas totales anuales por viento medidos como partículas en suspensión PM

k = Porción de las partículas en suspensión PM medidas como PM₁₀

Los valores de los factores de corrección a y k se obtuvieron del reporte de la US EPA (1980).

Análisis de Sensibilidad

La incertidumbre y el conocimiento de los factores que controlan el modelo EUPSW para cada uso del suelo, en cada sector se obtuvieron por medio de un análisis de sensibilidad, descrito por el Modelo 6:

$$\frac{\delta E}{\delta X} = \frac{\partial E}{\partial X} \delta X \quad (6)$$

donde:

E = Erosión total por sector del AMM

X = Parámetro de la ecuación con 95 % de intervalo de confianza

Los intervalos de confianza al 95 % fueron estimados para cada parámetro de la ecuación EUPSW para cada tipo del uso del suelo para cada sector. Con esta información se corrió el Modelo 1. Los parámetros cambiantes fueron: I', C', K' y V'.

RESULTADOS

Identificación de las Fuentes Naturales de la Contaminación del Aire

El área total estimada de las fotografías aéreas fue 252 033.5 ha, donde es importante observar que aproximadamente 50 % de la superficie está cubierta por vegetación nativa tanto por matorrales submontanos y matorrales medianos subinermes como por matorrales rosetófilos o vegetación xérica (Figura 2). 74 % de la superficie es utilizada para propósitos agropecuarios como agostaderos, terrenos agrícolas en sus diferentes modalidades y praderas. El 26 % restante está dedicado a superficies urbanizadas, conurbadas no urbanizadas, zonas de extracción a cielo abierto, activas y abandonadas y desprovistas de vegetación.

Las observaciones realizadas durante las visitas de campo, indicaron que los caminos sin pavimentar localizados en las áreas conurbadas, los terrenos agrícolas y pastizales abandonados localizados en la región occidental y las zonas de extracción activas a cielo abierto de la metrópoli contribuyen con

una mayor proporción de emisión de partículas suspendidas. Las tormentas de polvo causadas por el viento y por el tráfico vehicular fueron observadas en las primeras dos áreas mencionadas anteriormente. Tolvaneras de importancia causadas por el viento se observaron en campos desprovistos de vegetación, campos de fútbol y béisbol, en depósitos industriales y en caminos sin pavimentar.

Evaluación de las Fuentes Naturales de la Contaminación del Aire

Tonelaje total de partículas en suspensión. La erosión eólica total estimada por el Modelo 1 fue de 763 724.63 toneladas por año. Por sector es reportada en la Figura 3. Esta es aproximadamente el doble de la cantidad evaluada para el área metropolitana del Distrito Federal (Consejo de Asesores, 1992). Sin embargo, la superficie estimada del AMM es aproximadamente 3.52 veces mayor que aquella evaluada para el Departamento del Distrito Federal. El factor de emisión de partículas totales del AMM corresponde a $3.61 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

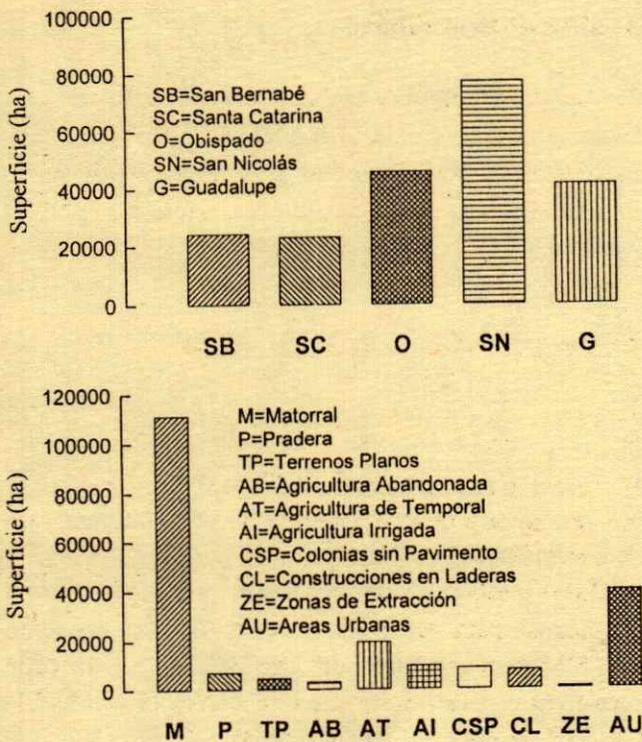


Figura 2. Superficies por uso del suelo por sector en el área metropolitana de Monterrey.

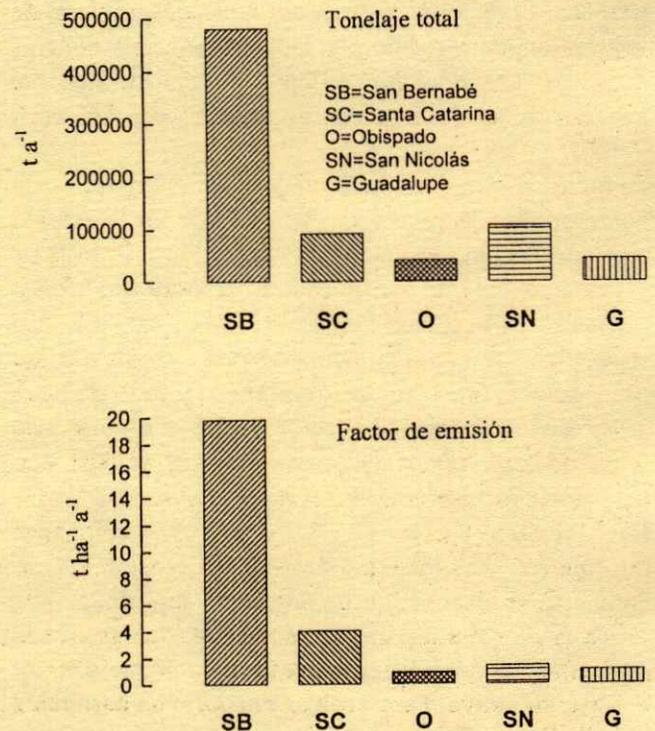


Figura 3. Erosión eólica total por sector estimada por la ecuación universal de la pérdida de suelo por viento en el área metropolitana de Monterrey.

Los sectores presentaron variaciones en su contribución a la erosión eólica total (Figura 3). San Bernabé, Santa Catarina, Obisnado, San Nicolás y Guadalupe contribuyeron con 62.80, 12.05, 5.39, 14.08 y 5.67 %, con factores de emisión (Erosión Eólica Total por Sector/Superficie Total del Sector) de: 19.78, 4.00, 0.90, 1.39 y 1.05 t ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Los sectores San Bernabé y Santa Catarina combinados aportan 75 % del tonelaje total estimado a pesar de que su área es sólo 22 %. Los sectores siguientes en orden descendente contribuyeron tanto en cantidad como en factor de pérdida de suelo por viento: 1) San Bernabé, 2) Santa Catarina, 3) San Nicolás, 4) Guadalupe y 5) Obisnado, respectivamente. El gradiente en pérdida de suelo por viento es notorio, se incrementa del oriente hacia el norte y hacia el poniente del AMM. Las causas principales del gradiente son posiblemente: el factor climático, que se incrementa la aridez notoriamente en la misma dirección, el factor vegetativo decrece en la dirección opuesta, las densidades de los tipos de uso del suelo (áreas no pavimentadas y las construcciones en laderas) incrementan en la dirección del gradiente climático.

La contribución a la carga suspendida total en porcentaje y en factor de emisión por tipo del uso del suelo mostró la siguiente tendencia (Figura 4): matorrales nativos (14.56 % y 1.00), praderas (1.63 % y 1.77), terrenos planos sin vegetación (9.12 % y 15.43), agricultura abandonada (4.15 % y 10.49), agricultura de temporal (25.05 % y 9.85), agricultura de riego (1.25 % y 1.00), colonias sin pavimento (23.072 % y 20.52), construcción en laderas (20.84 % y 20.78) y zonas de extracción (0.31 % y 3.55). Aunque la agricultura de temporal y los matorrales nativos contribuyeron con altos porcentajes a la carga total de materiales suspendidos, las construcciones en laderas, colonias sin pavimento y terrenos planos desprovistos de vegetación produjeron los más altos porcentajes y factores de emisión. 53 % del tonelaje total de partículas en suspensión es explicado por 9.8 % del uso del suelo del AMM (terrenos planos sin vegetación, colonias sin pavimento y construcciones en laderas).

Partículas en suspensión menores que 10 micrones, PM₁₀. La contribución de la erosión eólica del AMM al PM₁₀ por sector es reportada en la Figura 5, con un total de 12 195.24 t año⁻¹. Sin embargo, este parámetro fue también altamente variable para los cinco sectores.

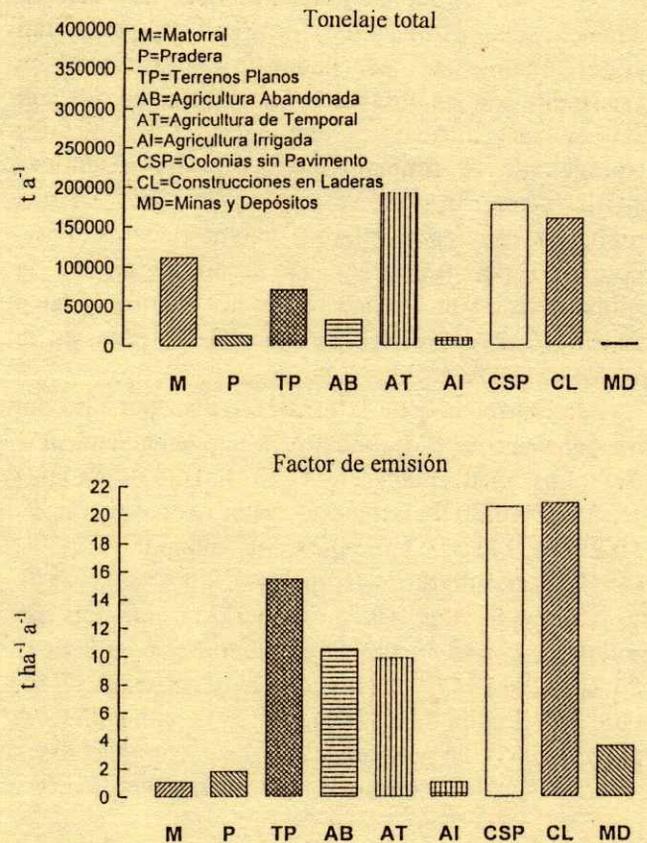


Figura 4. Erosión eólica total por uso del suelo estimada por la ecuación universal de la pérdida de suelo por viento en el área metropolitana de Monterrey.

La contribución parcial por sector fue de 64.5, 12.37, 5.46, 12.73 y 4.93 % para San Bernabé, Santa Catarina, Obisnado, San Nicolás de los Garza y Guadalupe, respectivamente. Los sectores nor-occidentales contribuyen con la mayor cantidad de PM₁₀ que los sectores centro-sureste del AMM. En particular, San Bernabé contribuyó con la mayor proporción y cantidad absoluta de PM₁₀.

Los factores de emisión de PM₁₀ por sector fueron los siguientes: 0.3240, 0.0656, 0.0146, 0.02011 y 0.0145 t ha⁻¹ año⁻¹. Aunque la contribución total al PM₁₀ es similar en Santa Catarina y San Nicolás de los Garza, el sector de Santa Catarina tiene un factor de emisión de PM₁₀ 3.2 veces mayor. Los sectores centro-orientales del AMM tuvieron los factores de emisión menores que los sectores occidentales. Gráficas de los promedios geométricos observados de PM₁₀ por las estaciones de monitoreo del aire versus los tonelajes de PM₁₀ estimados por el Modelo 5 en forma de factor de emisión muestran una buena correlación y el

patrón es en forma de potencia. Esta información indica que las estimaciones de PM_{10} se encuentran proporcionalmente adecuadas y es también consistente con las observaciones visuales en relación con la identificación preliminar de las fuentes naturales de la contaminación del aire discutidas anteriormente. La consistencia de los valores estimados con los promedios geométricos de PM_{10} reportados por las estaciones de monitoreo de la calidad del aire indica que la erosión eólica contribuye para explicar parcialmente el PM_{10} en la atmósfera del AMM.

La contribución de la erosión eólica por tipo del uso del suelo al PM_{10} mostró la siguiente tendencia (Figura 6): matorrales (11.4 % 0.0124), praderas (1.27 %, 0.0221), terrenos planos sin vegetación (10.85 %, 0.2932), agricultura abandonada (3.24 %, 0.1312), agricultura de temporal (19.60 %, 0.1231), agricultura de riego (0.98 %, 0.0125), colonias sin pavimento (27.45 %, 0.3898), construcción en laderas (24.81 %, 0.3947) y zonas de extracción (0.37 %, 0.0673) (Figura 5). La agricultura abandonada, las colonias sin pavimento, las construcciones en laderas y los terrenos planos sin vegetación

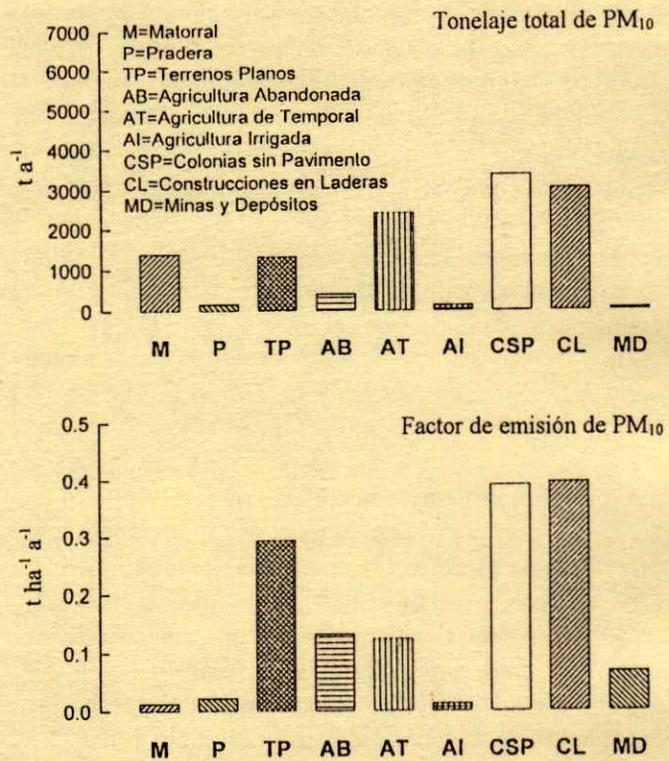


Figura 6. Partículas de suelo menores que 10 micrones por uso del suelo estimada por la ecuación universal de la pérdida de suelo por viento en el área metropolitana de Monterrey.

componen aproximadamente 80 % del PM_{10} , mientras que su área es aproximadamente 20 % del AMM.

Análisis de Sensibilidad

Los resultados parciales del análisis de sensibilidad demuestran que las variaciones totales de E por cambios en los parámetro I', C', K' y V' fueron 69, 71, 92 y 32 %, respectivamente (Cuadro 1). Las variaciones en los parámetros I' y C' resultaron muy similares y las variaciones en K' no parecen ser significativas en contraste con las variaciones del parámetro V'. El parámetro I' tuvo su máximo cambio en la erosión eólica total en el sector San Bernabé, ésta varió en 62 % con un cambio en I' a 95 %. El sector San Bernabé también registró el máximo cambio en la erosión eólica total con un cambio en el factor C'. El cambio del factor climático a 95 % de su valor de precipitación registra un cambio en la erosión eólica de 479621.548 $t año^{-1}$ a 716471.93 $t año^{-1}$. El sector Guadalupe registra el máximo cambio en la erosión eólica total por cambios

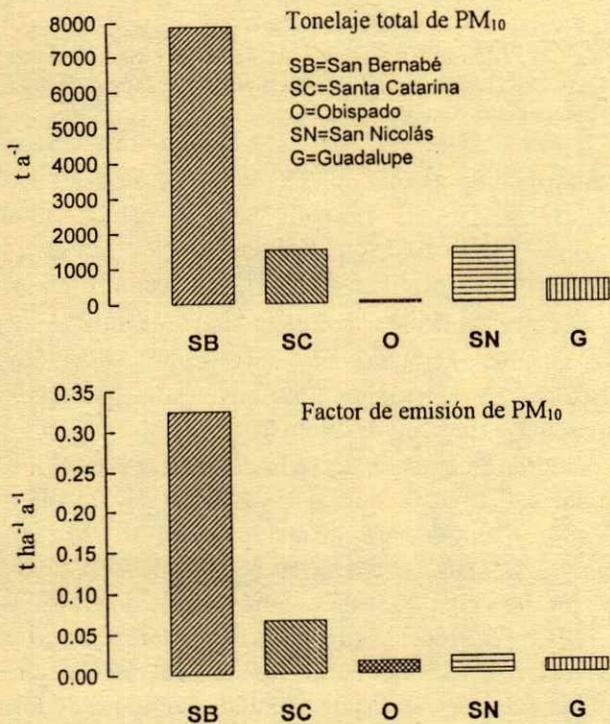


Figura 5. Partículas de suelo menores que 10 micrones por sector estimada la ecuación universal de la pérdida de suelo por viento en el área metropolitana de Monterrey.

Cuadro 1. Estimación de la erosión eólica total y de partículas de suelo menores que 10 micrones por la ecuación universal de la pérdida de suelo por viento por uso de suelo por sector en el área metropolitana de Monterrey.

Sector	Uso de suelo	Erosión E	Análisis de sensibilidad				PM ₁₀	
			C' ETotal	I' ETotal	K' ETotal	V' ETotal		
San Bernabé	Matorral	4255	4255	4255	4255	140443	53	
	Praderas	304	486	152	273	608	3	
	Terrenos sin vegetación	53077	75651	46322	53077	53077	1008	
	Agricultura abandonada	21100	39789	16880	21703	79578	263	
	Agricultura de temporal	166370	262034	158052	224600	166370	2079	
	Colonias sin pavimento	113228	161386	33442	113228	113228	2151	
	Construcción en laderas	120659	171976	35636	120659	120659	2292	
	Zonas de extracción (Pedreras)	625	891	472	625	625	11	
	Totales/sector	479621	716471	295214	538424	674590	7864	
Sta Catarina	Matorral	16885	16885	16885	16885	337719	211	
	Praderas	398	710	216	739	853	4	
	Terrenos sin vegetación	14122	20211	12324	14122	14122	268	
	Agricultura abandonada	9539	13736	5876	8394	18315	119	
	Agricultura de temporal	10085	14119	9278	11698	17749	126	
	Colonias sin pavimento	22792	32625	5405	22796	22796	433	
	Construcción en laderas	18242	26107	16609	18242	18242	346	
	Totales/sector	92065	124396	66596	92878	429798	1509	
	Obispado	Matorral	17547	17547	17547	17547	78963	219
Praderas		149	245	106	213	363	1	
Terrenos sin vegetación		1143	1630	998	1143	1143	21	
Colonias sin pavimento		723	1030	213	723	723	13	
Construcción en laderas		20152	20152	20152	20152	20152	382	
Zonas de extracción (Pedreras)		1439	2051	768	1439	1439	27	
Totales/sector		41156	42658	39787	41220	102785	666	
San Nicolás		Matorral	47088	47088	47088	47088	164809	588
		Praderas	9474	16579	7579	16106	24632	118
	Terrenos sin vegetación	1176	1807	1107	1268	1176	22	
	Agricultura abandonada	1050	1575	1050	1050	7035	13	
	Agricultura de temporal	9926	9926	9926	9926	129043	124	
	Agricultura de riego	8045	8045	8045	8045	84478	100	
	Colonias sin pavimento	30578	43567	9031	30578	30578	580	
	Construcción en laderas	169	2382	1579	1671	169	3	
	Zonas de extracción (Pedreras)	69	98	52	69	69	1	
Totales/sector	107578	131070	85459	115804	441992	1552		
Guadalupe	Matorral	25466	25466	25466	25466	509324	318	
	Praderas	2100	3150	2100	2730	25203	26	
	Terrenos sin vegetación	163	232	142	163	163	3	
	Agricultura de temporal	4930	4930	4930	4930	147928	61	
	Agricultura de riego	1516	1516	1516	1516	1516	18	
	Colonias sin pavimento	8883	12657	6476	8884	8883	168	
	Zonas de extracción (Pedreras)	242	345	183	242	242	4	
	Totales/sector	43303	48299	40816	43933	693262	601	
	Totales	763724	1062897	527874	832262	2342429	12195	

en el factor V'. Los cambios son más notorios cuando se reduce la cobertura vegetal de los matorrales nativos.

La variación máxima del tonelaje total potencial causado por la erosión eólica fue por la variación en el factor V' del Modelo 1. Es decir, E puede variar

desde 244391.88 hasta 2386639.465 t ha⁻¹ año⁻¹. Los sectores más sensibles a los cambios de este parámetro fueron Guadalupe con 6 %, Santa Catarina con 21 % y San Nicolás de los Garza con 24 %.

DISCUSION

Los sectores donde se deben de implementar las medidas de mitigación inmediatas tendientes a reducir la erosión eólica y la consiguiente emisión de PM₁₀ a la atmósfera en orden de importancia son: San Bernabé, Santa Catarina y San Nicolás de los Garza. Estos conjuntamente contribuyen con 89 % de la erosión eólica potencial del AMM. Los usos del suelo con mayor contribución en la EUPSW y las EUPSWPM₁₀ fueron: construcciones en laderas, colonias sin pavimento, terrenos planos sin vegetación y terrenos agrícolas tanto abandonados como activos de temporal, con aproximadamente 93 % de la erosión eólica total y con una superficie menor que 25 % del AMM.

El análisis de sensibilidad mostró que cambios en el factor I' podrían eventualmente reducir la erosión eólica del AMM por medio del incremento del número y dimensiones de los agregados del suelo. La materia orgánica es uno de los principales agregantes naturales de las partículas de suelo por la acción hidrofóbica y antiexpansiva que ejerce en los agregados del suelo, lo cual resulta en mayores estabildades de agregación (Davidson y Page, 1956; El-Swaify y Emerson, 1975; Kimmer y Greenland, 1976; Hillel, 1980). La materia orgánica también incrementa las poblaciones de microorganismos del suelo, los cuales facilitan y aceleran procesos de agregación tales como la absorción, envoltura y cementación por los productos mucilaginosos excretados (Hillel, 1980; 1982). Dentro del los productos microbianos capaces de cementar los agregados se encuentran los polisacáridos, las hemicelulosas y muchos otros polímeros. La incorporación de materia orgánica en los suelos agropecuarios del AMM puede provenir de la cobertura vegetal nativa y de la incorporación de residuos orgánicos en los terrenos agrícolas de temporal. Esto incluye un manejo adecuado del pastoreo y un control estricto en cambios de uso del suelo. Estas prácticas podrían reducir E' potencialmente hasta 69 % del total estimado.

Cambios en el factor C' implican incrementos en la disponibilidad del agua, reducciones en las

temperaturas o la velocidad de los vientos. La variación de las precipitaciones mensuales es la más crítica del factor C'. El incremento de la cantidad del agua, para proyectos de irrigación de los terrenos agrícolas y praderas existentes en el AMM es poco probable, siendo el agua una comodidad poco disponible en el área. Por el contrario, la reducción de áreas irrigadas resultaría en incrementos importantes en E. Proyectos de conservación de agua *in situ* podrían eventualmente reducir el factor climático y parcialmente E y el PM₁₀, al mismo tiempo de incrementar la producción de terrenos agrícolas, agostaderos y praderas. Estas prácticas de captación de agua requieren recursos e incentivos pero sobretodo concientización de los manejadores de los terrenos agropecuarios. Los programas de captación de agua *in situ*, suponiendo que toda la lluvia es captada en su lugar de origen, la reducción de E podría eventualmente ser hasta 71 % de la estimación actual.

Cambios en el factor K' no resultaron ser tan importantes en E. La reducción de la microtopografía de los terrenos tampoco es viable y su repercusión en E es del orden de 8 %. Sin embargo, este factor podría implementarse con la reducción de la rugosidad de los terrenos agrícolas y praderas, conservando exclusivamente terrazas o bordos cubiertos con árboles y arbustos nativos, sistemas agroforestales un tanto extensivos, como microrelieves importantes.

Las actividades de protección, conservación y restauración de la cobertura vegetal en toda el área metropolitana de Monterrey son claves en el manejo de la contaminación ambiental causada por las fuentes naturales. El análisis de sensibilidad muestra que el sector Guadalupe puede potencialmente incrementar la erosión eólica hasta en 1600 % si la cobertura de los matorrales nativos se reduce en 95 %. Por otro lado, un buen mantenimiento de la cobertura forestal, pecuaria y agrícola reducen la erosión eólica del AMM hasta 244391.68 t año⁻¹, casi 1/3 de la erosión eólica actual, el equivalente a 1 t ha⁻¹ año⁻¹. Porque las colonias sin pavimento, las construcciones en laderas, los terrenos planos desprovistos de vegetación y los terrenos agrícolas de temporal son los usos del suelo que más contribuyen a la erosión eólica y por consiguiente a la contaminación ambiental; las plantaciones o reforestaciones podrían eventualmente resolver parcialmente éste problema. Las plantaciones, como cortinas rompevientos o cercas vivas de terrenos agropecuarios, caminos, terrenos

particulares, colonias sin pavimento, etc. ejercen el efecto de sombra al viento, reduciendo su velocidad en una longitud a sotavento de hasta por 10 veces la altura de la vegetación. La reducción en la velocidad del viento disminuye el valor del factor climático, incrementa el valor de cobertura vegetal, reduce el área disponible a ser erosionada por la fuerza del viento (Bennett, 1939; Kirkby y Morgan, 1980; Morgan, 1990) y también proporciona materia orgánica para estabilizar los agregados del suelo, incrementando el volumen de los pedones del suelo y por consiguiente reduciendo el valor del coeficiente I.

Los programas de reforestación en el área metropolitana de Monterrey deben de considerar las especies nativas. Introducción de especies exóticas demanda mayores volúmenes de agua, suelos y microclimas más particulares y, en general, tienen menores posibilidades de sobrevivencia. Las especies nativas, por el contrario, están adaptadas a las condiciones microclimáticas locales, no disturbán el paisaje escénicamente y cumplen con los conceptos del manejo sustentable de la contaminación ambiental.

CONCLUSIONES

La ecuación universal de la pérdida de suelo por viento fue utilizada para predecir la contaminación del aire por fuentes naturales en el área metropolitana de Monterrey. La metodología identificó, consistente con las mediciones de algunos parámetros de la calidad del aire, los sectores occidentales como los más impactantes en la contaminación del aire. La metodología también identificó las colonias sin pavimento, las áreas planas desprovistas de vegetación, las construcciones en laderas desprovistas de vegetación y los terrenos dedicados a la agricultura temporalera como los principales usos del suelo que contribuyen a la contaminación del aire de la metrópoli. El análisis de sensibilidad indicó que las variaciones en la cobertura vegetal son los que revisten mayor importancia en el control y manejo de la erosión eólica potencial.

LITERATURA CITADA

Alanís F., G.J. y B. Cervantes J. 1995. 1.4. Vegetación. *In:* Garza, V.J. (ed.). Atlas de Monterrey. Gobierno del Estado de Nuevo León. Monterrey, N.L. México.

- Bennett H., H. 1939. Soil conservation. McGraw Hill Book Co. Inc. New York.
- Davidson S.,E. y J. Page B. 1956. Factors influencing swelling and shrinkage in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20: 320-324.
- El-Swaify S., A. y W. Emerson W. 1975. Changes in the physical properties of soil clays due to precipitation aluminum and iron dydroxides. I. Swelling and aggregate stability after drying. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 1056 -1063.
- Consejo de Asesores. 1992. Estudio de emisión de partículas a la zona metropolitana de la ciudad. de México generadas por fuentes naturales, elaborado para: Departamento del Distrito Federal.
- García O., R. y G. Garza. 1995. Monterrey: Centralidad urbana. *In:* Garza, V.J. (ed.). Atlas de Monterrey. Gobierno del Estado de Nuevo León. Monterrey, N.L. México.
- Hillel, D. 1980. Fundamentals of soil physics. Academic Press, New York, USA.
- Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics. Academic Press Inc. New York, USA.
- Kimmer D., L. y D. Greenland J. 1976. Effects of calcium carbonate on the swelling behavior of a soil clay. *J. Soil Sci.* 27: 129-139.
- Kirkby M., J. y R. Morgan C. 1980. Erosión de suelos. Limusa, México.
- Limón, R.B. y I. Leal J. 1995. 1.5 Climatología. *In:* Garza, V.J. (ed.). Atlas de Monterrey. Gobierno del Estado de Nuevo León. Monterrey, N.L. México.
- Morgan R., P.C. 1990. Soil erosion and conservation. Logman Scientific & Technical, N.Y. USA
- Návar J., T. Cavazos y P. Domínguez A. 1994. Balances hidrológicos mensuales en el estado de Nuevo León. *In:* C. Pola S., J.A. Ramírez F., M.M. Angel R. y I. Navarro-L. (eds). Actas Fac. Ciencias Tierra UANL Linares 8: 71-82.
- Schwab G., O., R. Frevert K., T. Edminster W. y K. Barnes K. 1981. Soil and water conservation engineering. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Skidmore E., L P. Fisher S. y N. Woodruff P. 1970. Wind erosion equation: Computer solution and application. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 931-935.
- Skidmore E., L. y N. Woodruff P. 1968. Wind erosion forces in the United States and their use in predicting soil loss. USDA Agric. Handbook No. 346.
- Troeh F., R., J. Hobbs A. y R. Donahue L. 1980. Soil and water conservation, for productivity and environmental protection. Prentice-Hall., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- US EPA. 1980. Methods for assessing area source emissions in California, (Includes all revisions through November 1990). Air Resources Board, State of California, Section 7-5 & 7-6.
- Wark, K. y C. Warner F. 1990. Contaminación del aire. Origen y control. Ed. Limusa, Noriega.
- Wilson, S.J. y R.V. Cooke. 1980. Erosión eólica. *In:* Kirkby M., J. y R. Morgan C. (Eds). Erosión de suelos. Limusa, México. Capítulo 7.
- Wischmeier W.,H., D. Smith D. y R. Umland E. 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation. *Ag. Eng.* 39: 458-462.
- Woodruff N.P. y F. Siddoway H. 1965. A wind erosion equation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29: 602-608.

EFECTO DE REGULADORES DEL CRECIMIENTO Y TIPO DE SUSTRATO EN EL ENRAIZAMIENTO DE *KALANCHOE*

Growth Regulators and Type of Growing Medium Effect on the Rooting of *Kalanchoe* Cuttings

E. Villanueva R.¹, P. Sanchez G.², N. Rodríguez M.², E. Villanueva N.³, E. Ortiz M.⁴, J. A. Gutiérrez E.⁵

RESUMEN

Tres sustratos y tres mezclas artificiales junto con tres reguladores del crecimiento fueron utilizados para evaluar el enraizamiento de estacas apicales de *Kalanchoe blossfeldiana* (Poelln.) 'Sensation'. Los sustratos, cachaza (CA), peat-moss (PM) y tezontle (TE) se manejaron solos y en mezclas a proporción 1:1:1 de peso/peso en CA+PM+TE (ME); CA+PM 1:1 y CA+TE 1:1. Los enraizadores comerciales fueron Radix 1500® (Ra) con ácido indolbutírico a 1500 ppm; Rootone F® (Ro) conteniendo 1-naftalenacetamida 0.057 % + 2- metil-1-ácido naftalenacético 0.033 % + 2-metil -1- naftalenacetamida 0.013 % + ácido 3- indolbutírico 0.057 %, thiram 4 %; y el ácido salicílico (AS) en grado reactivo a 10⁻⁵ M. Los resultados con diferencias altamente significativos se encontraron en el número de raíces (NR) para la CA+PM con Ra (32.5); en longitud de raíces promedio (LRP) en ME con Ra (1.44 cm); la exploración de raíz (ER) en CA+PM sin hormona (6.2 cm); en altura de planta (AP) fue para esta misma mezcla con AS -(5.8 cm); el mayor peso seco promedio (PSP) se encontró en TE con AS (1.25 g); en el contenido nutrimental (%) de nitrógeno (N) fue mejor en PM con Ra (1.19 %), en fósforo (P) para ME sin regulador (0.5 %) y finalmente el potasio (K) fue similar en CA con Ra, CA+PM con AS y en CA+PM sin regulador (2.9 %).

Palabras clave: *Kalanchoe blossfeldiana*, enraizamiento, sustratos, cachaza, reguladores del crecimiento.

SUMMARY

Three growing media and three artificial mixes with three growth regulators were evaluated as rooting media for *Kalanchoe blossfeldiana* (Poelln.) 'Sensation' cuttings. The growing media, press mud (CA), peat-moss (PM) and volcanic rock (TE) were used alone and mixed in proportion 1:1:1 weight/weight (W/W) in CA+PM+TE (ME), CA+PM 1:1, and CA+TE 1:1. The commercial rootings used were Radix® (Ra) 1500 (with 1500 ppm indole-3-butiric acid); Rootone F® (Ro) with 0.057 % 1-naphthaleneacetamide + 0.033 % 2-methyl-1-naphthaleneacetic acid + 0.013 % 2-methyl-1-naphthaleneacetamide + 0.057 % indole-3-butyric acid + 4 % thiram and the salicylic acid (AS) in rank reagent in 10⁻⁵ M. The results with highly significant differences were found in the number of roots (NR) for CA+PM and Ra (32.5); in the average length of roots (LRP) in ME with Ra (1.44 cm); the root exploration (ER) in CA+PM without growth regulator (6.2 cm); in plant height (AP) also in this mixture with AS (5.8 cm); the highest average in dry weight (PSP) was found in TE with AS (1.25 g); in the nutrimental content (%) of nitrogen (N) was higher in PM with Ra (1.19 %); in phosphorus (P) for ME without growth regulator (0.5 %), and finally in potassium (K) was similar in CA with Ra, CA+PM with AS and in CA+PM without growth regulator (2.9 %).

Index words: *Kalanchoe blossfeldiana*, rooting, growing media, press mud, growth regulators.

INTRODUCCION

El *Kalanchoe blossfeldiana* (Poelln.) pertenece a la familia de las Crasuláceas, originaria de Madagascar y se desarrolla a una temperatura promedio de 15 °C de primavera a verano a una altitud de 2000 m, dentro de un ambiente templado y sombreado a diferencia de los otros miembros de

¹ Programa de Fruticultura, IREGEP, Colegio de Postgraduados (CP), Montecillo, Estado de México.

² Especialidad de Edafología, IRENAT, CP, Montecillo.

³ Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco.

⁴ Especialidad de Botánica, IRENAT, CP, Montecillo.

⁵ Especialidad de Fruticultura, IREGEP, CP, Montecillo.

dicha familia que habitan en áreas secas y soleadas, con hojas gruesas, suculentas adaptadas a ambientes desérticos. Se le clasifica como una planta de día corto, la mayoría de los cultivares requieren de 14 a 15 h de obscuridad continua (9 a 10 h de luz) para desarrollar flores durante cuatro a cinco semanas. El crecimiento de las hojas varía en un día corto o largo, en el primero las hojas son gruesas, suculentas y rígidas, mientras que en el segundo son delgadas y flexibles (William, 1988).

El *Kalanchoe blossfeldiana* (Poelln.) es una planta de maceta con flores coloridas, de larga duración, tolerante a sequía. La variedad 'Sensation' presenta una flor de color rosa (William, 1988). Es considerada por los compradores de flores como la planta perfecta para maceta debido a sus colores brillantes, falta de síntomas de marchitez, una excelente vida de anaquel y buenas cualidades de transporte. Además requiere menos agua que la mayoría de los cultivos y puede forzarse a florecer en cualquier época del año en forma programada para los días de mayor consumo. Las plantas son relativamente resistentes a plagas y enfermedades (Ball Seed, 1992).

El tiempo de producción a partir de semilla varía de seis a 10 meses, pero también puede propagarse vegetativamente a través de esquejes de 10 a 15 semanas.

En la propagación de estacas una parte del tallo, de la raíz o de la hoja es colocada bajo determinadas condiciones ambientales y se le induce a formar raíces y tallo, produciendo así una nueva planta independiente que es idéntica a la cual se produce (Baez, 1985; Hartmann y Kester, 1992).

Los reguladores del crecimiento, tales como las auxinas y etileno han sido utilizados para aumentar el porcentaje de enraizamiento al acelerar la iniciación radical, así como incrementar el número y calidad de las raíces durante el estacado de muchas especies frutales (Hartmann y Kester, 1992).

En la producción de *Kalanchoe*, el tipo de sustrato es muy variado, generalmente los productores utilizan como ingrediente principal el suelo nativo, al cual le agregan algunos mejoradores para incrementar su drenaje y fertilidad. Se usa además la arena o grava para mejorar la aireación y pajas como fuente de materia orgánica. Algunos productores incorporan otros ingredientes a la mezcla, tales como musgo (peat-moss), tierra de hoja o algún otro (Martínez, 1994).

Actualmente en la producción de plántulas y esquejes existe la necesidad de encontrar otros materiales como sustratos agrícolas que presenten máximos beneficios, que sean económicos y fáciles de adquirir, ya que la mayoría de los materiales que se encuentran en el mercado son de importación y con un costo elevado. Además, la extracción de suelo de bosque representa un problema ecológico que deteriora el ambiente natural.

Una alternativa como sustrato puede ser la cachaza, que es el residuo en forma de lodo que se elimina en el proceso de clarificación del jugo de caña, durante la fabricación de azúcar crudo (Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, ICIDCA, 1990).

Este producto se ha utilizado como abono orgánico en la alimentación de ganado y en la extracción de cera. Otros productos que pueden obtenerse de la cachaza son los fitoesteroides para la producción de hormonas y biogas (López, 1986).

La abundancia de la cachaza, los problemas que genera en los ingenios debido a su rápida acumulación y la contaminación del ambiente, así como de su amplia aceptación de parte de los productores de la zona, hacen necesario investigar los diferentes efectos de la aplicación de la cachaza en las características físicas, químicas y biológicas de los suelos agrícolas, y en el rendimiento y la calidad de las cosechas.

De acuerdo con lo anterior, la cachaza puede ser una alternativa para sustituir a los materiales de importación o a aquellos que representan problemas ambientales encontrando diversidad de usos a un producto que genera conflictos.

Con base en lo antes expuesto los objetivos del presente trabajo son: evaluar la eficiencia de enraizamiento de *Kalanchoe blossfeldiana* (Poelln.) utilizando como sustratos: cachaza, peat moss, tezontle y algunas mezclas de éstos; evaluar la eficiencia de enraizamiento de *Kalanchoe blossfeldiana* (Poelln.) utilizando productos comerciales (Radix 1500®, Rotone F®) y ácido salicílico 10^{-5} M.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo fue realizado en las instalaciones comerciales de producción de rosal para flor de corte "Florge" ubicadas en el municipio de Texcoco de Mora, estado de México.

El material vegetal fue esquejes de *Kalanchoe blossfeldiana* (Poelln.) 'Sensation'. Los sustratos a probar fueron: cachaza, peat-moss, tezontle y las mezclas en proporción 1:1:1 con base en peso/peso (P/P), cachaza:peat-moss y cachaza:tezontle 1:1 P/P, con lo cual se obtuvo un total de seis sustratos con dos enraizadores comerciales Radix 1500® (Ra), Rotone F® (Ro) en polvo y ácido salicílico (AS) 10^{-5} M grado reactivo aplicado en inmersión durante 1:30 horas. Se utilizaron charolas con un volumen de cavidad de 120 cm³. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones con un total de 96 unidades experimentales (seis sustratos x cuatro enraizadores x cuatro repeticiones) siendo una cavidad la unidad experimental.

Las variables a evaluar fueron: número de raíces (NR), longitud de raíces promedio (LRP), exploración de raíz (ER), diámetro del tallo (DT), altura de la planta (AP), número de hojas (NH), peso seco promedio (PSP), contenido endógeno de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). En los sustratos se determinaron: pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (% MO), nitrógeno total (% NT), relación carbono/nitrógeno (C/N) fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Los esquejes utilizados tuvieron un tamaño aproximado de 4 cm de largo, los cuales se obtuvieron cortando las partes apicales de las plantas madres con ayuda de unas tijeras de podar; estas plantas se encontraban en macetas de dos pulgadas. El experimento se estableció el día 2 junio de 1997 y 25 días después se evaluaron las variables indicadas.

Los riegos se realizaron por aspersión dos veces al día (mañana y tarde), y al sustrato cada dos días, los cuales se fueron alargando conforme avanzaba el enraizamiento.

El análisis de la información se realizó con ayuda del programa Statistical Analysis System (SAS) y se

hicieron los análisis de varianza y las pruebas de comparación de medias de Tukey con $\alpha=0.05$ %.

RESULTADOS Y DISCUSION

El análisis químico de los sustratos utilizados se muestra en el Cuadro 1.

De acuerdo con Cottenie (1980) y Etchevers (1989) los sustratos presentan las siguientes características: Cachaza, sustrato con un pH fuertemente ácido, con efectos de salinidad casi nulos (CE), una alta CIC, muy rico en materia orgánica, una alta relación C/N; en nutrientes, muy rico en N, alto en P, extremadamente pobre en K y Ca y pobre en Mg. Peat-moss, sustrato con un pH fuertemente ácido, con efectos de salinidad casi nulos (CE), una muy alta CIC, muy rico en materia orgánica, muy baja relación C/N; en nutrientes, muy rico en N, alto en P, pobre en K, extremadamente pobre en Ca y medianamente pobre en Mg. Tezontle, sustrato con un pH moderadamente alcalino, con efectos de salinidad casi nulos (CE), una alta CIC, muy pobre en materia orgánica, nula relación C/N; en nutrientes, extremadamente pobre en N, bajo en P, extremadamente pobre en K, Ca y Mg.

Con relación a las variables medidas, la mayor longitud de raíces se observó en ME con Ra (1.44 cm) y el menor resultado se obtuvo en TE con Ro (0.39). Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que el Ra y Ro fueron mejores en ME con 1.44 y 1.1 cm, respectivamente, y el AS en la CA/TE (1.37 cm), mientras que en los sustratos sin regulador fue mayor para CA/PM (1.39 cm) y por último el TE (0.44 cm). En la exploración de raíz, el primer lugar fue para CA/PM sin hormona (6.2 cm) y el valor más bajo fue para el TE sin hormona (1.56 cm). Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que el Ra fue mejor en CA/PM (6.15 cm), el Ro fue mejor en la

Cuadro 1. Análisis químico de cachaza, peat-moss y tezontle.

Sustrato	pH	CE	CIC	MO	Relación C/N	N	P	K	Ca	Mg
		mmho cm ⁻¹	meq/100 g	%						
Cachaza	4.5	0.32	36.18	83.1	34.3:1	16400	4678	15.02	33.6	17.76
Peat-moss	3.9	0.26	60.40	50.9	6.0:1	43800	1196	46.40	56.4	22.08
Tezontle	8.1	0.29	30.00	0	0	300	3.93	14.90	11.6	0.24

CE = Conductividad eléctrica. CIC = Capacidad de intercambio catiónico. MO = Materia orgánica. Relación C/N = Relación carbono/nitrógeno. N = Nitrógeno. P = Fósforo. K = Potasio. Ca = Calcio. Mg = Magnesio.

ME (5.52 cm), el AS en CA/TE (5.55 cm), mientras que en los sustratos sin regulador fue mayor para CA/PM (6.2 cm) y por último el TE (1.56 cm). El mayor número de raíces se presentó en la mezcla CA/PM con Ra (32.5) y el menor resultado en el TE sin regulador (5.5). Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que el Ra fue mejor en CA/PM y ME (23), el Ro fue mejor en la ME (20.75) y la CA (19.5), el AS en la ME (20), mientras que en los sustratos sin regulador fue mayor para CA/PM (15.75) y por último el TE con 5.5 (Figura 1).

Referente al contenido nutrimental de la planta por tratamiento (Figura 2), el mayor nivel de nitrógeno se encontró en PM con Ra (1.19 %) y el valor más bajo en CA/PM y TE con Ro (0.35 % en ambos casos). Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que en Ra fue mejor la acumulación de N en PM (1.19 %), en Ro para CA y CA/TE con 0.7 %, el AS en CA (0.84 %), mientras que en los sustratos sin regulador fue mayor para CA/TE (0.84 %) y por último la CA/PM con 0.42 %. En el caso del fósforo el primer lugar fue para ME sin hormona (0.5 %) siendo el menor resultado para TE sin hormona con 0.11 %. Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que en Ra fue mejor el abastecimiento de P en CA/TE (0.48 %), en Ro para CA con 0.18 %; el AS en ME (0.46 %), mientras que en los sustratos sin regulador fue mayor para ME (0.5 %) y por último en el TE (0.11 %). Finalmente, en el contenido de potasio el primer lugar fue para CA/PM con AS, CA con Ra y CA/PM sin hormona con 2.9 %, y el valor más bajo para PM con Ra con 1.19 %. Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que en Ra fue mejor en CA (2.9 %), en Ro la ME con 1.54 %; el AS en CA/PM (2.9 %), mientras que en los sustratos sin regulador fue mayor para CA/PM (2.9 %) y por último en el PM (1.25 %). En el peso seco promedio (Figura 2) el valor más alto fue para TE con AS (1.25 g) siendo el menor resultado para CA sin hormona (0.43 g). Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que en Ra y Ro fue mejor CA/PM con 1.14 y 0.82 g, respectivamente; el AS en TE (1.25 g), ME (0.91 g), CA/PM (0.88 g), CA/TE (0.83 g) mientras que en los sustratos sin regulador fue mayor para PM (0.65 g) y por último la CA con 0.43 g.

En la altura de plantas (Figura 3) el primer lugar fue para ME con AS (5.8 cm) siendo el más bajo para

la ME sin hormona (3.77 cm). Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que en Ra y Ro fue mejor CA/PM con 5.03 y 4.9 cm, respectivamente; el AS en ME (5.8 cm), CA/TE (5.25 cm) y CA/PM (5.05 cm), mientras que en los sustratos sin regulador fue mayor para CA/PM (4.6 cm) y por último la ME con 3.77 cm. En el diámetro del tallo (Figura 3) el primer lugar fue para CA/PM con Ra (0.71 cm) y el menor resultado se obtuvo en TE sin hormona (0.46 cm). Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que el Ra y el Ro fueron mejores en CA/TE con 0.67 y 0.65 cm, respectivamente; el AS en CA/PM (0.65 cm), mientras que en los sustratos sin regulador fue mayor para PM (0.64 cm) y por último el TE (0.46 cm). Finalmente, en el número de hojas (Figura 3) el primer lugar fue para ME con AS (19.25) y el menor resultado para el TE con AS (12.25). Al separar las medias obtenidas por sustrato y regulador, se encontró que el Ra, Ro y sin hormona tuvieron un comportamiento similar, a diferencia del AS que fue superior en ME.

Una vez discutidos los resultados por sustratos y reguladores, cabe mencionar que los resultados altamente significativos se encontraron en el número de raíces para la cachaza-peat moss con Radix® (32.5); en longitud de raíces promedio en la mezcla cachaza-peat moss-tezontle con Radix® (1.44 cm); el área de exploración de raíz en cachaza-peat moss sin hormona (6.2 cm); en altura de planta fue para esta misma mezcla con AS (5.8 cm); el mayor peso seco promedio se encontró en tezontle con ácido salicílico (1.25 g); en el porcentaje de nitrógeno fue mejor en peat-moss con Radix® (1.19 %); para el porcentaje de fósforo en cachaza-peat moss-tezontle sin regulador (0.5 %), finalmente, en porcentaje de potasio fue similar en cachaza con Radix®, cachaza-peat moss con ácido salicílico y en cachaza-peat moss sin regulador (2.9 %).

Como se puede observar, el mejor sustrato debido a las características que confiere es la mezcla cachaza-peat moss como se observa en los resultados obtenidos para el número de raíces, exploración de raíz, diámetro del tallo y absorción de potasio; seguido por la mezcla de cachaza-peat moss-tezontle que tiene la mayor longitud de raíces promedio, altura de plantas y absorción de fósforo. El tezontle presenta el mayor peso seco promedio probablemente a las pocas raíces lo que implica un menor desgaste de

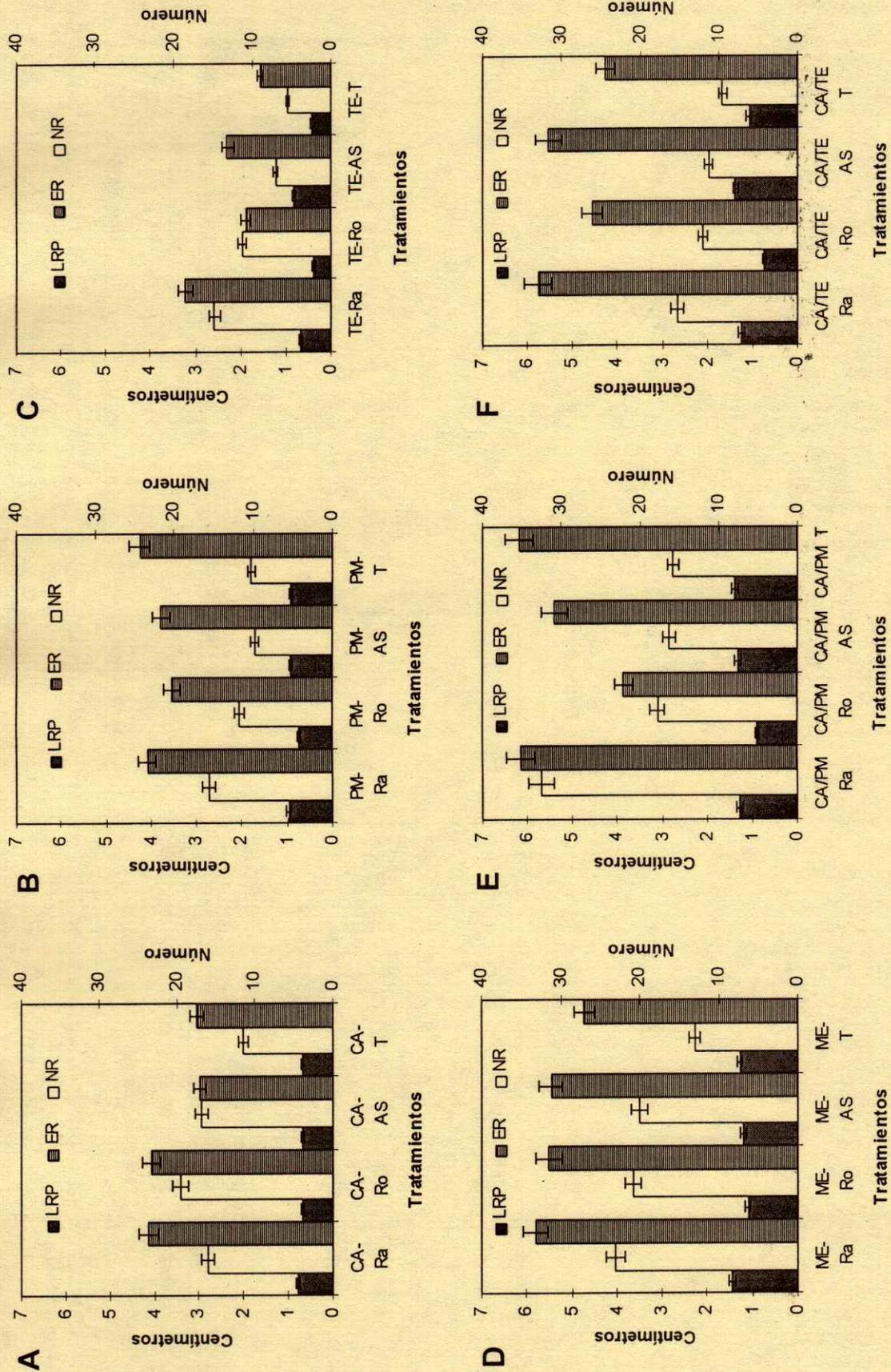


Figura 1. Respuestas en longitud de raíces promedio (LRP), expansión de raíz (ER) y número de raíces (NR) por sustratos y reguladores del crecimiento. A = Cachaza (CA); B = peat-moss (PM); C = tezontle (TE); D = mezcla cachaza:peat-moss:tezontle 1:1:1 P/P (ME); E = cachaza:peat-moss 1:1 P/P (CA/PM); F = cachaza:tezontle 1:1 P/P (CA/TE). Radix 1500® (Ra); Rootone F® (Ro); Acido salicílico (AS); testigo (T). Las barras verticales indican la diferencia mínima significativa con $p \leq 0.05$ (Tukey).

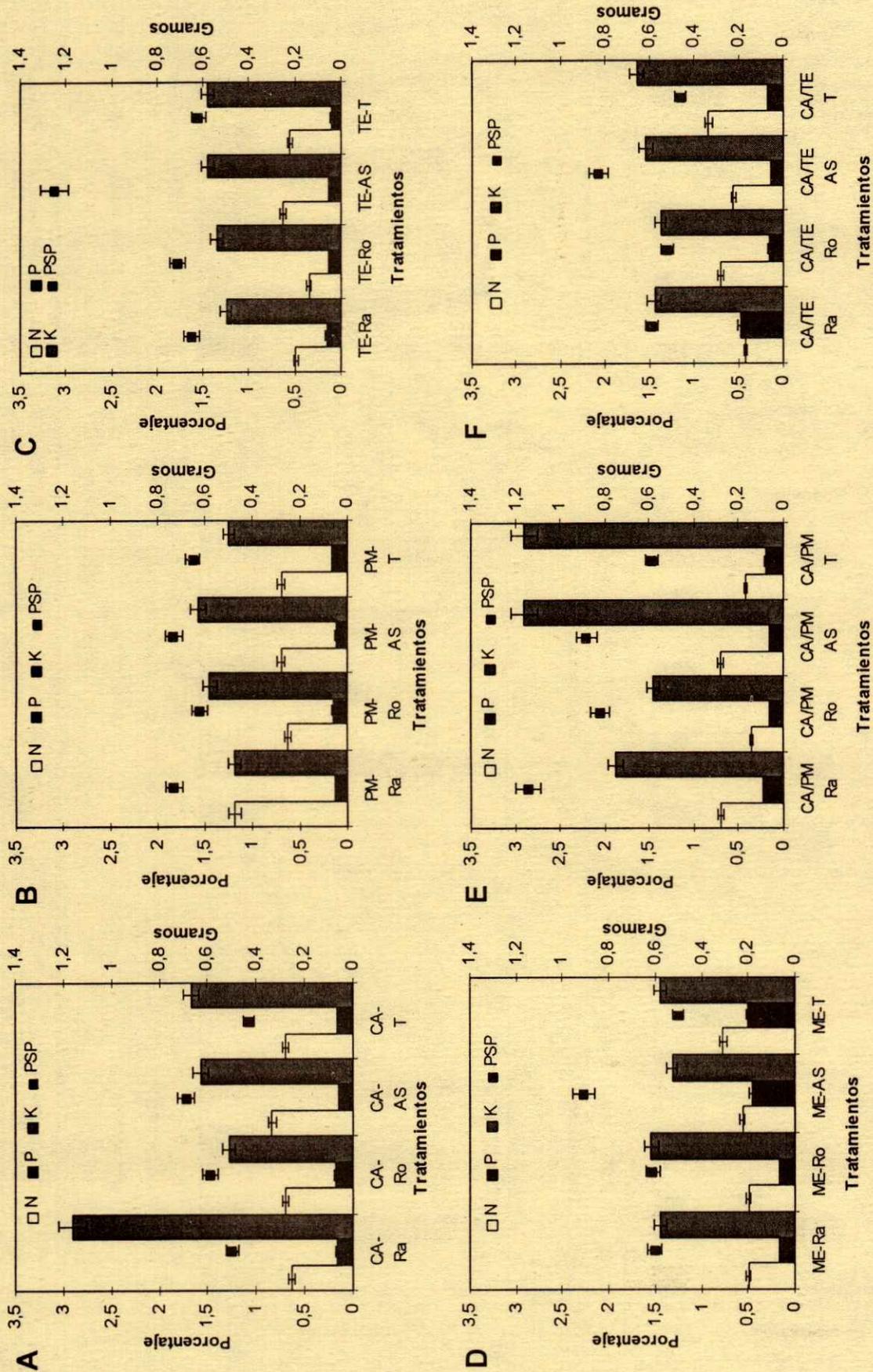


Figura 2. Contenido nutrimental en porcentaje de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así como el peso seco promedio de las plantas (PSP) por sustratos y reguladores del crecimiento.
 A = Cachaza (CA); B = peat-moss (PM); C = tezontle (TE); D = mezcla cachaza:peat-moss:tezontle 1:1:1 P/P (ME); E = cachaza:peat-moss 1:1 P/P (CA/PM); F = cachaza:tezontle 1:1 P/P (CA/TE). Radix 1500® (Ra); Rootone F® (Ro); Acido salicílico (AS); testigo (T).
 Las barras verticales indican la diferencia mínima significativa con $p \leq 0.05$ (Tukey).

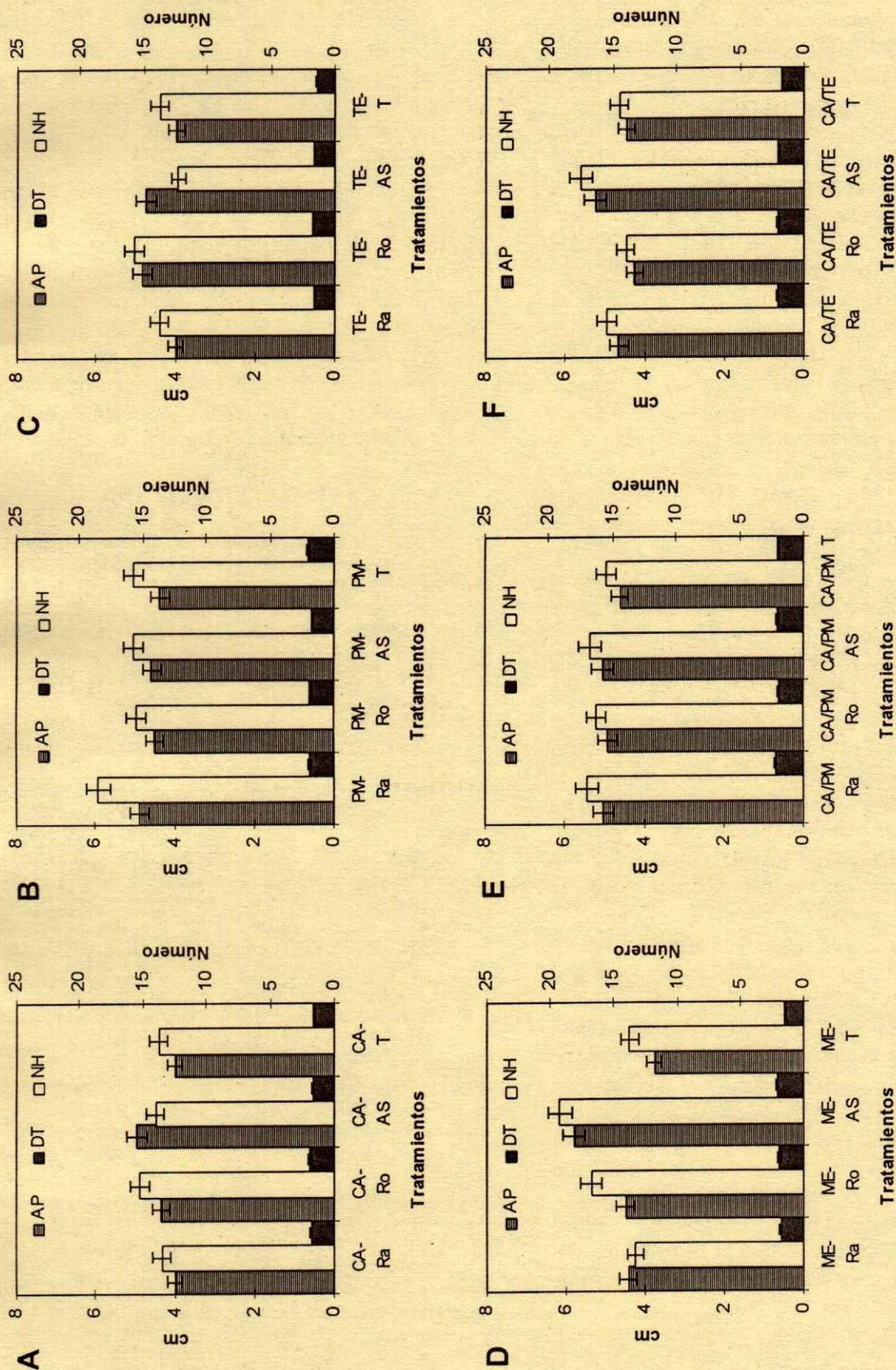


Figura 3. Respuestas en altura de planta (AP), diámetro del tallo (DT) y número de hojas (NH) por sustratos y reguladores del crecimiento. A = Cachaza (CA); B = peat-moss (PM); C = tezontle (TE); D = mezcla cachaza:peat-moss:tezontle 1:1:1 P/P (ME); E = cachaza:peat-moss 1:1 P/P (CA/PM); F = cachaza:tezontle 1:1 P/P (CA/TE). Radix 1500® (Ra); Rootone F® (Ro); Acido salicílico (AS); testigo (T). Las barras verticales indican la diferencia mínima significativa con $p \leq 0.05$ (Tukey).

energía y a la actividad del ácido salicílico; sin embargo, éste limita el número y exploración de raíces, diámetro del tallo y absorción de nitrógeno y fósforo, lo cual puede explicarse posiblemente a su baja concentración nutrimental presente que limita su crecimiento, al tamaño de partícula utilizado y por la poca retención de agua por lo que sufren sequía (Aendekerk, 1993; Martínez, 1994), además de presentar una mayor resistencia a la penetración que limita el desarrollo de las raíces (Ishikawa y Evans, 1995).

En el caso de los reguladores, el que mostró los mejores resultados fue el Radix® ya que favorece el número y longitud de raíces, diámetro del tallo, la absorción de nitrógeno y potasio; seguido por el ácido salicílico el cual propicia una buena altura de planta y absorción de potasio, coincidiendo con lo encontrado por Raskin (1992) en frijol y mijo, además que favoreció el peso seco promedio, esto probablemente junto con las auxinas endógenas que aumentan la capacidad de utilizar carbohidratos en la región de formación de raíz y que los fenoles existan formando conjugados de azúcar (Roy *et al.*, 1975). Mientras que el Rootone F® también favorece el enraizamiento, aunque limita la longitud de raíces y absorción de nitrógeno; en cafeto Rojas y Ramírez (1987) señalan que aumenta el número de estacas enraizadas y longitud de raíces, pero no su número de raíces; sin embargo, aquí se encontraron un buen número de raíces, esto probablemente a las diferencias entre especies y al ser una planta herbácea.

Finalmente, la mejor respuesta sustrato tipo de regulador se encontró en la mezcla cachaza-peat moss con el Radix® ya que favorece el número, exploración y longitud de raíces, diámetro del tallo y la absorción de nitrógeno y potasio. Es probable que esta unión favorezca algunos parámetros físico-químicos, tales como un pH ligeramente ácido, alta CIC, porosidad adecuada, capacidad de rehumedecimiento y contiene cierta consistencia al cepellon (Iglesias y Alarcón, 1994), además de la buena riqueza nutrimental, donde la abundante formación de raíces puede ser reflejo de la disponibilidad de Ca de las mezclas donde las raíces son sensibles a este elemento (Goncalves y Minami, 1994; William, 1988) y también de la poca resistencia a la penetración que acelera la elongación de las raíces (Ishikawa y Evans, 1995).

CONCLUSIONES

El mejor sustrato y enraizador fue la cachaza+peat-moss con Radix 1500 ya que favorece el número de raíces, área de exploración de la raíz, longitud de raíces, diámetro del tallo y la absorción de nitrógeno y potasio.

La elección de los sustratos depende de varios factores que afectan a las características relativas al crecimiento de la plántula como pH, CIC, porosidad, sanidad y a factores operativos como costo, disponibilidad, uniformidad, facilidad de manejo, entre otros.

La técnica de cultivo, el modo de aplicación y las concentraciones de las hormonas pueden modificar los niveles endógenos significativamente, donde el ácido salicílico puede favorecer el enraizamiento.

LITERATURA CITADA

- Aendekerk, G.L. 1993. Standards of physical properties for substrates for cuttings. *Acta Horticulturae* 342: 273-278.
- Ball Seed. 1992. Plant catalog 1992-1993. Geo. J. Ball. Inc. pp 12-13 y 52-53.
- Baez Sañudo, R. 1985. Contenido de carbohidratos durante el enraizamiento y sobrevivencia de estacas de durazno (*Prunus persica* L. Batsch) selección F8215. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Cottenie, A. 1980. Los análisis de suelo y plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. *In: Boletín de suelos. FAR* 38(2). Roma Italia.
- Etchevers, D.J. 1989. Interpretación de los análisis químicos de suelo. Edafología, Colegio de Postgraduados. México.
- Goncalves, A.L. y K. Minami. 1994. Efeito de sustrato artificial no enraizamiento de estacas de calanchoe (*Kalanchoe blossfeldiana* cv. Singapur, *Crassulaceae*). *Sci. Agric.* 51: 24-244.
- Hartmann, H.T. y D.E. Kester. 1992. Propagación de plantas. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., México. pp 137-215.
- Iglesias Gutiérrez, L. y M. Alarcón Bustamante. 1994. Preparación de sustratos artificiales para la producción de plántula en vivero. pp 4-31.
- ICIDCA (Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar). 1990. Manual de los derivados de la caña de azúcar, ICIDCA-GEPLACEA-PNUD. México.
- Ishikawa H. y M.L. Evans. 1995. Specialized zones of development in roots. *Plant physiol.* 109: 725-727.
- López, R. 1986. La cachaza como materia prima. pp. 177-184. *In: La industria de los derivados de la caña de azúcar.* Edit. Científico Técnica, Cuba. Cap. VII
- Martínez M., F. 1994. Manual básico de sustratos. Oasis Consultoria. Jiutepec, Mor.
- Raskin, I. 1992. Role of salicylic acid in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant. Mol. Biol.* 43: 439-463.

- Rojas, G.M. y H. Ramirez 1987. Control hormonal del desarrollo de las plantas. Ed. Limusa, México.
- Roy, C., S. Basu, R.N. Basu y C. Bhattacharya. 1975. Carbohydrate metabolism in relation to the rooting of bean cutting. *Plant Physiol.* 76: 851-853.

William Gehrke, P. 1988. The effects of supraoptimal temperatures on the growth and flowering of *Kalanchoe blossfeldiana* (Poeelln.) Thesis of the University of Florida to obtain de degree of Master of Science. Florida, USA.

APLICACION DE ACIDO SALICILICO PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO AGRONOMICO EN TRES VARIEDADES DE TRIGO

Use of Salicylic Acid Sprays on Wheat to Increase Yield in Three Wheat Varieties

Rodrigo López Tejeda¹, Víctor Camacho Rodríguez y Marco Antonio Gutiérrez Coronado

RESUMEN

El trigo es uno de los cultivos mayormente estudiados a nivel mundial, hoy en día, se tiene la información completa para lograr altos rendimientos en el campo; sin embargo, cualquier estudio fisiológico colateral para incrementar la producción por la planta es viable. La finalidad del trabajo consistió en evaluar el efecto del ácido salicílico sobre el rendimiento, componentes del rendimiento y peso seco de la planta en las variedades Altar C84, Oasis F86 y Opata M85 de trigo. Los experimentos se realizaron en condiciones de campo en el Valle del Yaqui durante los ciclos otoño-invierno 1986-1987 y 1988-1989; se utilizaron dosis diferentes de ácido salicílico en concentraciones molares de 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-8} y un testigo. La aplicación se realizó al inicio de fecundación y cinco días después, bajo un diseño experimental de bloques al azar para el primer ciclo y parcelas divididas para el segundo. Se evaluaron los componentes del rendimiento y el rendimiento mismo. Para la variedad Altar C84 la dosis de 10^{-5} M arrojó los mejores resultados con incrementos de 900 kg ha^{-1} en relación al testigo y en Oasis F86 y Opata M85 la dosis de 10^{-4} M fue la mejor con aumentos de 500 kg ha^{-1} de diferencia.

Palabras claves: *Triticum spp.*, molar, soluciones, dosis.

SUMMARY

Wheat is one of the most studied crops in the world these days. The complete information to obtain high yields in the field is available; nevertheless, any physiological colateral research of the plant to increase the production per plant is feasible. The purpose of research was to evaluate the effect of salicylic acid to increase the yield, yield components

and dry plant weight in the Altar C84, Oasis F86, and Opata M85 varieties of wheat. The experiments were carried out under field conditions in the Yaqui Valley during the autumn and winter seasons of 1986-1987 and 1988-1989. Different doses of salicylic acid were used in molar concentrations of 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-8} and a control concentration. The application took place at the beginning of the pollination and five days afterwards. An experimental design with random sample blocks was used for the first cycle, and divided fields for the second. The components of the output were evaluated as was the output itself. For the Altar C84 variety the 10^{-5} M dosage gave the best results with more than 900 kg ha^{-1} in relation to the control variety, for the Oasis F86 and the Opata M85 varieties the dosage of 10^{-4} M was the best with a difference of more than $500 \text{ kg per hectare}$.

Index words: *Triticum spp.*, solutions, rate, molar.

INTRODUCCION

El trigo es hoy uno de los cultivos más importantes con respecto a la nutrición humana ocupando primeros lugares entre otros cereales de trascendencia. En nuestro país este cereal ocupa un lugar preponderante después del maíz en cuanto a volumen de producción con 2.7 millones de toneladas, y el tercero después del maíz y frijol en cuanto a superficie sembrada con 738 000 hectáreas (SARH, 1989). Sin embargo, en los últimos años el incremento en la producción ha sido muy discreto por lo que en la actualidad se están llevando a cabo numerosas investigaciones para tratar de aumentar la producción de este cereal. Si tan solo se pudiese incrementar en un grano, el número de granos por espiga, de cada espiga producida en el Valle del Yaqui, Sonora, se cosecharía alrededor de 20 000 toneladas más de trigo cada año (Wall, 1979). El proyecto llevó como objetivo general, la aplicación de ácido salicílico en diferentes concentraciones, para incrementar el número de granos por espiga vía mantenimiento de turgencia en plantas de trigo.

¹ Instituto Tecnológico de Sonora, Calle 5 de Febrero 818-sur, 85000 Cd. Obregón, Sonora, México.

Aceptado: Marzo de 1998.

REVISION DE LITERATURA

El trigo es uno de los cultivos más antiguos sembrados por el hombre, cultivado en forma más vasta y es producido en mayor cantidad en lo que se refiere a los cereales básicos. Ocupa uno de los primeros lugares en producción y superficie a nivel mundial con 202 854 700 hectáreas que producen 275 000 000 de toneladas (Robles, 1982).

Los países que producen trigo son: Comunidad de Estados Independientes (ex Unión Soviética), China, Estados Unidos, Canadá, Francia, Italia, Australia y Argentina; los países que exportan son Estados Unidos, Canadá, Australia, Comunidad de Estados Independientes y Argentina.

En México, a pesar de no ser uno de los principales productores, durante las últimas tres décadas, el consumo de trigo ha aumentado hasta tal punto que constituye un tercio de la cantidad consumida de maíz (Robles, 1982).

Actualmente la producción y demanda de trigo en México está equilibrada; sin embargo, debido al crecimiento de la población, se estima que durante los próximos cinco años las producciones deben incrementarse en dos millones de toneladas anuales (Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste, CIANO, 1984). El noroeste de México contribuye con aproximadamente 70 % de la producción nacional de trigo. De los cultivos de invierno que se siembran en el Estado de Sonora, el trigo ocupa el primer lugar por superficie. Durante el ciclo 1988-1989 se cosecharon en el estado 294 947 hectáreas con una producción de 1 396 902 toneladas y un rendimiento promedio de 4.7 t ha⁻¹. En el Valle del Yaqui y Mayo se cosecharon 227 406 ha, con un rendimiento promedio de 4.8 t ha⁻¹ (CIANO, 1984).

El término salicilato se ha utilizado para la descripción de un grupo de compuestos químicos que presentan el radical 2-hidroxibenzoico. Dentro de estos compuestos se encuentran el salicilato de sodio, el ester y metilo del ácido salicílico, así como el ácido acetilsalicílico, los cuales son de gran utilidad química (Smith y Smith, 1966).

El ácido salicílico, el cual fue utilizado en este trabajo, se obtiene por medio del tratamiento de la sal de un fenol con dióxido de carbono, que produce el reemplazamiento de un hidrógeno anular por el grupo carboxilo, conociéndose esta reacción con el nombre de Kolbe, mediante la cual se obtiene el ácido ortobenzoico o ácido salicílico (López, 1984).

Entre los efectos que causa el ácido salicílico en el desarrollo de los vegetales se tiene: inhibición de la germinación o del crecimiento de raíz y coleoptilo, inducción de la floración e inhibición de la misma (Saxena y Rashid, 1980), provoca cierre de estomas y reducción de la transpiración (Larque-Saavedra, 1975), mantiene turgente los estomas y pulvinolos (Saeedi *et al.*, 1984), altera la permeabilidad de los tilacoides (Bell, 1981).

Para tratar de determinar el efecto de las aspersiones de ácido acetilsalicílico (ASA), sobre la producción de grano de trigo (*Triticum aestivum*) Cv. Lerma Rojo, se realizaron experimentos en invernadero y en el campo para poder determinar curvas de dosis-respuesta y fecha de aplicación, probando concentraciones de 10⁻⁷M a 10⁻²M de ASA y como épocas de aplicación se tuvieron: al inicio de la floración, 5, 10 y 15 días después de iniciada. En cuanto a la época más apropiada para aplicar el compuesto fue al inicio de floración y durante los primeros días después de iniciado la misma. Marcando que existe la posibilidad de un efecto inhibitorio sobre la producción al aplicarse en épocas posteriores a la floración, determinando que las concentraciones de 10⁻²M y 10⁻⁷M de ASA promueven la producción de grano (García, 1982).

MATERIALES Y METODOS

Localización y Desarrollo del Experimento

Los trabajos se realizaron durante dos ciclos agrícolas otoño-invierno 1986-1987 y 1988-1989 en los bloques 910 y 406 del Valle del Yaqui, Sonora, respectivamente. Para el primer ciclo, la siembra se realizó el día 12 de diciembre de 1986 y se utilizó la variedad Altar C84. Para el segundo ciclo la siembra se realizó el 7 de diciembre de 1988 para la variedad Opata M85 y el 8 de diciembre para la variedad Oasis F86. El manejo agronómico que se le dio al cultivo fue acorde a lo recomendado por el Centro de Investigaciones Agrícola del Noroeste (CIANO). El primer año se manejó bajo un diseño experimental de bloques al azar, y para el segundo fue un bifactorial en parcelas divididas con distribución en bloques al azar, donde la parcela grande estaba destinada para las variedades y la parcela chica para las diferentes dosis de ácido salicílico. Para delimitar el área del experimento se utilizaron estacas de 1.5 m de alto con el fin de que no fueran cubiertas por el cultivo; para el

primer año se tuvieron 16 parcelas de prueba donde cada una medía 25 m² y para el segundo año se dividió en 32 parcelas experimentales, donde cada una medía 20 m², en todos los casos con cuatro repeticiones.

Tratamientos

Los tratamientos utilizados de ácido salicílico para el primer año fueron: testigo, 10⁻⁴, 10⁻⁵ y 10⁻⁶ molar, en las que se dieron dos aplicaciones: la primera, al inicio de la fecundación el día 20 de febrero de 1987 y la segunda cinco días después. Para el segundo año fueron: testigo, 10⁻⁴, 10⁻⁶ y 10⁻⁸ molar: las épocas de aplicación fueron en diferentes fechas ya que la variedad Oasis F86 es precoz y Opatá M86 es tardía. La primera aplicación de AS para Oasis F85 se realizó el 7 de marzo de 1989 y la segunda, cinco días después. El día 15 de marzo, se aplicó AS para Opatá M85 y cinco días después se hizo la segunda aplicación.

La cosecha se efectuó para ambos experimentos manualmente con hoz, realizándose la trilla en el CIANO con máquina eléctrica estacionaria marca John Deere, previa toma de muestras por plantas y su posterior análisis.

Preparación de Soluciones

Para preparar las diferentes concentraciones de ácido salicílico, se partió de su peso molecular, el cual es de 138.12 g mol⁻¹. Se preparó una solución madre 10⁻²M y por reglas de tres se obtuvieron el resto de las concentraciones. El producto se pesó en una balanza analítica y posteriormente se disolvió en agua destilada. A cada una de las concentraciones se les aplicó 5 mL de glicerina L⁻¹ [C₃H₅(OH)₃] la cual sirve como surfactante. Separadamente se prepararon soluciones de KOH al 10 % en 100 mL de agua para ajustar el pH de la solución y llevarlo a 5.5, la solución se aplicó gota a gota.

Variables Evaluadas

Número de granos por espiga, tamaño de la espiga, peso hectolítrico, peso de granos por espiga, peso por parcela de 1 m².

RESULTADOS Y DISCUSION

La presentación de los resultados por ciclo, para el primer año se condensan en el Cuadro 1, los análisis de varianza mostraron diferencias altamente significativas en la mayoría de las variables evaluadas. En la variable número de granos por espiga, los tratamientos 10⁻⁶ y 10⁻⁴ M tuvieron un incremento de 2.19 y 7.33 por ciento, respectivamente, lo que refleja uno y cuatro granos por espiga en relación al testigo, situación altamente favorable, ya que como comenta Wall (1979), que si tan sólo se pudiera incrementar en un grano, el número de granos por espiga, de cada espiga producida en el Valle del Yaqui, Sonora, cosecharíamos alrededor de 20 000 toneladas de trigo cada año.

Esta variable influye directamente en el rendimiento agronómico y es importante determinarla en todos los trabajos, ya que es decisiva su influencia dentro de los componentes morfológicos del rendimiento (Evans, 1983; Waddington *et al.*, 1986; Day and Suhbawatr, 1987).

En cuanto a rendimiento agronómico (kg ha⁻¹) la concentración de 10⁻⁶ M promedió 6 991.25 kg ha⁻¹, comportándose diferente estadísticamente en comparación con el testigo y con el resto de los tratamientos.

Se obtuvieron incrementos de 15.22 % con el mismo tratamiento lo que resulta que a medida que la concentración fue disminuyendo, el rendimiento fue aumentando; este efecto, puede atribuirse a que el ácido salicílico según García, (1982) y Larqué-Saavedra (1979), resulta tóxico para los vegetales al suministrarse a una concentración de 10⁻² M.

Al evaluar número de espigas por metro cuadrado, se observaron incrementos leves en la dosis 10⁻⁶ M, aunque esta variable no depende de la influencia de las aplicaciones, ya que el salicílico se adiciona precisamente después de la etapa de espigamiento.

En cuanto al peso hectolítrico, el testigo fue el mejor, ya que las concentraciones 10⁻⁶, 10⁻⁵ y 10⁻⁴ M disminuyeron en 1.628, 8.198 y 2.219 %. Aun cuando existen diferencias estadísticas altamente significativas, esta variable por sí sola no explica ni resalta la determinación del rendimiento agronómico, sin embargo, si se asocian con el número de espigas por unidad de superficie, número de granos por espiga y peso del grano indican directamente la influencia en el rendimiento agronómico, y estas últimas tres variables, reportan una respuesta favorable a la aplicación de los salicilatos.

Cuadro 1. Aplicación de ácido salicílico en diferentes concentraciones en trigo Cv. Altar C84. Promedio de 20 muestras. Ciclo otoño-invierno 1986-1987.

Variables	Testigo	10^{-4} M	10^{-5} M	10^{-6} M
Peso total (kg/2m ²)	1.213 b†	1.093 d	1.128 d	1.398 a
Rend. Agronómico (kg ha ⁻¹)	6067.50 b	5467.50 a	5641.25 a	6991.25 c
No. de espigas (por m ²)	427.12 a	422.87 a	418 a	427.25 a
Peso hectolítrico (kg L)	81.125 c	79.325 b	74.475 a	79.80 b
Tamaño de espiga (cm)	35.71 c	34.55 a	34.68 ab	35.25 bc
No. de granos (por espiga)	62.025 ab	66.575 a	61.062 b	63.387 ab
Peso en gramos (g/espiga)	22.782 b	22.245 b	17.435 a	23.040 b

† Promedio con la misma letra entre columnas son estadísticamente iguales. Duncan (0.05).

Los valores encontrados de 79.3 y 79.8 de peso hectolítrico, para los tratamientos de 10^{-4} y 10^{-6} M, son normales y adecuados según lo reportan Evans (1983) y Hernández (1987).

Los resultados, obtenidos al analizar el tamaño de la espiga como se muestran en el Cuadro 1, reportan mínimas diferencias entre los tratamientos aplicados; trabajos realizados por otros investigadores (Fisher, 1973; Evans, 1983), no reportan diferencias significativas partiendo de la base de que este órgano está regido fundamentalmente por herencia y el alterarlo vía antitranspirante es poco factible.

Para el peso en gramos por espiga, los diferenciales entre tratamientos no mostraron efecto positivo con excepción de la dosis de 10^{-5} M que disminuyó considerablemente con 23.78 %.

Para el caso del segundo año de prueba con las variedades Oasis F86 y Opata M85 en los Cuadros 2 y 3, respectivamente, se suman los valores obtenidos, donde el número de granos por espiga el mejor tratamiento en la variedad Oasis F86 fue para 10^{-4} M con incrementos de seis granos por espiga, mientras que con 10^{-6} y 10^{-8} M se obtuvieron 5.8 y 4 granos más, respectivamente, por espiga en comparación con el testigo. Para Opata M85, el comportamiento fue similar para esta variable, donde la dosis de 10^{-4} M reportó 4.37 granos más; por otra parte en las dosis 10^{-6} M y 10^{-8} M se obtuvieron 3.18 y 3.47 granos de aumento en relación al testigo. García (1982) explica que aplicaciones de ácido salicílico en

trigo en floración en concentraciones de 10^{-2} M a 10^{-7} M promueven la producción de grano.

Hasta el momento no existe explicación sobre el mecanismo de acción del ácido salicílico sobre el número de granos y peso; pero se piensa que este ácido actúa sinérgicamente con las auxinas, ya que estas regulan la acumulación de fotosinatos (Larqué-Saavedra, 1978).

En la variable tamaño de espiga para la variedad Oasis F86 no hubo ninguna diferencia para las concentraciones 10^{-4} M y 10^{-8} M en relación con el testigo; sin embargo, para la dosis 10^{-6} M se observó 0.26 cm de diferencia. Por otro lado, en la variedad Opata M58, los tratamientos 10^{-4} M, 10^{-6} M y 10^{-8} M presentaron un aumento de 0.58 cm, 0.19cm, y 0.52 cm, respectivamente. Esta variable no fue estadísticamente significativa.

Para el peso hectolítrico en la variedad Oasis F86 no se obtuvieron cambios significativos como se observa en el Cuadro 2, donde sólo el tratamiento 10^{-4} M estuvo arriba del testigo con 0.21 por ciento; para la variedad Opata M58 (Cuadro 3) se observan mínimos aumentos con los tratamientos 10^{-4} M y 10^{-6} M con 0.77 y 0.7 %, respectivamente sólo en la dosis 10^{-8} M se observó un decremento de 1.73 % en relación con el testigo.

Con respecto a la variable peso de granos por espiga en la variedad Oasis F86 el resultado para el tratamiento 10^{-4} M fue superior en 47 % y para las concentraciones 10^{-6} M y 10^{-8} M en 45 y 35 %,

Cuadro 2. Aplicación de ácido salicílico en diferentes concentraciones en trigo Cv. Oasis F86. Promedio de diez muestras. Ciclo otoño-invierno 1988-1989.

Variables	Testigo	10^{-4} M	10^{-6} M	10^{-8} M
No. de granos (por espiga)	31.5 b†	37.45 a	37.34 a	36.11 a
Tamaño de espiga (cm)	8.99 a	8.99 a	9.25 a	8.95 a
Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	73.81 ab	73.97 a	73.42 a	73.57 bc
Peso en gramos (g/espiga)	0.99 c	1.46 a	1.44 a	1.34 b
Peso en parcelas (1m ²)	712.5 d	745.5 a	728 c	734.5 b

† Valores con la misma letra entre columnas son estadísticamente iguales. Tukey (0.05).

Cuadro 3. Aplicación de ácido salicílico en diferentes concentraciones en trigo Cv. Opata M85. Promedio de diez muestras. Ciclo otoño-invierno 1988-1989.

Variables	Testigo	10 ⁻⁴ M	10 ⁻⁶ M	10 ⁻⁸ M
No. de granos (por espiga)	36.83 b†	41.20 a	40.01 a	40.30 a
Tamaño de espiga (cm)	8.44 a	9.02 a	8.63 a	8.96 a
Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	74.85 ab	75.43 a	75.38 a	73.57 c
Peso en gramos (g/espiga)	1.04 c	1.38 a	1.31 ab	1.34 ab
Peso por parcela (1m ²)	573.0 a	670.5 a	655.5 b	620.5 c

† Valores con la misma letra entre columnas son estadísticamente iguales. Tukey (0.05).

respectivamente, con respecto al testigo. La variedad Opata M85 tuvo incremento de 32, 26 y 28.8 % con la aplicación de 10⁻⁴ M, 10⁻⁶ M y 10⁻⁸ M en relación con el testigo. Mounlap y Michael (1973) mencionan que una deficiencia de auxinas durante el desarrollo podría alterar la capacidad de llenado; entonces se puede establecer la relación que existe entre el ácido salicílico y los niveles promotores endógenos de crecimiento (auxinas, citocininas y giberelinas); para aumentar el rendimiento.

En la variable peso por parcela, el mejor comportamiento se obtuvo en el tratamiento 10⁻⁴ M para la variedad Oasis F86, con un rendimiento de 330 kg ha⁻¹ más que el testigo, esto representa 4.6 % de incremento; por otra parte, los tratamientos 10⁻⁶ M y 10⁻⁸ M aumentaron en 155 kg ha⁻¹ y 220 kg ha⁻¹ en relación con el testigo como se aprecia en el Cuadro 2; situación similar sucedió con la variedad Opata M85 donde la dosis 10⁻⁴ M tuvo un aumento de 17 % con una producción de 975 kg ha⁻¹, en comparación con el testigo, sin embargo, para los tratamientos 10⁻⁶ M y 10⁻⁸ M los rendimientos fueron de 825 kg ha⁻¹ y 475 kg ha⁻¹, aproximadamente 14 y 8.2 %, respectivamente. Estos resultados son similares a los obtenidos por López (1984).

CONCLUSIONES

Para el caso de la variedad Altar C84 en el primer año se concluye:

1. El ácido salicílico aumentó el número de granos por espiga en 4 y 1.3 más con respecto al testigo con los tratamientos 10⁻⁴ y 10⁻⁶ molar.
2. El ácido salicílico incrementó el rendimiento agronómico en 15.22 % con respecto al testigo con el tratamiento de 10⁻⁶ molar.

Para el caso del segundo año se concluye:

1. El rendimiento agronómico se incrementó en 4.6 % en la variedad Oasis F86 para la dosis 10⁻⁴ M en comparación con el testigo; mientras que en la variedad Opata M85 con la misma dosis fue de 17 % más que el testigo.

2. La variable número de granos por espiga se incrementó para la variedad Oasis F86 como para Opata M85, coincidiendo con el tratamiento de 10⁻⁴ M, con seis granos más para Oasis F86 y cuatro granos más para Opata M85 en relación con el testigo.

LITERATURA CITADA

- Bell, A. 1981. The physiological role of secondary natural products in the biochemistry of plants, E.E. Conn (ed.). Academic Press, New York.
- CIANO. Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste. 1984. Guía para producir trigo en el Valle del Yaqui.
- Day, A.D. e I. Suhbawater. 1987. Some effects of soil moisture stress on the growth of wheat. Agr. J. 62: 27.
- Evans, L.T. 1983. Fisiología de los cultivos. Edit. Hemisferio Sur, México, D.F.
- Fisher, R.A. 1973. The effect of water stress at various stages of development on yield processes in wheat. Plant response to climatic factors. UNESCO, Paris.
- García E. 1982. Reguladores del crecimiento II. Efecto de las aspersiones de ácido acetilsalicílico sobre producción de grano en trigo. Tesis Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Hernández, S.A. 1987. Introducción al mejoramiento genético de cereales de grano pequeño. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Tema Didáctico No. 3.
- Larqué-Saavedra, A. 1975. Studies on hormonal aspects of plant growth in relation to chemical and environment treatments Ph.D. Thesis, London.
- Larqué-Saavedra, A. 1978. The role antitranspirant effect of acetyl salicylic acid on *Phaseolus vulgaris*. Physiol. Plant. 43: 126-128.
- Larqué-Saavedra, A. 1979. Stomatal closure in response to acetyl salicylic acid treatment. Physiol. Plant. 93: 371-375.
- López, B. M. C. 1984. Reguladores del crecimiento. V: Estudio de aspersiones de ácido salicílico, saligenina y cinetina en la producción de trigo. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Morrison, T.R. y N.R. Boyd. 1973. Química orgánica. Fondo Educativo Interamericano, S.A., México.
- Mounlap, M.A. y B. Michael. 1973. Gibberelin like substances in developing barley grain and their relation to dry weight increases. Physiol. 29: 774-776.
- Robles, S.R. 1982. Producción de granos y forrajes. Editorial Limusa. Tercera Edición. México, D.F.
- Saeedi, S., J. Gaillochet, J. Bonmort y G. Roblin. 1984. Effect of salicylic and acetyl salicylic acids on the scatonastic and

- photonastic leaflet movement of *Cassia fasciculata*. Plant Physiol. 76: 8520-853.
- Saxena, P.K. y A. Rashid. 1980. Differentiation of budcell on the protonema of the moss *Anoetanthium shomsonii*. Effect of aspirin and salicylic acid. Z. Pflanzenphysiology 99: 187-189.
- SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1989. DGEA. Hermosillo, Son.
- Smith, M.J. y K.P. Smith. 1966. The salicylates. Interscience Wiley. New York.
- Waddington, S.R., J.K. Ramson, M. Osmanzai y D.A. Saunders. 1986. Improvement in the yield potential of bread wheat adapted to Northwest Mexico. Crop Science 26: 698-702.
- Wall, C.P. 1979. Factores que limitan el número de granos por espiga en el trigo. Trabajo presentado en el Centro de Genética, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

EVALUACION DE ACIDOS CARBOXILICOS Y NITRATO DE CALCIO PARA INCREMENTAR CALIDAD, CANTIDAD Y VIDA DE ANAQUEL EN TRES TIPOS DE MELON

Evaluation of Carboxylic Acids and Calcium Nitrate to Increase Quality, Yield, and Shelf Life of Three Types of Muskmelon

Luis F. Román Moreno y Marco Antonio Gutiérrez Coronado¹

RESUMEN

El melón (*Cucumis melo* L.) es una hortaliza que tiene gran demanda a nivel mundial por su sabor y dulzura. Ocupa el cuarto lugar en cuanto a área de siembra después de papa, tomate y chile, pero presenta problemas de calidad causados por su corta vida postcosecha. Consecuentemente se realizó esta investigación sobre la aplicación de ácidos carboxílicos y nitrato de calcio para incrementar la calidad, cantidad y vida de anaquel en tres tipos de melón, Honey Dew, Cantaloupe y Crenshaw. El experimento se condujo en condiciones de campo en el Valle del Yaqui, Sonora, ciclo otoño-invierno 1990-1991, y se utilizó el método de trasplante, que se realizó el 3 de febrero. Se aplicaron productos a base de ácidos carboxílicos y productos a base de calcio, desde la presiembra hasta fruto amarrado. Se utilizó un diseño experimental en bloques al azar donde se evaluó rendimiento y vida de anaquel de los frutos. La aplicación de productos a base de ácidos carboxílicos provocó incrementos en el rendimiento y número de frutos en los tres tipos de melón. Honey Dew, 176.1 % de peso y 100.5 % en número de frutos; en el tipo Cantaloupe, 117.7 % de peso y 72.3 % en número de frutos y en el tipo Crenshaw, 79.9 % de peso y 36.7 % en número de frutos. El incremento de vida de anaquel es altamente significativo por la aplicación de ácidos carboxílicos, alcanzando el más alto el melón Crenshaw con 17 días (88.8 %), seguido por el Cantaloupe con 22 días (83.3 %) y el Honey Dew con 44 días (33.3 %) de incremento en la vida de anaquel.

Palabras claves: *Cucumis melo* L.

¹ Instituto Tecnológico de Sonora, Calle 5 de Febrero 818-sur, Cd. Obregón, Son.

Aceptado: Marzo de 1998.

SUMMARY

Muskmelon (*Cucumis melo* L.) is a vegetable of a large universal demand for its flavor and sweetness. It occupies the fourth place respecting cultivation area after potatoes, tomatoes, and chili. However, this product has a short post-harvest life. For this reason, in this research the application of carboxylic acids and calcium nitrate was tested to increase the quality, quantity, and shelf life of three different kinds of melon: Honey Dew, Cantaloupe, and Crenshaw. The experiment was conducted under field conditions in the Yaqui Valley, Sonora, during the fall-winter 1990-1991 season, using the transplanting method, which was done on February 3rd. Products were applied on basis of their calcium content, from pre-sowing to yellow fruit. The experimental design was a randomized block design. The application of carboxylic acids stimulated the weight and number of fruits in the three different kinds of muskmelon. Honey Dew, 176.1 % weight and 100.5 % number of fruits. Cantaloupe, 117.7 % weight and 72.3 % number of fruits. Crenshaw 79.9 % weight and 36.7 % number of fruits. The increase in shelf life is highly significant for the application of carboxylic acids, getting the highest Crenshaw with 17 days (88.8 %), followed by Cantaloupe with 22 days (83.3 %), and Honey Dew with 44 days (33.3 %) increase in shelf life.

Index words: *Cucumis melo* L.

INTRODUCCION

Entre las hortalizas, las cucurbitáceas ocupan los primeros lugares de producción y exportación. El melón (*Cucumis melo* L.) tiene gran demanda a nivel mundial por su sabor y dulzura que se oferta en México. Se sitúa en el cuarto lugar dentro de los

productos hortícolas para exportación con respecto a el área sembrada (Ibarra, 1991).

El melón tiene problemas de firmeza después de cosechado, lo que trae como consecuencia una menor vida postcosecha. La firmeza de los frutos es el criterio de calidad más significativo en la comercialización internacional. La firmeza en los frutos tiene origen fisiológico-nutricional asociado a la absorción y translocación del calcio en primer lugar y del potasio en segundo lugar. El desorden fisiológico que resulta de la deficiencia localizada de calcio dentro de la planta, es atribuido a una pobre distribución de este elemento más que a una restricción en su absorción. El calcio es transportado por el xilema y el floema, pero el transporte del soluto puede ser particularmente crítico en órganos, que son naturalmente bajos en calcio, tales como los frutos y las hojas jóvenes (Kirkby y Pilbean, 1984).

El calcio se encuentra presente como parte de la estructura orgánica (Rodríguez, 1992). Mantiene la estructura y características propias de permeabilidad de las membranas dando rigidez a la célula y su contenido aumenta con la edad (Stutte, 1995). El calcio se encuentra principalmente en la pared celular formando sales insolubles al reaccionar con los ácidos de la lámina media, la cual está formada de pectatos de calcio y entra en el metabolismo de formación del núcleo y mitocondrias (Street, 1969; Rojas y Rovalo, 1985). Además, forma parte del sistema amortiguador en la savia de la planta y en componentes de los pelos radicales en una acción directa (Uvalle, 1992).

Wiersum (1979) indica que los efectos sobre la absorción de calcio a través de la manipulación del medio radical, parece ser principalmente causado por cambios en competencia o disponibilidad de calcio e iones, tales como potasio, nitrato y algunos otros. Las prácticas culturales que afectan la superficie de la tierra alrededor de la planta pueden tener efectos de dos maneras: la distribución primaria de calcio en la ruta del xilema o una influencia sobre su redistribución. El intercambio, la fijación y algunas veces la movilización se ve afectada por la luz, temperatura y transpiración. Por otro lado, la manipulación directa de la planta, tal como injertación, maduración, aplicación de reguladores de crecimiento, control de enfermedades, etc. puede en algunos casos también estar relacionada con ciertos procesos involucrados en la distribución de calcio en las plantas (Pallaghy, 1970).

El calcio está gradualmente asociado a los procesos de maduración de frutos y vida de almacenamiento postcosecha. Concentraciones altas de calcio en los tejidos del fruto resultan en una tasa lenta de maduración, cantidades más bajas de respiración y producción reducida de etileno (Ferguson, 1979). Por otro lado, Watkins y Ferguson (1981) mencionan que el principal sitio para la acción del calcio en senescencia y maduración puede estar en la estructura y función de las membranas y en la estructura de la pared celular. Aunque altas concentraciones externas de calcio son una ventaja en reducir la tasa de senescencia o madurez.

La importancia de los ácidos carboxílicos está en su relación con el metabolismo del nitrógeno. Estos ácidos contribuyen en la formación de casi todos los tejidos, son componentes esenciales en muchas sustancias vegetales de trascendencia; se encuentran en las vitaminas que actúan como grupos funcionales de las enzimas importantes en la respiración (Kirk, 1962), en la molécula de los ácidos nucleicos y en los alcaloides. Aun más importante el nitrógeno vegetal que forma parte de las moléculas proteínicas, las cuales intervienen en el mecanismo enzimático que hace posible la realización del metabolismo celular. (Kirk, 1962; Salisbury y Ross, 1994).

El calcio tiene cierta influencia sobre los problemas que se presentan por la presencia del etileno, ya que se ha observado que al mantener concentraciones altas de calcio en el tejido del fruto, resulta una tasa lenta de maduración, observándose cantidades más bajas de respiración, producción reducida de etileno y una mejor consistencia de frutos, ya que mantiene la estructura y características propias de permeabilidad de las membranas y da rigidez a las células, por lo que el calcio ha sido gradualmente asociado con la regulación de los procesos de maduración de frutos y vida de almacenaje-postcosecha. (Ferguson, 1979; Shear, 1975).

Singh *et al.* (1993) incrementaron substancialmente las concentraciones de calcio y la vida postcosecha en frutos de mango al realizar dos aplicaciones sucesivas precosecha de nitrato de calcio (1 y 2 %), así como de cloruro de calcio (0.6 y 1.2 %).

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo la aplicación de ácidos carboxílicos y nitrato de calcio para incrementar calidad, cantidad y vida de anaquel en frutos de melón.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo se realizó durante el ciclo otoño-invierno 1990-1991 en tres tipos de melón Cantaloupe, Honey Dew y Crenshaw en el block 2220 del Valle del Yaqui, Sonora. El cultivo se manejó agrónomicamente acorde con sus necesidades según el programa. El diseño experimental fue en bloques al azar, con tres tratamientos (Cuadro 1) y cuatro repeticiones, cada tratamiento se indica con su nombre comercial de los productos usados y constó de 10 camas de 2 m de separación y 20 m de longitud; el tratamiento testigo se manejó sin aplicaciones de calcio (manejo tradicional). Las aplicaciones en banda se realizaron conjuntamente con la fertilización y todas las aplicaciones foliares se efectuaron a las 7:00 de la mañana en cada uno de las etapas especificadas del cultivo, con una aspersora manual previamente calibrada. La parcela útil experimental fue la cama central eliminando 9 m de cada lado y tomando seis plantas al azar. El área total fue de 4980 metros cuadrados.

Las variables a evaluar fueron: a) días al inicio de la floración (cuando 50 % de la población presentaba al menos una flor); b) frutos por planta (cuantificados en cada corte); c) diámetro polar del fruto (tomado de cada una de las puntas del mismo con una cinta métrica flexible); d) diámetro ecuatorial del fruto (medido en la parte central del mismo con una cinta métrica flexible); e) peso de fruto por planta (valorado con balanza granataria); f) grados brix (cuantificado con refractómetro) y g) días de vida de anaquel (determinado visualmente de acuerdo con los días de apariencia normal de mercado; esto debido a la falta de equipo necesario para analizar tasa respiratoria de los frutos y grado de descomposición de los mismos).

Cuadro 1. Tratamientos, dosis, época y aplicación de ácidos carboxílicos y nitrato de calcio.

Producto	Dosis	Forma de aplicar
1. Carboxy-min	5 kg ha ⁻¹	Presiembra en banda
Carboxy-Ca	1 L ha ⁻¹	Foliar: 1a inicio guías
Carboxy-K	1 L ha ⁻¹	2a antes de floración
Packard	2 L ha ⁻¹	Foliar: 1a primeros frutos 2a 10-14 días después de la siembra
2. Granumin	15 kg ha ⁻¹	
Nitrato de calcio	3 L ha ⁻¹	Tres aplicaciones cada 15 días después de inicio de guías
3. Testigo		Manejo tradicional (sin calcio)

RESULTADOS Y DISCUSION

En la variable días a inicio de floración no se obtuvo diferencia estadística en los tratamientos y en los tres tipos de melón esta variable fluctuó entre 52 y 53 días después del trasplante.

En la variable número de frutos por planta la respuesta a los tratamientos en los tres tipos de melón fue altamente significativa (Cuadros 2, 3 y 4). El melón tipo Honey Dew presentó un mayor número de frutos; el tratamiento 1 a base de ácidos carboxílicos fue el más alto con 100 % de aumento, seguido por el tratamiento 2 a base de compuestos de calcio con 36.6 % de incremento en comparación con el testigo. El segundo mejor fue el tipo Cantaloupe, en el cual el tratamiento 1 resultó el mejor con 72.3 % de alza, seguido del tratamiento 2 con 33.3 %, con relación al testigo, y para el tipo Crenshaw, el tratamiento 2 fue el de mejor resultado con aumentos de 147.4 %, seguido del tratamiento 1 con 36.8 % más que el testigo.

En los tres tipos de melón, el tratamiento con ácidos carboxílicos sobresalió de gran manera ya que aumentó el amarre de frutos por planta. Trabajos realizados por Munguía (1989) en melón y Garcés (1989) en sandía, arrojaron resultados significativos en el incremento del número de frutos, así como por Espinoza (1993) y Figueroa (1994), con los mismos tratamientos pero en calabacita y sandía, respectivamente.

Además, se tiene que la adición de calcio tanto vía suelo así como foliar, como macronutriente que es, favorece un mejor desarrollo de las plantas y por ende un mejor amarre de fruta, además que contribuye a un flujo más constante de suministro a la fruta vía floema que lo hace más accesible al sistema (Johannes *et al.*, 1998).

Con lo que respecta a la variable diámetro ecuatorial y polar, no se obtuvo significancia de los tratamientos en los tres tipos de melón (Cuadros 2, 3 y 4). Un aspecto importante a considerar en estas variables es, que están proporcionando la forma de la fruta, de tal manera que si se altera cualquiera de ellas, ésta se altera y, por ende, el producto no entra al mercado (Coombe, 1976), por lo que su valoración debe ser tanto cualitativa como cuantitativa, en el sentido de detectar si las aplicaciones de productos a base de calcio afectan dicho parámetro.

La aplicación de ácidos carboxílicos en etapas de amarre y llenado del fruto, aporta gran cantidad de nutrientes, entre los cuales se encuentra el calcio, el

Cuadro 2. Respuesta de las variables evaluadas a la aplicación de ácidos carboxílicos y nitrato de calcio en diferentes épocas en melón Honey Dew cv. Tam Dew. Ciclo otoño-invierno 1990-1991.

Tratamiento	Número de frutos planta ⁻¹	Diámetro ecuatorial	Diámetro polar	Peso del fruto planta ⁻¹	Vida de anaquel
		----- cm -----		g	días
Acido carboxílico	3.4 a	12.89 a	14.01 a	3572.01 a	44 a
Nitrato de calcio	2.3 b	12.50 a	13.03 a	2116.03 b	37 b
Testigo	1.7 b	11.80 a	12.03 a	1293.02 c	33 c

Nota: Promedio con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales. Tuckey (0.05).

cual ayuda a un crecimiento adecuado del fruto tanto polar como ecuatorialmente. Datos similares encontraron Shear (1975), Escobosa (1986), Espinoza (1993) y Figueroa (1994).

Con lo que respecta a la variable **peso del fruto** por planta, todos los tratamientos superaron al testigo en los tres tipos de melón (Cuadros 2, 3 y 4). El mejor comportamiento obtuvo el tipo Honey Dew; en el cual el tratamiento 1 fue el mejor con 176.1 % de aumento, por el tratamiento 2 con 63.6 % de incremento en comparación con el testigo. El segundo mejor fue el tipo Cantaloupe en el cual el tratamiento 1 fue el mejor con 117.7 % de más peso, seguido del tratamiento 2 con 82.3 % de alza, en relación con el testigo. El tipo Crenshaw fue el de resultados más bajos aunque altamente significativos. El mejor tratamiento fue el tratamiento 1 con 79.9 % de aumento seguido del tratamiento 2 con 48.1 % de más peso de fruto en comparación al testigo.

Esto se debe a que los productos a base de ácidos carboxílicos participan directamente en diversos procesos fisiológicos de la planta como respiración, fotosíntesis y absorción de nutrimentos, por lo que la aplicación de éstos influyen directamente en el rendimiento y calidad de los cultivos y además que aportan nutrimentos como el calcio, el cual provoca el desarrollo óptimo del fruto, tal como se demuestra en trabajos similares realizados por Escobosa (1986) y Troncoso y Báez (1989) en durazno y Rodríguez (1990) en melón. Además de que la absorción de

nutrimentos por la raíz se incrementa fuertemente, al aportar fuentes proveedoras de iones H⁺ que exudan y se intercambian con los cationes de la solución del suelo que se enlazan con los radicales carboxílicos, que a su vez alteran la estructura de las membranas, ocasionando una mayor apertura de la misma y así facilitándose su entrada (Stutte, 1995).

En la variable **Grados Brix** (contenido de sólidos solubles) no se obtuvieron resultados significativos en los tres tipos de melón, ya que esta variable depende de las condiciones en la que se corte la fruta, por tanto, ésta va a ser condicionada del buen criterio del cortador.

Con lo que respecta a la variable **días de vida de anaquel**, se obtuvieron resultados altamente significativos en los tres tipos de melón (Cuadros 2, 3 y 4). En el tipo Crenshaw el tratamiento 1 aumentó con 88.9 % más días, el tratamiento 2 con 55.6 % más días que el testigo, el cual tuvo una duración de nueve días que es la comúnmente encontrada para la región. En el tipo Cantaloupe el tratamiento 1 tuvo 83.3 % de más vida de anaquel, y el tratamiento 2 33.3 % de más días, comparados con el testigo que reportó 12 días, considerados como normal para la zona. Para el tipo Honey Dew el tratamiento 1 incrementó en 33.3 % la vida de anaquel, seguido del tratamiento 2 con 12.1 % de más días, en relación al testigo que tuvo una duración de 33 días, valores normales para el Valle del Yaqui.

Cuadro 3. Respuesta de las variables evaluadas a la aplicación de ácidos carboxílicos y nitrato de calcio en diferentes épocas en melón Cantaloupe cv. Primo. Ciclo otoño-invierno 1990-1991.

Tratamiento	Número de frutos planta ⁻¹	Diámetro ecuatorial	Diámetro polar	Peso del fruto planta ⁻¹	Vida de anaquel
		----- cm -----		g	días
Acido carboxílico	2.6 a	12.80 a	13.02 a	2472.00 a	22 a
Nitrato de calcio	1.9 b	12.96 a	13.03 a	2070.00 a	16 b
Testigo	1.5 c	12.17 a	12.02 a	1135.00 b	12 c

Nota: Promedio con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales. Tuckey (0.05).

Cuadro 4. Respuesta de las variables evaluadas a la aplicación de ácidos carboxílicos y nitrato de calcio en diferentes épocas en melón tipo Crenshaw. Ciclo otoño-invierno 1990-1991.

Tratamiento	Número de frutos planta ⁻¹	Diámetro ecuatorial	Diámetro polar	Peso del fruto planta ⁻¹	Vida de anaquel
		----- cm -----		g	días
Acido carboxílico	1.1 a	13.94 a	18.01 a	1567.03 a	17 a
Nitrato de calcio	1.2 a	13.06 b	16.00 b	1290.02 b	14 b
Testigo	0.8 b	12.78 b	16.00 b	871.02 c	9 c

Nota: Promedio con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales. Tuckey (0.05).

Este incremento en la vida útil de los frutos se debe a que a uno de los tratamientos a base de ácidos carboxílicos, es aplicado al fruto durante el proceso de llenado (packard), el cual provee al mismo de calcio y boro, relacionado con la firmeza, senescencia y apariencia general. La aplicación de estos productos contribuye a la formación de pectatos de calcio en la pulpa, los cuales mejoran la firmeza, incrementándose con ello la vida de anaquel. Resultados similares a estos fueron obtenidos por Betts y Bramlage (1977) en manzana, Drake y Spoyd (1983) en manzana golden, y Rodríguez (1990) en melón. Además, Hadfield *et al.* (1998), trabajando en la maduración de frutos de melón, asociaron a las enzimas relacionadas y la presencia de calcio en las mismas, regulando el proceso; así como la disminución de la velocidad de senescencia de los frutos en general por efectos de deshidratación con la aplicación de productos a base de calcio reportada por Stutte (1995).

CONCLUSIONES

Las aplicaciones de los diferentes productos a base de ácidos carboxílicos provocaron incrementos en el rendimiento de los tres tipos de melón. En Honey Dew incrementó en 176.1 % el peso del fruto, así como también su número de frutos con 100 %. Para el tipo Cantaloupe reportó un incremento de 117.7 % en peso y para número de frutos 72.3 % y para el tipo Crenshaw fue un incremento de 79.9 % en el peso del fruto y un incremento de 36.8 % en el número de frutos.

La prolongación de la vida postcosecha es altamente incrementada por la aplicación de los ácidos carboxílicos, alcanzando el más alto número de vida de anaquel, el tipo Crenshaw con 17 días (88.9 %) de vida de anaquel comparados con los otros tipos de melón, ya que el tipo Cantaloupe tuvo más duración 22 días (83.3 %) y el tipo de Honey Dew con 44 días (33.3 %).

LITERATURA CITADA

- Betts, H.A. y W.J. Blamlage. 1977. Uptake of calcium by apples from harvest dips in calcium chloride solutions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 102: 785-788.
- Coombe, B.G. 1976. The development of fleshy fruits. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 27: 207-228.
- Drake, S.R. y S.D. Spoyd. 1983. Influence of calcium treatment of golden delicious apple quality. *J. Food Sci.* 48: 403-405.
- Espinoza, A.J.A. 1993. Evaluación de ácidos carboxílicos y nitrato de calcio para incrementar calidad, cantidad y vida de anaquel en calabacita (*Cucurbita pepo* L.) var. Cheffini en el Valle del Yaqui, Son. Tesis Licenciatura. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Escobosa, V.L. 1986. Influencia de tratamientos de postcosecha en la calidad de durazno (*Prunus persica* L. Batsch). Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Ferguson, I.B. 1979. The movement of calcium ion non vascular tissue of plant. *Soil Sci. and Plant Analysis* 10: 217-224.
- Figueroa, L.F. 1994. Evaluación de compuestos a base de calcio y ácidos carboxílicos para incrementar vida de anaquel, cantidad y calidad en frutos de sandía (*Citrullus vulgaris* Sch.) var. Calsweet, en el Valle del Yaqui, Son. Tesis Licenciatura. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Garcés, R. 1989. Aplicación de ethrel y ácidos giberélicos para alterar la expresión sexual e incrementar producción en sandía (*Citrullus vulgaris* var. Calsweet). Valle del Yaqui, Sonora, ciclo otoño-invierno en el Valle del Yaqui, Son. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Hadfield, K.A., J.K.C. Rose, D.S. Yaver, R.M. Berka y A.B. Bennet. 1998. Polygalacturonase gene expression in ripe melon fruit supports a role for polygalacturonase in ripening-associated pectin disassembly. *Plant Physiol.* 117: 363-373.
- Ibarra, T.C. 1991. Evaluación de fitorreguladores para incrementar productividad en dos tipos de melón bajo dos localidades. Tesis Licenciatura. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Johannes, E., A. Crofts y D. Sanders. 1998. Control of Cl⁻ efflux in Chara corallina by cytosolic pH, free Ca²⁺, and phosphorylation indicates a role of plasma membrane anion channels in cytosolic pH regulation. *Plant Physiol.* 118: 173-181.
- Kirk, E.R. 1962. Enciclopedia de tecnología química. Tomo 1. UTHEA, México, D.F. pp. 267-268.

- Kirkby, E.A. y D.J. Pilbean. 1984. Calcium a plant nutrient. *Plant, Cell and Environment* 7: 394-405.
- Munguía, A. 1989. Aplicación de ethrel (ácido 2-cloroetilfosfónico) y activol (ácido giberélico AG3) para alterar la expresión sexual e incrementar la producción de melón Cantaloupe (*Cucumis melo* L.) cv. Easy Rider, en el Valle del Yaqui, Sonora, ciclo otoño-invierno 1988-1989. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Pallaghy, C.K. 1970. The effect of Ca on the ion specificity of stomatal opening in epidermal strips of *Vicia faba*. *Res. School Biol. Sci.* 62: 58-59.
- Rodríguez, L. 1990. Evaluación de productos a base de calcio y fitorreguladores en melón Cantaloupe cv. Top Mark. Tesis Universidad Autónoma Chapingo.
- Rodríguez, S.F. 1992. Fertilizantes. *Nutrición vegetal*. AGT editor. México, D.F.
- Rojas, G.M. y M. Rovalo. 1985. *Fisiología vegetal aplicada*. 3a. edición. Editorial McGraw Hill, Mèx., D.F.
- Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 1994. *Fisiología vegetal*. Grupo Editorial Iberoamericana, S.A. de C.V. México D. F.
- Shear, C.B. 1975. Análisis y perspectivas de la producción de hortalizas en el estado de Baja California Norte. *Econotecnia Agr.* VI (4): 39.
- Singh, B.P., D.K. Tandon y S.K. Kaira. 1993. Changes in postharvest quality of mangoes affected by preharvest application of calcium salts. *Sci. Hort.* 54: 211-219.
- Street, H.E. 1969. *Metabolismo de las plantas*. Editorial AIHANIBRA, S.A. Méx.
- Stutte, C. 1995. Laboratory evaluation of TOG NH4 on cotton, tomato, and soybean. *Crop Sci.* 35: 1069-1073.
- Troncoso, R. y R. Baez. 1989. Evaluación de la aplicación de calcio en precosecha sobre parámetros de calidad de durazno (*Prunus persica* (L.) Batsch.) cv. Flor de Prince. pp. 69. *In: Memorias III Congreso Nacional, Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas, A.C.*
- Uvalle, B.J.X. 1992. Contenido y esencia de la nutrición vegetal. *In: Memorias del curso de nutrición vegetal y fertilidad de suelos*. Fertimex, Colegio de Postgraduados e ITSON. Cd. Obregón, Son.
- Watkins, C.B. y I.B. Ferguson. 1981. Ions relations of apple fruit tissue during development and ripening. Calcium uptake. *Soil Sci. and Plant Anal.* 7: 211-213.
- Wiersum, L.K. 1979. Effects of environment and cultural practices on calcium nutrition. *Soil Sci. and Plant Anal.* 10: 259-264.

COLONIZACION MICORRIZICA ARBUSCULAR, ACTIVIDAD FOSFATASICA Y LONGITUD RADICAL COMO RESPUESTA A ESTRES DE FOSFORO EN TRIGO Y TRITICALE CULTIVADOS EN UN ANDISOL

Mycorrhizal Arbuscular Colonization, Phosphatase Activity and Root Length as Response to the Phosphorus Stress in Wheat and Triticale Cultivated in an Andisol

Portilla Cruz I.¹, Molina Gayosso E.¹, Cruz-Flores G.¹, Ortiz Monasterio I.² y Manske G.G.B.²

RESUMEN

La baja disponibilidad de fósforo (P) en Andisoles es limitativa para la producción de cultivos. Evaluar el efecto de actividad fosfatásica y colonización micorrízica arbuscular sobre la absorción de fósforo en trigo y triticale, fue el objetivo de este trabajo. Se realizó un experimento en invernadero con un Andisol de Pátzcuaro, Michoacán. Se evaluaron cuatro genotipos de cada especie, bajo dos tratamientos de suelo: normal y estéril. Además se aplicaron tres dosis de fósforo (0, 40 y 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅), así como la aplicación constante de 150 kg ha⁻¹ de N. Se cosechó en antesis, se evaluó el peso fresco, peso seco, la concentración de P en biomasa aérea. En raíces se analizó la actividad fosfatásica (AF), porcentaje de colonización micorrízica arbuscular y longitud radical. La actividad fosfatásica en raíces fue significativamente mayor en suelo estéril respecto al natural, a 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅, alcanzó su máximo valor sin mostrar cambio al aumentar la dosis de P. No hay diferencia significativa de AF entre especies, e influye en ella la interacción entre especie y P aplicado. Se observó mayor AF en trigo sin aplicación de P (0 kg ha⁻¹ de P₂O₅) mientras que AF fue mayor en triticales a 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Porcentaje de colonización micorrízica (PCM) fue significativamente mayor en suelo normal (24 %), comparado con el estéril (18 %). Respecto a especie, PCM fue menor en trigo. La longitud radical (LR) fue mayor en suelo natural (103.92 cm) al compararse con el esterilizado (84.30 cm). La LR aumentó significativamente con aplicación de P y no existieron diferencias entre especies. La longitud radical colonizada (LRC)

incrementó a 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅, y no hay variación al aumentar la dosis de P. La LRC fue mayor en triticale.

El porcentaje de colonización radical influye en la absorción de P, pues la máxima acumulación de este elemento fue a 40 y 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en triticale. Estos tuvieron mayor PCM en las mismas dosis de P y en las dos condiciones de suelo, lo que se confirma con el valor de correlación ($r = 0.75$) entre longitud radical infectada y concentración de P en la biomasa.

Palabras clave: Micorrizas, enzima fosfatasa, absorción de fósforo, Andisol.

SUMMARY

Low availability of phosphorous (P) in Andisols is a limitation for the production of crops. The goal of this research was to evaluate the level of the phosphatase activity and endomycorrhizal colonization in the absorption of phosphorous in wheat and triticale in Andisols. The experiment was carried out in a greenhouse at the International Center Wheat and Maize Improvement (CIMMYT, Int.), with an Andisol from Patzcuaro, Michoacan. Four triticale and four wheat genotypes were evaluated under the two treatments of soil: normal and sterile and the levels of 0, 40, and 80 kg ha⁻¹ of P₂O₅, with 150 kg ha⁻¹ de N. It was harvested at anthesis and fresh and dry weight and phosphorus concentration in ear biomass were evaluated; the phosphatase activity, percent of endomycorrhizal colonization and root length were analyzed with the roots. Phosphatase activity (PA) in roots was significantly higher in the sterile soil compared to the natural. The PA at 40 kg ha⁻¹ of P₂O₅ reached its maximum value without changing when increasing the P doses. There was no significant difference on this trait between species. There was an interaction between P applied and species, a greater phosphatase activity was observed

¹ FES Zaragoza, UNAM. J. C. Bonilla No. 66, Col. Ejército de Oriente, 09230 México, D. F.

² CIMMYT, Apartado Postal 6-641, 06600 México, D.F.

in wheat at 0 kg ha⁻¹ of P₂O₅ while the PA was greater in triticale at 40 kg ha⁻¹ of P₂O₅. Endomycorrhizal colonization percent (ECP) was significantly greater with normal soil (24%), compared to the sterile soil (18%). The colonization percent reached its maximum (22.4%) at 40 kg ha⁻¹ of P₂O₅ without a significant change when increasing P application. The infection percentage was significantly less in wheat. The root length (LR) was significantly higher in normal soil (103.92 cm) compared to the sterile (84.30 cm). The LR augmented significantly on increasing the amount of P and there was no difference on this trait between genotypes. The root length infected increased at 40 kg ha⁻¹ of P₂O₅ without changing when augmenting the P doses. The root length infected was significantly bigger in triticale. The root length colonization percentage has an important effect on the absorption of P, because the maximum accumulation of this element was at 40 and 80 kg ha⁻¹ of P₂O₅ with triticale. The latter had a bigger percentage of colonization with the same levels of P, with both conditions of soil, besides the correlation ($r = 0.75$) between colonized root length and concentration of P in biomass.

Index words: Mycorrhizas, phosphatase enzyme, phosphorus uptake, Andisol.

INTRODUCCION

La alimentación es uno de los principales problemas a los que se enfrenta el mundo actual. Este es agravado por el acelerado crecimiento demográfico; sobre todo en países en vías de desarrollo.

La investigación agrícola se presenta como alternativa de solución, ya que su objetivo es incrementar el rendimiento y el contenido proteico de los cultivos, además de buscar que éstos sean cada vez más eficientes en condiciones climáticas y edáficas adversas.

El incremento en la demanda anual anticipada de trigo en países desarrollados es 3%, no obstante el aumento es sólo 0.7%. Por otro lado, las inversiones en fertilizantes, para el incremento en rendimiento de grano, son generalmente bajas. La fertilización con fósforo tiene mayor erogación en la producción de trigo, estimada en 1 millón de toneladas y con un costo aproximado de 1000 millones de dólares al año

en el mundo (Manske, 1994). El problema de disponibilidad de fósforo para las plantas está relacionado con suelos

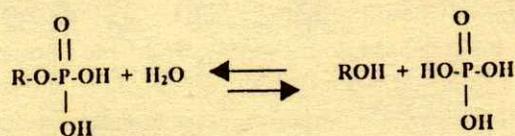
de pH ácido. En ellos sólo de 8 a 10% de la fertilización fosfatada es utilizada y el resto es rápidamente inmovilizado (Etchevers y Nuñez, citados por Cruz, 1994). Entre los principales suelos de reacción ácida están los Andisoles que cubren 9% del territorio nacional.

Por lo anterior, se puede decir que lograr incrementos en la eficiencia de los cultivos en la obtención de fósforo puede incidir directamente en los costos de producción además de conservar las fuentes no renovables de fósforo.

La adaptación de las plantas a este estrés nutricional puede lograrse mediante tolerancia y evasión, ésta última estrategia es más común para la adaptación a suelos ácidos. Ejemplos de evasión son: cambios inducidos por la raíz en la rizósfera, tales como el incremento de pH; liberación de agentes quelatantes para eliminar la toxicidad del aluminio soluble, alta actividad de ectoenzimas (por ejemplo fosfatasa ácida) e incremento del volumen de suelo explorado por las raíces vía micorrizas (Marschner, citado por Cruz, 1994).

La actividad fosfatásica se refiere a la reacción enzimática que llevan a cabo un grupo de enzimas denominadas fosfatasas, las cuales son un tipo especial de exudado de raíz que catalizan la hidrólisis de los ésteres y anhídridos del ácido fosfórico (Schmidt y Laskowki, citados por Tabatabai, 1982).

La ecuación general de la reacción catalizada por la fosfatasa ácida y alcalina es (Tabatabai, 1982):



La actividad de esta enzima es más alta en la superficie de la raíz que en el volumen del suelo y se incrementa en plantas ante la deficiencia de P (Cruz, 1994; Hedley, 1994).

Tadano (1993) menciona que la habilidad de las raíces para secretar fosfatasa ácida difiere entre especies de plantas e inclusive entre organismos de la misma especie.

Calderón y Gabriel (1993) encontraron que la actividad fosfatásica varía inter e intraespecíficamente, está influenciada por la madurez fisiológica de

la planta y tiene diferente respuesta a las variadas formas de fósforo orgánico e inorgánico del suelo.

Otra estrategia de evasión es producida por los beneficios de la asociación de las plantas con hongos micorrízicos, conocida como simbiosis mutualista la cual se da entre hongos del orden glomales (Clase Zigomicetes) y las raíces de las plantas superiores (Sieverding y Morton y Benny, citados por Manske, 1994). Esta simbiosis mutualista no es específica a la planta que coloniza y tiende a ser generalista en la selección de su hospedero. El tipo de micorriza más importante y ampliamente distribuido es la micorriza arbuscular (MA).

El incremento en absorción de fósforo por plantas micorrizadas puede ser producido por mayor exploración física del suelo; aumento del movimiento dentro de la hifa; incremento en su almacenamiento, eficiencia en la transferencia del elemento a las raíces de la planta y su eficiente utilización dentro de la planta (Bolan, 1991).

Manske y Vlek (1994) reportan, para un experimento que utiliza 44 genotipos de trigo 22 líneas de alto rendimiento y 22 variedades viejas, que éstas últimas dependen más de la simbiosis que los trigos modernos (alto rendimiento).

MATERIALES Y METODOS

El experimento se realizó en invernadero. Se ensayaron cuatro genotipos de triticale: Rhino, 1D(1R), 2D(2R), 6D(6A); y cuatro de trigo: Pgo-Seri, Roller, Attila y Turaco; en tres niveles de fósforo (0, 40 y 80 kg ha⁻¹) y dos condiciones de suelo (estéril y natural) con cuatro repeticiones lo que generó un arreglo factorial en un diseño completamente al azar. Se utilizaron macetas con capacidad de tres kilogramos; se aplicó una dosis constante de nitrógeno (150 kg ha⁻¹) en forma de urea.

El suelo empleado fue un Andisol proveniente de Pátzcuaro, Michoacán (Cuadro 1). La esterilización se realizó mediante calentamiento (90 °C) y enfriamiento (temperatura ambiente) alternado (24 x

24 h por seis días). Para restablecer la actividad bacteriana del suelo se preparó un inóculo libre de esporas de hongos al filtrar un extracto de suelo a través de un tamiz de 45 µm de malla. El filtrado (200 mL/maceta) se adicionó tanto al suelo esterilizado como al natural.

En la etapa de anthesis (90 días a la siembra) se hizo la toma de muestras de raíz y parte aérea. La actividad fosfatásica radical se evaluó mediante el método de p-Nitrofenilfosfato (Tabatabai, 1982), modificado y adaptado para raíz por Cruz (1994).

En la evaluación del porcentaje de colonización micorrízica se utilizó el método para colorear descrito por Phillips y Hayman (1976), modificado por Manske (1994).

Para la determinación de la longitud radical se usó el método de las intersecciones descrito por Tennant (1976).

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 2 se indica que las cinco variables evaluadas: peso seco de tallos (PST), acumulación de fósforo en tallos (ACUMP), longitud radical (LR), longitud radical colonizada (LRC) y actividad fosfatásica (AF), fueron altamente influenciadas principalmente por condición de suelo (natural y estéril) y dosis de fósforo a excepción de la actividad fosfatásica que fue poco influenciada por la dosis de fósforo aplicada. La variación de PST y ACUMP se atribuyó también a lo descrito anteriormente y a las propiedades genotípicas del cultivo.

En el Cuadro 3 se observa el efecto de condición de suelo en la longitud radical, longitud radical colonizada, porcentaje de colonización y peso seco de tallo; en condición estéril estas cuatro variables presentaron disminución significativa en comparación a plantas que crecieron en suelo natural.

En general, la longitud radical en condición estéril se vio reducida 23 %, el porcentaje de colonización 52.13 %, el porcentaje de longitud radical colonizada fue de 73.8 % menor que en suelo natural. El peso

Cuadro 1. Propiedades químicas del suelo en estudio previa a la siembra.

Condición de suelo	pH (1:2.5)		P-Olsen	MO	N-total	Mg	K	ClCT	Fe	Mn	Zn	Cu	Al
	H ₂ O	CaCl ₂ 1cM											
Esterilizado	6.2	5.8	7.1	8.98	0.468	152	345	6.10	20.6	7.5	0.6	1.0	2.6
Natural	6.0	5.7	6.8	8.92	0.450	134	315	5.76	16.3	3.3	0.3	0.6	1.6

Cuadro 2. Análisis de varianza de los parámetros estudiados en los cultivos de trigo y triticale.

Fuente de variación	g.l.	PST	ACUMP	LR	LRC	Actividad fosfatásica
Condición de suelo	1	***	***	***	***	***
Dosis de P	2	***	***	***	***	*
Genotipo	6	***	**	ns	*	***
Especie	1	***	***	ns	**	ns
P * especie	2	*	ns	ns	ns	*
P * genotipo	12	ns	ns	ns	ns	ns
Condición de suelo * P	2	**	ns	***	**	ns
Condición de suelo * especie	1	ns	***	ns	ns	ns
Condición de suelo * genotipo	6	**	***	*	ns	ns
Condición de suelo * P * especie	2	ns	ns	ns	ns	ns
Condición de suelo * P * genotipo	12	ns	ns	ns	ns	ns
x		2.4	4.2	94.10	20.03	2.66
CV (%)		22.6	24.7	32.21	43.90	28.1

*** = altamente significativo. ** = medianamente significativo. * = poco significativo. ns = no significativo.

PST = peso seco de tallo. ACUMP = acumulación de fósforo. LR = longitud radical. LRC = longitud radical colonizada.

seco de tallo aumentó en suelo natural 40 % comparado con las plantas que crecieron en suelo estéril.

Aunque la longitud radical, al igual que otras características morfológicas de la planta, está genéticamente determinada, también influyen las condiciones ambientales. De este modo un determinado genotipo tendrá diferente longitud radical si se modifica la concentración de algún nutrimento en la solución del suelo. Frecuentemente se ha reportado que las raíces experimentan elongación como mecanismo de eficiencia en la obtención de algún nutrimento cuando se encuentra carente de éste; sin embargo, esta característica se ha modificado por prácticas de mejoramiento. Estas se enfocan más a evaluar la respuesta a adición de fertilizantes que a estudiar el incremento de eficiencia en uso y obtención de nutrimentos del suelo (Manske y Vlek, 1994).

La longitud radical fue 23 % mayor cuando crecieron en suelo natural que cuando lo hicieron en suelo estéril presentando alta significancia estadística (Cuadro 2).

Cuadro 3. Efecto de la condición del suelo sobre PC, LR, LRC y PST.

Suelo	PC	LR	LRC	PST
	%	----- cm	-----	g
Estéril	16.60	84.30	14.61	2.00
Natural	23.96	103.92	25.45	2.83

PC = porcentaje de colonización. LR = longitud radical.

LRC = longitud radical colonizada. PST = peso seco de tallo.

En cuanto a dosis (Cuadro 4) de fósforo, la LR se incrementa significativamente al aumentar el contenido de fósforo en suelo estéril, mientras que en suelo natural alcanza su máximo a 40 kg P ha⁻¹.

La longitud radical se ve influenciada por la condición de suelo y dosis de fósforo y en menor grado por la interacción de las dos anteriores así como por la interacción, condición de suelo - genotipo.

El porcentaje de colonización endomicorrízica disminuyó significativamente cuando el suelo fue esterilizado. El porcentaje fue aproximadamente 1.5 veces mayor en el suelo natural con respecto al estéril. La dosis de fósforo influye significativamente en el porcentaje de colonización y corresponde para el nivel 40 kg P ha⁻¹, el mayor valor y no hay aumento de esta variable con el incremento de la dosis; debido al efecto que tiene el fósforo en el porcentaje de colonización de hongos MA: Al aumentar la concentración de P en el suelo disminuye el PC, tal concentración está en función de la capacidad fijadora de este elemento por el suelo, y en relación con las diferentes especies de cultivos, con la concentración mínima (C-mín) de absorción y su inhibición, es debida a alteraciones en la fisiología del hospedero y no al efecto en el hongo, del fósforo del suelo (Schwab *et al.*, citados por Manske y Vlek, 1994).

El valor de la longitud radical colonizada fue 74 % mayor en genotipos que crecieron en suelo natural (Cuadro 4).

En cuanto a efecto de la dosis de fósforo aplicado: la menor LRC (9.17 cm) se tiene sin aplicación de fósforo (0 kg de P ha⁻¹), con incremento en más de

Cuadro 4. Efecto de la dosis de fósforo aplicado en suelo natural y estéril sobre PC, LR y LRC.

P kg ha ⁻¹	Suelo estéril			Suelo natural		
	PC	LR	LRC	PC	LR	LRC
0	14.04 b	60.01 c	9.17 c	21.05 b	81.40 b	17.10 b
40	18.72 a	77.68 b	14.28 b	25.75 a	118.20 a	31.03 a
80	17.20 a	115.18 a	20.37 a	25.07 a	112.14 a	28.22 a

PC = porcentaje de colonización. LR = longitud radical. LRC = longitud radical colonizada.

122 % al aumentar la dosis de fósforo a 80 kg P ha⁻¹ esto en suelo estéril, pero en suelo natural alcanza su máximo a 40 kg P ha⁻¹ (Cuadro 4).

Al comparar estas variables entre trigo y triticale no existe diferencia significativa entre longitud radical pero sí en porcentaje de colonización y longitud radical colonizada con valores (6.5 y 7.05 %, respectivamente) mayores en triticale, lo que indica que éste es más susceptible a la colonización micorrízica en comparación con el trigo.

En los Cuadros 5 y 6 se observa el efecto de la condición de suelo sobre la actividad fosfatásica de raíz, en la cual a diferencia de lo que ocurre en porcentaje de colonización (PC) y en la LRC; la actividad fosfatásica radical es 19 % superior en los genotipos que crecieron en la condición estéril respecto a los del suelo natural con alta significancia estadística.

En cuanto a respuesta de la actividad fosfatásica en las diferentes dosis de fósforo utilizadas, se observa que el mayor valor se encuentra a 40 kg P ha⁻¹ y es 15 % superior que en carencia de este elemento (0 kg P ha⁻¹) y 7 % más alta que a 80 kg P ha⁻¹ y aunque no existe diferencia significativa en cuanto a especie. La AF es ligeramente superior en trigo.

Cuando el trigo crece en suelo estéril su AF es 21 % mayor que cuando crece en suelo natural, de la misma forma cuando el triticale crece en suelo natural disminuye su AF en 15 % respecto al estéril.

Las observaciones anteriores sugieren que para las dos condiciones de suelo, el principal factor limitativo de crecimiento vegetal fue el fósforo. Tanto actividad fosfatásica como porcentaje de colonización

Cuadro 5. Efecto de condición de suelo sobre actividad fosfatásica radical en trigo y triticale.

Condición de suelo	Trigo		Triticale	
	µg p.NP g ⁻¹ h ⁻¹			
Estéril	3.01	2.84		
Natural	2.36	2.41		

micorrízica reciben influencia directa del estado nutrimental del fósforo en planta.

Para suelo natural, la presencia de estos dos mecanismos incrementa la eficiencia de las plantas en la obtención del elemento, en cambio para suelo estéril, la disminución del porcentaje de colonización es compensada, entre otros mecanismos, con un aumento en la actividad fosfatásica. A su vez se observa que la presencia de las micorrizas confieren a las plantas mayor respuesta a un factor de estrés nutrimental, en este caso por carencia de fósforo, que aquella debida a la secreción radical de la enzima fosfatasa ácida.

Se ha reportado que las hifas de los hongos MA toman el fósforo de las mismas fuentes que las plantas superiores y que la capacidad de secretar fosfatasas hacia el medio radical es propiedad exclusiva de éstas (Ezawa y Yoshida, 1994). Por otro lado se tiene que la AF es mayor tanto en trigo como en triticale a 40 kg P ha⁻¹ en las dos condiciones de suelo. Esto coincide con los valores más altos de PC en esta aplicación de fósforo, lo cual sugiere que la presencia de arbusculos en las células radicales incrementa su metabolismo de lo que se puede originar mayor producción y secreción de la fosfatasa ácida en la raíz del hospedero.

En el Cuadro 7 se observa el diferente comportamiento de las variables entre trigo y triticale en suelo natural, ya que ésta es la forma en la que podemos encontrar el suelo, con un estado determinado de fertilidad y grupos microbianos y hongos micorrízicos.

Cuadro 6. Efecto de condición de suelo y dosis de fósforo sobre la actividad fosfatásica radical en trigo y triticale (µg pNP g⁻¹ h⁻¹).

Condición de suelo	Dosis de fósforo		
	kg ha ⁻¹		
	0	40	80
Estéril	2.68 b	3.16 a	2.93 ab
Natural	2.28 a	2.53 a	2.35 a

Cuadro 7. Comportamiento de las variables evaluadas en suelo natural.

Cultivo	PST	ACUMP	LR	PC	LRC	AF
	g	mg	cm	%	cm	($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)
Trigo	2.65 CV = 14.52	4.64 CV = 16.06	104.65 CV = 27.42	23.20 CV = 17.60	24.80 CV = 37.71	2.36 CV = 28.09
Triticale	3.01 CV = 23.41	4.78 CV = 22.04	103.20 CV = 34.65	24.72 CV = 23.58	26.10 CV = 43.16	2.41 CV = 29.80

PST = peso seco de tallo. ACUMP = Acumulación de fósforo. LR = longitud radical. PC = porcentaje de colonización. LRC = longitud radical colonizada. AF = actividad fosfatasa ácida de raíz.

El triticale resultó ser más eficiente en la obtención de fósforo en este tipo de suelo (Andisol), así como un aumento significativo en el peso seco de tallos el cual fue 23 % mayor que en el trigo, gracias a que los triticales en general tuvieron una mayor respuesta en porcentaje de colonización micorrízica principalmente, lo que puede significar que el triticale tiene mayor dependencia de hongos MA.

En cuanto a genotipos estudiados, todos tuvieron un comportamiento diferente (Cuadro 8), ya que entre las variedades de trigo Attila y Roller son más eficientes en la obtención de fósforo, posiblemente porque Attila tuvo mayor actividad fosfatásica y Roller una longitud radical y actividad fosfatásica alta. En cuanto a las variedades de triticale tenemos que los cuatro genotipos fueron eficientes en la obtención de fósforo, Rhino posiblemente por su alta respuesta en longitud radical; 1D(1R) y 6D(6A) por su alta asociación con endomicorrizas y 2D(2R) por su alta actividad fosfatásica.

Cuadro 8. Resumen del comportamiento de las variables evaluadas de los genotipos de trigo y triticale.

Genotipo	PST	ACUMP	LR	LRC	PC	AF
Trigo						
Attila	***	***	*	*	*	**
PGO-Seri	**	*	*	***	*	***
Roller	***	***	***	**	*	***
Turaco	*	**	**	**	*	*
Triticale						
Rhino	**	***	***	*	**	*
1D(1R)	***	***	**	***	***	**
2D(2R)	**	**	**	**	**	***
6D(6A)	**	***	*	**	***	*

Respuesta: *** alta. ** media. * baja.

PST = peso seco de tallo. ACUMP = Acumulación de fósforo.

LR = longitud radical. PC = porcentaje de colonización.

LRC = longitud radical colonizada.

AF = actividad fosfatasa ácida de raíz.

CONCLUSIONES

La longitud radical colonizada (LRC) tiene alta y significativa correlación ($r = 0.75$) con la concentración de fósforo en tallos por lo que la asociación de las plantas con hongos micorrízicos absorben mucho más fósforo que las plantas no micorrizadas o poco micorrizadas. En cuanto a especie se observó que las variedades de triticale son más dependientes de esta asociación que las variedades de trigo, el triticale muestra mayor susceptibilidad a la condición de suelo natural al aumentar 64 % de su acumulación de fósforo en tallos y el aumento en peso seco en presencia de micorrizas en el suelo, no así para los genotipos de trigo que sólo lo incrementan 7 %.

LITERATURA CITADA

- Bolan, N.S., A.D. Robson y N.J. Barrow. 1984. Increasing phosphorus supply can increase the infection of plant roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology & Biochemistry* 16: 419-420.
- Bolan, N.S. 1991. A critical review on the role of micorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant Soil* 134: 189-207.
- Calderón, L.L., C.J. Gabriel. 1993. Evaluación de la influencia del fósforo sobre la actividad de la enzima fosfatasa ácida en distintos genotipos de trigo (*Triticum aestivum*) y triticale (*X. Triticosecale* Wittmack). Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. México.
- Cruz, F.G. 1994. Evaluación de la absorción de fósforo de diferentes genotipos de triticales (*X. Triticosecale* Wittmack) y trigo (*Triticum aestivum*) en suelos con diferente capacidad de fijación de fósforo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.
- Ezawa, T. y T. Yoshida. 1994. Acid phosphatase specific to arbuscular mycorrhizal infection in marigold and possible role in symbiosis. *Soil Sci. Plant Nutr.* 40: 655-665.
- Hedley, M.J. 1994. Phosphorus efficiency and the forms of soil phosphorus utilized by upland rice cultivars. *Plant Soil* 158: 53-62.
- Manske, G. 1994. Scientific background of the special project proposal. Utilization of the genotypic variability of mva

- symbiosis and root length density in a breeding program for phosphorus efficient wheat cultivars at CIMMYT.
- Manske, G. y G. Vlek. 1994. The prospects of developing nutrient efficient varieties (nev) for wheat based on symbiosis with va mycorrhizal fungi. *In: Crop tolerance to abiotic stresses.* BEHL, R.K. (ed.). CCS Haryana Agricultural University. India.
- Sieverding, E. 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. Technical Cooperation. Echborn. Federal Republic of Germany. 17-69.
- Tabatabai, A.M. 1982. Soil enzymes. *In: Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties.* Agronomy Monograph 2a ed. ASA-SSSA.
- Tadano, K. 1993. Secretion of acid phosphatase by the roots of crop plants under phosphorus-deficient properties of the enzyme secreted by lupin roots. *Plant Soil.* 155/156: 95-98.
- Tennant, D. 1976. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. of Ecology* 63: 995-1001.

ESTUDIO DE ADAPTABILIDAD DEL TRITICALE A DIFERENTES DOSIS DE CALCIO Y FOSFORO EN ANDISOLES

Adaptability Study of Triticale to Different Levels of Calcium and Phosphorus in Andisols

G. Cruz-Flores¹, S. Aviles Marín, J.C. Cortés Castelán

RESUMEN

Se evaluó, mediante estimación de rendimiento obtenido en el ciclo primavera-verano, la adaptabilidad del triticale (*X. Triticosecale* Wittmack) en Andisoles; con dos niveles de calcio (0 y 40 kg ha⁻¹ de Ca) y tres niveles de fósforo (0, 40 y 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅), aplicando calidra [Ca(OH)₂] y superfosfato triple (SFT) como fuente de calcio y fósforo, respectivamente. El estudio se realizó en dos localidades: Cuesta del Carmen (CDC) y Mesas de San Martín (MSM) del municipio Villa de Allende, México. El mayor rendimiento en CDC fue de 1672.7 kg ha⁻¹ y se obtuvo con el tratamiento 0-80 de calcio y fósforo; sin diferencia significativa entre las diferentes dosis de calcio y fósforo, para esta zona. En cambio, el rendimiento máximo en MSM se obtuvo con el tratamiento 40-40 con un rendimiento de 2528.5 kg ha⁻¹ siendo 31.55 % superior respecto a su testigo (1714.9) y aunque no se observaron diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre tratamientos y dosis de Ca y P manejadas; en esta zona la adición de calcio optimiza disponibilidad y asimilación del fósforo por el triticale. En MSM el rendimiento promedio total fue de 1922 kg ha⁻¹ y aquí, éste es significativamente superior ($\alpha=0.05$) respecto al obtenido en CDC que fue de 1532 kg ha⁻¹. Se plantea la hipótesis de que el triticale se adaptó en ambas comunidades de estudio con una buena producción de grano al considerar que es la primera vez que se cultiva en la zona y que la aplicación de fósforo para el cultivo se realizó en dosis menores que las usadas en la zona para el trigo con la variante de aplicación de cal en el barbecho. El rendimiento obtenido para cada uno de los tratamientos en ambas localidades superó al rendimiento de los trigos harineros y duros que oscilan entre 1000 y 1400 kg ha⁻¹ en estos lugares.

¹ FES Zaragoza, UNAM, J.C. Bonilla No. 66, Col. Ejército de Oriente, 09230 México, D. F.

Aceptado: Noviembre de 1997.

Palabras clave: Acidez del suelo, fijación de fósforo, eficiencia y adquisición de fósforo.

SUMMARY

The adaptability of triticale (*X. Triticosecale* Wittmack) to Andisols was evaluated using two levels of calcium (0 and 40 kg ha⁻¹) and three levels of phosphorus (0, 40, and 80 kg ha⁻¹). The crop yield was calculated in the spring-summer season. The study areas were at Cuesta del Carmen (CDC) and Mesas de San Martín (MSM) in Mexico State. The highest crop yield was 1672.7 kg ha⁻¹ at CDC with 0 kg ha⁻¹ of calcium and 80 kg ha⁻¹ of P₂O₅, although there was no significant difference between combinations. For MSM the combination of 40 kg ha⁻¹ of calcium and 40 kg ha⁻¹ of P₂O₅ showed a higher crop yield with 2528.5 kg ha⁻¹, and the combinations were not significantly different ($P=0.05$); however, calcium improved the availability and assimilation of phosphorus for the triticale plant. The average crop yield among areas was significantly different, 1922 kg ha⁻¹ in MSM and 1532 kg ha⁻¹ in CDC; but both were higher than the reported 1000 to 1400 kg ha⁻¹ for bread and durum wheat.

Index words: Soil acidity, phosphorus fixation, phosphorus efficiency.

INTRODUCCION

Los Andisoles, originados a partir de la depositación de cenizas volcánicas, están formados por complejos alófono-humus y se desarrollan en montañas cubiertas por bosques y praderas (Duchaufour, 1984). El factor limitante que presentan para el desarrollo de plantas cultivadas, es su acidez, misma que determina la baja disponibilidad del fósforo por las formas iónicas que presenta (H₂PO₄⁻¹, HPO₄⁻² y PO₄⁻³) (Hettel, 1989). En condiciones de alta acidez se disuelven suficiente hierro y aluminio que precipitan al ion fosfato, y forman sus correspondientes sales [Al(OH)₂H₂PO₄, Fe(OH)₂H₂PO₄] que

resultan difíciles de asimilar por las plantas (Fixen, 1994; León, 1991). Estos suelos presentan además, con distinto grado de intensidad, deficiencias de calcio, magnesio, molibdeno y potasio (Hettel, 1989).

No obstante lo descrito, existen plantas adaptadas a suelos ácidos que utilizan una gran variedad de mecanismos que están regulados separadamente (tolerancia al aluminio y manganeso) o bien, están relacionados (eficiencia y adquisición del fósforo).

En la región en la que se ubican las parcelas experimentales, se cultiva preferentemente maíz y otros cereales como trigo y avena para forraje de ganado principalmente bovino. Tanto trigo como avena generalmente producen rendimientos bajos (SEDAGRO, 1995). Medrano (1993) encontró que la aplicación de dosis de 40 y 80 kg por hectárea de P_2O_5 incrementa el rendimiento de triticale hexaploide (2.8 y 3.5 t ha, respectivamente) en el municipio de Villa de Allende.

El triticale es una especie desarrollada por el hombre que ha reemplazado al trigo en algunas regiones que presentan suelos de alta acidez (Bushuk, 1980), presenta tolerancia a la toxicidad del hierro y aluminio (Aguilar, 1987) y posee un alto valor nutritivo (Peña y Amaya, 1980). Los triticales, por otro lado, producen mayor biomasa y acumulación más alta de nitrógeno y fósforo que sus progenitores, aún en suelos de baja fertilidad.

Ante la problemática alimenticia y el estado de la fertilidad de los Andisoles, el triticale muestra ser una alternativa importante de alimento en regiones con este tipo de suelos.

MATERIAL Y METODOS

El estudio se llevó a cabo en dos comunidades: Cuesta del Carmen (CDC) y Mesas de San Martín (MSM), en Villa de Allende, estado de México. Las características generales de cada zona se presentan en el Cuadro 1.

En cada localidad el área experimental se dividió en 18 parcelas de 26 m² cada una (8 surcos de 0.7 m X 4 m cada uno) con una densidad de siembra de 100 kg ha⁻¹. Se aplicaron 80 kg ha⁻¹ de nitrógeno como nitrato de amonio (NH_4NO_3) en todos los tratamientos y se manejaron dos niveles de calcio (0 y 40 kg ha⁻¹) y tres de fósforo (0, 40 y 80 kg ha⁻¹) empleándose

Cuadro 1. Datos generales de Cuesta del Carmen (CDC) y Mesas de San Martín (MSM).

	CDC	MSM
Latitud	19° 27.8'	19° 20.1'
Longitud	100° 12.1'	100° 5'
Altitud (m)	2700	2600
Temperatura media anual (°)	12-15 °C	11-14 °C
Precipitación media. anual (mm)	1150-1280	1000-1200
Frecuencia heladas	60 - 80 días	90 días
Tipo de suelo	Andosol humico	
Tipo de roca	Ígnea extrusiva	
Clase textural	Media	Franca
Geología	Cenozoico	Terciario
Clima	C (w ₂) (z) Templado	

cal [$Ca(OH)_2$] como fuente de calcio y superfosfato triple (SFT) como fuente de fósforo, al ser éstas de fácil obtención. Las dosis de calcio y de fósforo se combinaron, resultando los tratamientos que se muestran en el Cuadro 2.

La distribución de tratamientos se hizo al azar con tres repeticiones en MSM y dos en CDC. Para realizar los análisis físicos y químicos (Cuadro 3) y de nutrimentos (Cuadro 4) del suelo, se tomó una muestra compuesta mediante un muestreo semi-lineado, realizado antes de la siembra.

Para el análisis foliar se colectó, para cada una de las parcelas, de 24 plantas la hoja bandera en etapa de antesis. Posteriormente, este material se desecó a una temperatura entre 65 y 70 °C hasta alcanzar peso constante, se molió y se determinó la concentración de los nutrimentos presentes en el tejido vegetal (Cuadro 5).

RESULTADOS Y DISCUSION

Propiedades Físicas y Químicas del Suelo

El pH del suelo en ambas localidades se encuentra de fuerte a medianamente ácido, lo que coincide con

Cuadro 2. Descripción de tratamientos.

No.	Ca(OH) ₂ †	SFT‡	Tratamiento
	kg ha ⁻¹		(Ca, P ₂ O ₅)
1 (testigo)	0	0	(0,0)
2	0	40	(0,40)
3	0	80	(0,80)
4	40	0	(40,0)
5	40	40	(40,40)
6	40	80	(40,80)

† Hidróxido de calcio. ‡ Superfosfato triple.

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas del suelo en Cuesta del Carmen (CDC) y Mesas de San Martín (MSM).

Localidad	Densidad		CE§ 1:5 a 25 °C	Propiedad Color¶	pH#			MO††	CICT‡‡
	Aparente†	Real‡			H ₂ O 1:2.5	KCl 1N 1:2.5	Ca (Cl) ₂ cM 1:2.5		
	g cm ⁻³		dS m ⁻¹				%	cmol. kg ⁻¹ suelo	
CDC	0.86	2.5	1.24	Café	5.13	5.1	5.3	3.55	53
MSM	0.66	1.97	1.45	Café	5.1	4.6	5.1	3.28	52.6

† Método de la probeta. ‡ Método del picnómetro. § Conductímetro. ¶ Tablas Munsell. # Potenciómetro. †† Método de óxido-reducción con dicromato via húmeda. ‡‡ Saturación con sales de calcio.

los resultados reportados por Medrano (1993) y García y Hernández (1994). A estos niveles de pH no existe fuerte riesgo de toxicidad para el desarrollo de las plantas por la concentración de aluminio y manganeso, sin embargo, los fosfatos asimilables (monobásicos y dibásicos) se combinan con hierro y aluminio para formar sales y complejos químicos que son insolubles.

La densidad aparente es baja, debido a que son suelos no compactados, su textura de migajón favorece su aireación, retención de humedad, buen drenaje y mayor penetración radical (Duchaufour, 1984). Alta capacidad de intercambio catiónico total (CICT) para las dos comunidades pero muy baja concentración de calcio y magnesio, potasio y sodio, que no están disponibles para que sean absorbidos por el cultivo (Bohn *et al.*, 1993; Buol *et al.*, 1991; Laird, 1984).

Nutrientes del Suelo

La concentración de fósforo extractable es deficiente tanto en CDC como en MSM, lo que se atribuye a una baja movilidad del elemento por acción del material parental, y la presencia, principalmente del alófano-humus. Este material mineral amorfo es responsable de la fijación de ortofosfatos, que llega a fijar hasta 92 % del fósforo aplicado (Wada, 1985, citado por García y Hernández, 1994).

El calcio y el magnesio, al igual que el fósforo presentan concentraciones bajas, debido a que en los suelos ácidos el material parental que les da origen

-andesitas- son deficientes en estos elementos, y además existe pérdida de ellos por lixiviación (Tamhane, 1978) (Cuadro 4).

El nitrógeno total no es deficiente en ambas comunidades pero la acidez provoca una deficiente nitrificación en el suelo debido a la actividad microbiana que se ve afectada (Gros, 1981).

Nutrientes en Tejido Vegetal

Para determinar el estado nutricional del cultivo de triticale, se compararon los resultados obtenidos de la concentración de los nutrientes, con tablas de niveles de nutrientes reportadas para trigo por Loué (1987), debido a la falta de información sobre el estado nutricional del triticale, y a que el cereal que presenta características más similares, es el trigo.

El estado nutricional del cultivo del triticale obtenido a partir de la comparación de las tablas establecidas para el trigo, muestra que los macronutrientes fósforo, calcio, magnesio y nitrógeno presentes en el tejido vegetal se encuentran en bajas concentraciones para ambas comunidades, sin embargo, no se presentaron los síntomas de deficiencia de estos nutrientes (Cuadro 5).

Se ha reportado que el triticale tiene mayor eficiencia en uso de los nutrientes fósforo y nitrógeno (Varughese y Saari, 1986) y puede atribuirse a esa eficiencia el que la planta no manifieste síntomas de deficiencia de ellos a pesar de la baja concentración en sus tejidos.

Cuadro 4. Concentración de nutrientes del suelo en Cuesta del Carmen (CDC) y Mesas de San Martín (MSM).

Localidad	Nutriente								
	N†	Ca‡	Mg‡	B‡	Zn‡	Cu‡	Fe‡	Mo‡	P§
	%	cmol. kg ⁻¹ suelo				ppm			%
CDC	0.8196	3.3	1.77	53.3	0.56	2.4	55.55	7.29	0.0032
MSM	0.6629	3.0	2.6	51.1	0.094	2.6	12.55	4.16	0.002

† Microkjeldahl. ‡ Espectrofotometría de absorción atómica. § Método de Olsen.

Cuadro 5. Concentración de nutrimentos en tejido vegetal del triticale con base en los niveles de trigo.

Tratamiento	Mesas de San Martín									
	N†	‡P	Ca§	Mg§	B§	Zn§	Cu§	Fe§	Mo§	
Ca,P ₂ O ₅	ppm									
(0,0)	5.30	0.1192d	188	27d	66e	17.5o	2.82b	55.55	46.87e	
(0,40)	4.15	0.1233d	183	38.3d	33e	17.7o	4.31b	73.09	46.87e	
(0,80)	4.60	0.1333d	194	37.6d	77.6e	37.6o	5.53o	96.51	15.62e	
(40,0)	3.88	0.1343d	172	403.4d	90.1e	20.5o	5.99o	64.32	23.43e	
(40,40)	4.85	0.1163d	177	23.9d	55.3e	20.6o	5.23o	58.47	46.87e	
(40,80)	3.62	0.1307d	177	22.8d	122.16e	23.5o	9.13o	117	31.25e	

Tratamiento	Cuesta del Carmen									
	N†	‡P	Ca§	Mg§	B§	Zn§	Cu§	Fe§	Mo§	
(0,0)	5.83	0.1309d	75	19.7d	33e	19.8o	3.78b	57.01	62.5e	
(0,40)	2.70	0.1329d	83	22.2d	33e	15o	3.22b	52.63	78.12e	
(0,80)	4.19	0.2115d	58	13.9d	32.5e	14.4b	3.55b	66.08	62.5e	
(40,0)	5.87	0.1544d	66.5	19.3d	33e	17.4o	1.82b	43.85	70.31e	
(40,40)	3.73	0.1960d	58	15.9d	31.5e	13.7b	3.32b	48.24	54.68e	
(40,80)	4.84	0.1544d	91.5	24.6d	33e	18.2o	1.67b	21.85	70.31e	

† Microkjeldahl. ‡ Vanadato-molibdato en espectrofotometría. § Espectrofotometría de absorción atómica.
d=deficiente, b=bajo, o=óptimo, e=excesivo.

Con respecto a los micronutrientes, el boro y el molibdeno son excesivos (sin llegar a la toxicidad) para ambas comunidades, los requerimientos del primero aumentan al elevarse el pH, debido a la relación Ca/B en la nutrición vegetal; en cambio el molibdeno es un elemento esencial requerido por las plantas en muy pequeñas dosis siendo absorbido en forma de molibdato y resulta esencial en la reducción de los nitratos y en la fijación del nitrógeno atmosférico por *rhizobium*. Los fosfatos aumentan la disponibilidad del molibdeno, aunque en ocasiones la fertilización fosfatada acentúa la deficiencia de este elemento en la planta por promover su desarrollo y elevar los requerimientos de este nutrimento.

Los tratamientos obtenidos a partir de la combinación de los fertilizantes fosfatados y cálcicos que fueron empleados en el estudio, no afectan significativamente ($\alpha=0.05$) la concentración de los micronutrientes y macronutrientes determinados del tejido vegetal del cultivo para las comunidades de CDC y MSM. Sin embargo, la comparación de las medias (Cuadro 6) para cada zona de estudio presenta diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) en la mayoría de los nutrimentos determinados, excepto nitrógeno y zinc.

El fósforo en tejido vegetal presenta concentraciones significativamente más altas en CDC, aunque el nivel que muestran las plantas es deficiente para ambas comunidades, esta deficiencia se relaciona con la concentración del fósforo disponible en el suelo que también es baja; sin embargo, el triticale tiene la

capacidad de absorber eficazmente el fósforo presente y el adicionado en el suelo, lo que le permite obtener rendimientos aceptables en ambas zonas. La adición progresiva de fertilizantes fosfatados al suelo aumenta su reserva en él sin saturar su capacidad de fijación del fósforo y pasa a formas cada vez más estables que lo hacen menos aprovechable. Este elemento mejora la precocidad de los cereales y favorece el desarrollo radical, y tiene un papel esencial en el desarrollo de la espiga y el grano.

Respecto a nitrógeno, en las dos zonas de estudio el cultivo no presenta diferencias significativas y se encuentra en estado deficiente, sin embargo, no se observaron síntomas de carencia, (como ya se indicó, por su mayor eficiencia en uso), del mismo como la senescencia temprana de las hojas basales. La absorción de los elementos minerales se hace más intensa a partir del ahijamiento y a lo largo del encañado, hasta la aparición de la espiga; y por lo general el nitrógeno y el potasio son absorbidos más intensa y precozmente que el fósforo.

El magnesio, aunque se encuentra deficiente en ambas comunidades, se presenta en concentraciones significativamente más altas en MSM, la deficiencia de este elemento puede ocurrir cuando la tasa de absorción del magnesio es disminuida por otros cationes presentes en el suelo, tales como el potasio, el amonio, el calcio y el manganeso, así también como por iones hidronio que se encuentran presentes con valores bajos de pH.

Cuadro 6. Promedio total de las medias de cada uno de los nutrientes determinados en tejido vegetal para cada zona de estudio.

Comunidad	N	P	Ca	Mg	B	Zn	Cu	Fe	Mo
	----- % ----- ppm -----								
CDC	4.52a	.163a	72b	19.3b	32.66a	16.4a	2.9b	48.27b	66.4b
MSM	4.52a	.126b	181.8a	32.1a	74.02b	22.9a	5.5a	77.5a	35.15a

Nota: Letras diferentes son estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) entre comunidades por cada nutriente.
 CDC= Cuesta del Carmen. MSM= Mesas de San Martín.

El zinc es óptimo en ambas comunidades; mientras que el cobre se encuentra en concentraciones bajas para la comunidad de CDC y de bajo a óptimo para la comunidad de MSM por lo que no se considera un problema. Generalmente el zinc aprovechable aumenta al disminuir el pH y forma compuestos insolubles con fosfatos y carbonatos por lo que la fertilización elevada y continua con superfosfatos ha conducido a la deficiencia de zinc y de cobre.

No fue posible determinar el hierro por comparación de tablas, sin embargo, en campo, no se observaron síntomas de deficiencia o toxicidad. La forma aprovechable del hierro es la ferrosa hidrosoluble e intercambiable, sin embargo, la mayor parte del hierro en los suelos ácidos se encuentra en forma de sesquióxidos hidratados.

Rendimiento

En ambas comunidades el triticales alcanzó una altura promedio de 1.5 a 1.7 m sin presentar problemas de acame, lo que sugiere que la concentración de nitrógeno fue adecuada y se evitó este problema. Sin embargo, durante el desarrollo del grano, parte del cultivo se infestó por el hongo *Fusarium* spp. (llamado carbón). Zillinsky, citado por Solís (1990), reporta que este hongo se presenta en trigo y en centeno produciendo grandes pérdidas en la

producción; el porcentaje de grano afectado estimado para el cultivo osciló entre 20 y 35 %, por lo que las pérdidas en el rendimiento, aunque considerables, no son definitivas.

Efecto del calcio. Los superfosfatos simple y triple contienen 19.6 y 14.3 % de este elemento, respectivamente, por lo que su uso en la corrección de deficiencias de fósforo puede colateralmente ayudar a corregir posibles deficiencias de calcio.

El efecto de la aplicación de calcio en el suelo provoca una respuesta diferencial entre la comunidad de CDC y MSM (Figura 1). Esto es, en la primera comunidad con adición de calcio el rendimiento obtenido (1448 kg ha^{-1}) no es mayor que su testigo ($1616.8 \text{ kg ha}^{-1}$), resultado diferente a lo esperado, mientras que en la segunda comunidad se presentó un aumento significativo de 23.5 % (2125 kg ha^{-1}) respecto a su testigo (1719 kg ha^{-1}).

La falta de respuesta en rendimiento en CDC se atribuye en parte a una mayor humedad del suelo. Cuando el superfosfato triple se hidrata, deja disponible al ion fosfato mismo que en solución se fija al aluminio y fierro una vez que se agrega al suelo, de manera que disminuye la cantidad de fósforo disponible para las plantas. También influyó la presencia del hongo *Fusarium* spp. en esta comunidad de mayor precipitación (Cuadro 1). A pesar de la diferencia en los rendimientos promedio obtenidos

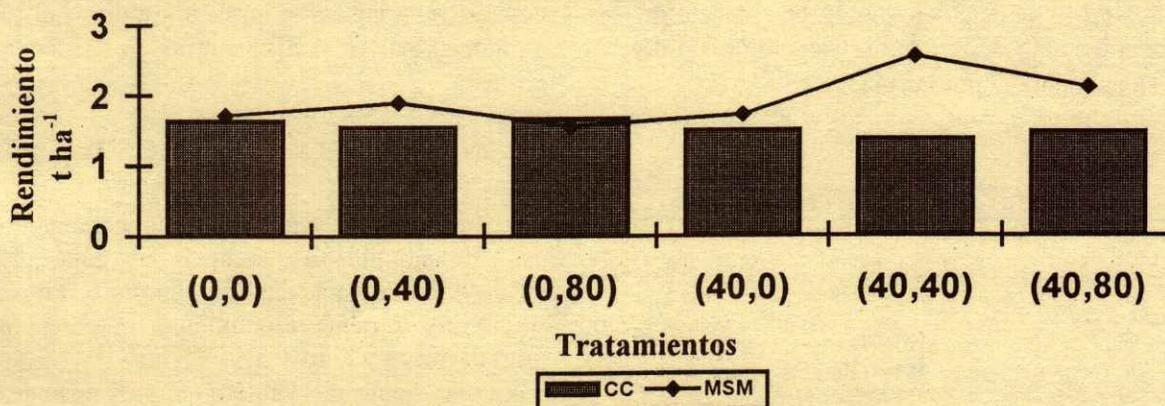


Figura 1. Efecto de los tratamientos en el rendimiento en grano del triticales.

entre una y otra comunidad (diferencia de hasta 500 kg), no se obtuvieron diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre los dos sitios.

No obstante, se considera que en MSM la aplicación de 40 kg ha⁻¹ de calcio favorece la concentración de este elemento asimilable en la solución del suelo, facilitando así la asimilación de fósforo por las plantas de triticale y se eleva con ello el rendimiento del cultivo.

Efecto del fósforo. El efecto del fósforo es diferente para las dos comunidades, ya que el mayor rendimiento se obtuvo en MSM (2219 kg ha⁻¹) con la dosis 40 kg ha⁻¹, pero la adición de una dosis mayor de fósforo (80 kg ha⁻¹) produjo un probable desbalance nutrimental en las plantas que no se refleja en aumento sino en una ligera disminución de rendimiento (1832 kg ha⁻¹) (Cuadro 7).

En CDC, no se tienen diferencias significativas ($\alpha=0.05$) de rendimiento del cultivo de triticale para dosis de fósforo aplicado. Es decir, la adición de este elemento no presenta efecto sobre el rendimiento del cultivo, lo que se atribuye a la capacidad del suelo para fijar el fósforo agregado.

Efecto de los tratamientos (Ca-P). El rendimiento en CDC con los diferentes tratamientos fue similar al rendimiento del testigo, no se presentan diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0.05$); sin embargo, el rendimiento más alto (1672 kg ha⁻¹) se obtiene con la fórmula (0,80), y con la fórmula (40,40) se obtiene el menor rendimiento (1366.9 kg ha⁻¹), contrario a lo que sucede en MSM (Cuadro 8). Para la comunidad CDC, el calcio y el fósforo adicionado al suelo con las fuentes ensayadas no se aprecia beneficio directo al cultivo. En MSM con el tratamiento (40,40) se tiene el máximo rendimiento (2543.43 kg ha⁻¹), el cual es 31.6 % mayor en comparación al testigo (1714 kg ha⁻¹), esto indica que la aplicación de 40 kg de calcio disminuye el efecto del pH ligeramente ácido y favorece la disponibilidad del fósforo y su asimilación por las plantas.

Cuadro 7. Rendimiento por dosis de fertilizante (kg ha⁻¹).

	CDC	MSM
Dosis de calcio (kg ha ⁻¹)		
0	1616.80a	1719.28a
40	1448.20a	2125.57a
Dosis de fósforo (kg ha ⁻¹)		
0	1569.80a	1716.04a
40	1454.81a	2218.91a
80	1572.88a	1832.34a

Nota: Letras diferentes son significativamente diferentes ($\alpha=0.05$).
CDC= Cuesta del Carmen. MSM= Mesas de San Martín.

Cuadro 8. Rendimiento promedio por tratamientos de fertilizante.

Tratamiento (Ca,P ₂ O ₅)	CDC - - - Rendimiento (kg ha ⁻¹) - - -	MSM
(0,0)	1635 A	1714 A
(0,40)	1542.7 A	1894.38 A
(0,80)	1672.7 A	1549.48 A
(40,0)	1504.6 A	1718.08 A
(40,40)	1366.92 A	2543.45 A
(40,80)	1473.07 A	2115.2 A
Promedio total	1532	1922

Nota: Letras diferentes son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$).
CDC= Cuesta del Carmen. MSM= Mesas de San Martín.

En las localidades estudiadas se obtuvo un rendimiento promedio de 1532 kg ha⁻¹ en CDC y de 1922 kg ha⁻¹ en MSM, que al ser comparados con lo reportado por Varughese y Saari (1986) supera el rendimiento de los trigos harineros y duros que presentan de 1000 a 1400 kg ha⁻¹, y con el rendimiento promedio obtenido de los tratamientos (40,40) y (40,80) de CDC quedan ligeramente por abajo del rendimiento promedio de los cinco mejores triticales para suelos ácidos que van de 2000 a 2200 kg ha⁻¹.

El triticale (*X. Triticosecale* sp. W.) utilizado en este estudio es considerado un triticale completo hexaploide que mantiene dos cromosomas de centeno y cuatro de trigo, mientras que el sustituido presenta uno de centeno y cinco de trigo (López, 1991); esta característica influye en el rendimiento del triticale, ya que los completos presentan una mayor adaptación a suelos ácidos que se refleja en mejores rendimientos. Varughese y Saari (1986) reportan que el rendimiento medio de las cinco mejores líneas de triticale aumenta en 100 % al cabo de cinco años. El rendimiento que reportan del primer año es similar al obtenido en este trabajo, se propone que el triticale mejorará su adaptación en el transcurso del tiempo y así aumentará su rendimiento bajo las condiciones locales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es importante señalar que la concentración de fósforo disponible en el suelo es baja, pero esta especie tiene la capacidad de asimilarlo eficazmente, con lo que obtiene rendimientos mayores que los trigos harineros y duros.

En las zonas de estudio no hay respuesta a la aplicación de dosis pequeñas de cal previas al barbecho, pues los valores de pH del suelo aunque

indican de fuerte a mediana acidez, las concentraciones de aluminio y manganeso no llegan a ser tóxicas para el triticale.

En CDC no hay respuesta a la fertilización fosfatada, mientras que en MSM se podría recomendar aplicar sólo 40 kg ha⁻¹ de calcio y 40 kg ha⁻¹ de fósforo con el que se obtienen los rendimientos más altos (2528.5 kg ha⁻¹) que al compararse con el testigo (1714 kg ha⁻¹) son mayores en 31.6 %.

La adaptabilidad del triticale en Andisoles parece ser satisfactoria como se demuestra en los rendimientos obtenidos con el testigo para las dos comunidades estudiadas.

Esta variedad de triticale se recomienda para las zonas aquí estudiadas, sin embargo, es necesario realizar estudios con otras variedades que se desarrollen en suelos ácidos para seleccionar la mejor.

Se recomienda el uso de otros fertilizantes y abonos que ofrezcan mayores beneficios que permitan elevar el rendimiento y elegir aquella o aquellas de bajo costo económico, ya que los aquí utilizados son de los que se puede disponer en la zona.

Es recomendable también dar mayor difusión a este tipo de cereal el cual es una alternativa alimenticia para zonas con suelos ácidos donde se obtienen rendimientos bajos de otros cereales de consumo tanto humano como ganadero.

LITERATURA CITADA

- Aguilar S., A. 1987. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Publicación especial No. 1.
- Bohn, H.L., B.L. McNeal y G.A. O'Connor, 1993. Química de Suelo, Ed. Limusa, México.
- Buol, S.W., F.D. Hole y R.J. McCracken. 1991. Génesis y clasificación de suelos. Ed. Trillas, México.
- Bushuk, W. 1980. Triticale: Production, chemistry and technology. *In: Advances in cereal science and technology*. Vol. 3. Ed. Paramo, Manitoba, USA.
- Duchaufour, P. 1984. Edafología. Ed. Masson, Barcelona, España.
- Fixen, P. 1994. Dinámica suelo-cultivo del fósforo y manejo de los fertilizantes fosfatados (parte II). *Informaciones Agronómicas*. Instituto de la Potasa y el Fósforo. Quito, Ecuador (17): 9-12.
- García, G. A. y G. Hernández. 1994. Levantamiento nutricional del cultivo de maíz en Andosoles del Mpio. Villa de Allende, Edo. de Méx., Tesis profesional, Facultad de Estudios Superiores-Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Gros, A. 1981. Abonos, Guía práctica de la fertilización. 7a. ed. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- Hettel, G.P. 1989. Wheat production. pp: 7-14. *In: Advances in South Americas Colossus, Today*, Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y Trigo, México.
- Laird, R. 1984. 25 Años de investigación agrícola de la Sierra Tarasca en el Estado de Michoacán. En Trinidad, S.A. y Miranda, J.O. Los suelos de Ando y sus implicaciones en el desarrollo agrícola de la Sierra Tarasca, 2da. edición, Colegio de Postgraduados, México.
- León, A. R. 1991. Nueva Edafología, Ed. Fontamara, 2da. Edición, México pags 177-223.
- López, L. 1991. Cereales. Vol. 1 Ed. Mundi-Prensa, Bilbao, Madrid.
- Loué, A. 1987. Wheat and barley. *In: Plant analysis. As a guide to the nutrient requirements of temperate and tropical crops*. Martin-Prevel, J. Gagnard y P. Gautier (eds). Lavoisier Publishing, Paris, Francia.
- Medrano, B. A. 1993. Respuesta del triticale (*X Triticosecale Wittmack*) a diferentes dosis de fertilización fosfatada y abonamiento, bajo distintos tratamientos de encalado en un andosol. Tesis profesional, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Zaragoza, UNAM. México.
- Peña B.R. y C. Amaya. 1980 Triticale, un nuevo cereal en desarrollo, Revista Pagnafa.
- SEDAGRO, 1995. Estimación de rendimientos de producción durante el ciclo 1994-1995. Edo. de Méx.
- Solís M. 1990. Distribución de biomasa, estado de nutrimentos y producción primaria en cinco cultivares de triticale (*Triticosecale Wittmack*) Tesis profesional, Chapingo México.
- Tamhane, R. V. 1978. Suelos, su química y fertilidad en zonas tropicales. Ed. Diana, México
- Varughese T. B. y E. Saari. 1986 Triticale. CIMMYT, México, D. F.

HARINA DE HUESO ADICIONADA A SUELOS DE LA ZONA CAFETALERA DE LOS ALTOS DE CHIAPAS, MEXICO

Bone Meal Applied to Soils of the Coffee Plantation Area in Los Altos de Chiapas, Mexico

Luciano Pool Novelo¹, Noé S. León Martínez y Víctor Pérezgrovas Garza

RESUMEN

El área cafetalera de los Altos de Chiapas se ha desarrollado sobre un paisaje cárstico complejo, sepultado con cenizas volcánicas, en suelos ácidos y clima húmedo. Los productores aplican residuos orgánicos a los cafetales. Estos residuos orgánicos son deficientes en fósforo, por lo que es necesario aportar cantidades adicionales de este elemento. Se produce café orgánico para exportación, y en el manejo del cafetal, está restringido el uso de fertilizantes minerales generados industrialmente y sí es aceptada la aplicación de harina de hueso para adicionar fósforo. El conocimiento existente sobre la mineralización de la harina de hueso es escaso y también es escaso el conocimiento acerca de cuál es la mejor estrategia para adicionarla al sistema. Con base en lo anterior, se realizó un ensayo en invernadero. El diseño de tratamientos fue un factorial 2³. Se valoró la adición de harina de hueso, composta mejorada con harina de hueso y fertilizante mineral fosfatado, en la fertilidad de tres suelos de la zona cafetalera de los Altos de Chiapas. Estos suelos se incubaron durante ocho meses y se valoraron los cambios en el P Olsen, y en la actividad y biomasa microbianas. El P Olsen del suelo se incrementó significativamente por la adición del fertilizante químico fosfatado y por la composta mejorada con harina de hueso. La actividad microbiana se incrementó significativamente por la aplicación de la harina de hueso y la biomasa microbiana por la aplicación del fertilizante químico fosfatado. La actividad microbiana fue diferente entre las muestras de suelos valoradas.

Palabras clave: *Café orgánico, agricultura en laderas, actividad microbiana, biomasa microbiana, incubación de suelos.*

¹ Apartado Postal 63, 29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.

Aceptado: Marzo de 1998.

SUMMARY

The coffee plantations area at Los Altos de Chiapas has developed on a complex karstic landscape buried by volcanic ash, on acid soils and humid climate. Coffee growers apply organic wastes to the coffee trees. These organic wastes are deficient in phosphorus, thus it is necessary to apply this element. Organic coffee is produced for export and the use of mineral fertilizers produced by the industry is restricted, however, to apply bone meal as phosphorus source is allowed. There does not exist sufficient knowledge on bone meal mineralization and on the strategy how to apply it to the system. Therefore, a greenhouse test was conducted. The treatment design was a factorial 2³. The application of bone meal, compost enriched with bone meal, and mineral phosphate fertilizer was evaluated in three coffee plantation soils of Los Altos de Chiapas. These soils were incubated during eight months and the changes in P Olsen, microbial activity, and microbial biomass were evaluated. P Olsen of the soil increased significantly by the addition of mineral phosphate fertilizer and by the compost enriched with bone meal. The microbial activities increased significantly by the application of bone meal and microbial biomass by the addition of phosphate mineral fertilizer. The microbial activity was different between the valued soil samples.

Index words: *Organic coffee, hillside agriculture, microbial activity, microbial biomass, soil incubation.*

INTRODUCCION

La Unión de Ejidos y Comunidades de Cafeticultores del Beneficio Majomut (Unión Majomut) es una organización que actualmente está constituida por 1053 socios pertenecientes a 17 comunidades de los municipios de Chenalhó y San Juan Cancuc. Todos los socios son pequeños productores indígenas de las etnias Tzeltal y Tzotzil.

Los productores tienen en promedio tres hectáreas de tierra, de las cuales cultivan 1.2 hectáreas con café.

La organización fue fundada en 1983 y su objetivo principal es brindar servicios de asistencia técnica para la producción, transformación industrial básica y comercialización de café para los socios (Pérezgrovas *et al.*, 1997). El grupo de productores orgánicos está constituido por 323 socios y está trabajando desde 1992. Desde 1995 comercializa su producto como café orgánico certificado por Naturland-Verband de Alemania. Los productores están interesados en realizar todas aquellas labores de cultivo que les permitan aumentar la productividad de sus plantaciones para incrementar el nivel de ingresos de la familia.

En el manejo de suelos, los cafecultores realizan prácticas de reciclamiento de residuos orgánicos asociadas con otras prácticas. Los suelos en general son crónicamente deficientes de nitrógeno, y también en general, los residuos orgánicos reciclados al cafetal son deficientes en fósforo, por lo que es necesario aportar cantidades adicionales de este elemento. La producción de café orgánico es para exportación; en las normas de calidad está restringido, en el manejo del cafetal, el uso de fertilizantes minerales generados por medio de síntesis químico-industrial y sí es aceptada la aplicación de harina de hueso para suplir cantidades adicionales de fósforo. En el área de trabajo se aplican entre 1.5 y 2.0 kg de abono orgánico por planta de cafeto por año. La aplicación de harina de hueso es una práctica que se está introduciendo en el manejo de los cafetales orgánicos.

El conocimiento existente sobre la mineralización de la harina de hueso es escaso y también es escaso el conocimiento acerca de cuál es la mejor estrategia para adiccionarla al sistema de producción de café. Con base en lo anterior, se propone por medio de un ensayo de incubación, valorar el proceso de mineralización de la harina de hueso y de la composta mejorada, así como el proceso de liberación de fósforo de la harina de hueso cuando se aplica sola o mezclada con composta mejorada y/o superfosfato simple de calcio en suelos cultivados con café.

MATERIALES Y METODOS

El Alto Bloque Central de Chiapas (Altos de Chiapas) es una estructura caliza emergida del fondo del mar en el terciario superior, que evolucionó a un

paisaje cárstico en ambiente tropical; después, por tectonismo se elevó sobre el nivel del mar y posteriormente fue sepultado por materiales vulcano-clásticos del terciario superior (INEGI, 1985; Mulleried, 1982).

El área de agricultura cafetalera de los Altos de Chiapas se ha desarrollado sobre estos suelos ácidos derivados de cenizas volcánicas, en un clima semicálido (de transición) entre 500 y 1800 msnm, con precipitaciones entre 2000 y 2500 mm y temperatura media anual entre 18 y 22 °C (García, 1988). Se seleccionaron tres parcelas de productores de la Unión Majomut ubicadas en un gradiente altitudinal entre 1000 y 1600 m para valorar el efecto de los tratamientos aplicados en el rango ambiental de producción de café en la unión. Estos sitios son Pechikil (1000 msnm), Polhó (1300 msnm) y Takiukum (1600 msnm). En cada una de estas parcelas se tomaron muestras compuestas de suelos de la capa de 0 a 20 cm, entre las matas de café, por medio de un muestreo sistemático. Estas muestras se homogeneizaron y se les hicieron análisis físicos, químicos y biológicos (Cuadro 1). El suelo de cada uno de los tres sitios cafetaleros fue respectivamente cada una de las repeticiones del diseño experimental, esto se hizo así para valorar el efecto de los insumos aplicados en el gradiente ambiental del área cafetalera de la Unión Majomut.

El diseño de tratamientos fue un factorial 2^3 con tres factores (composta mejorada, harina de hueso y fertilizante químico fosfatado) a dos niveles cada uno. El diseño experimental fue parcelas divididas en bloques completos al azar (tres repeticiones). Los análisis de varianza de los datos obtenidos en cada unidad experimental del diseño factorial 2^3 (en los cuatro momentos de muestreo), se hicieron por medio del SAS para microcomputadoras, en un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar, tomando como parcela grande a cada uno de los momentos de muestreo.

La composta mejorada fue elaborada y enriquecida con aplicación de harina de hueso. El hueso crudo contiene 22 % de P_2O_5 (Teuscher y Adler, 1979). La harina de hueso contiene 24 % de P_2O_5 (según la casa expendedora del producto) y de 20 a 25 % de P_2O_5 según Teuscher y Adler (1979); el superfosfato simple de calcio tiene 21 % de P_2O_5 (Cuadro 2).

El proceso de incubación en invernadero se inició el 24 de septiembre de 1996, momento en que se

Cuadro 1. Características de los suelos de tres parcelas con producción de café orgánico en Los Altos de Chiapas, México.

Características	Pechikil	Polhó	Takiukum
Altitud (m)	1000	1300	1600
pH (CaCl ₂)	5.1	5.8	5.3
Materia orgánica (%)	7.0	6.6	10.2
P Olsen (ppm)	1.8	3.2	2.3
Ca intercambiable (ppm)	2610	5048	3333
Mg intercambiable (ppm)	671	1228	515
K intercambiable (ppm)	258	348	348
Fe extractable (ppm)	178	118	204
Actividad microbiana (mg C 10 ⁻¹ g de suelo)	0.41	0.76	1.64
Biomasa microbiana (mg C 10 ⁻¹ g de suelo)	7.97	6.01	5.44
Textura	F. arcilloso	Franco	Franco
• Arena (%)	32.2	38.2	46.2
• Limo (%)	30.0	38.0	32.0
• Arcilla (%)	37.8	23.8	21.8
Constantes de humedad			
• CC (%)	35.6	39.3	46.7
• PMP (%)	17.3	21.2	28.3
• Humedad aprovechable (%)	18.3	18.1	18.4
Color en húmedo	gris muy oscuro	pardo rojizo oscuro	pardo rojizo oscuro

aplicaron los tratamientos, se usaron 24 recipientes de plástico con tapas de plástico también y en cada uno de ellos se pusieron 2 kilogramos de suelo seco, a los que posteriormente se les aplicaron los tratamientos mencionados (Cuadro 3). A cada tratamiento, con base en la concentración de los insumos utilizados, se le aplicó un equivalente de 1000 ppm de fósforo, luego se homogeneizó y se humedeció al 50 % de humedad aprovechable aproximadamente. La incubación se realizó a temperatura ambiente en un invernadero de cristal y la humedad de las muestras de suelos se controló manteniendo tapados los recipientes y revisándolas cada tercer día.

El primer muestreo se realizó el 26 de septiembre de 1996, el segundo el 13 de octubre de 1996; el tercer y cuarto se hicieron el 17 de febrero y 13 de mayo de 1997, respectivamente. En cada uno de estos muestreos, en cada tratamiento y repetición se

estimaron el P Olsen, y la actividad y biomasa microbianas. Las temperaturas promedio mensuales en los momentos de muestreo fueron 15.3 °C, 14.4 °C, 13.0 °C y 15.6 °C para septiembre, octubre, febrero y mayo, respectivamente. En cada momento de muestreo, se homogeneizó la muestra de suelo del tratamiento, luego, para el proceso de determinación de la actividad y biomasa microbianas, se valoró la humedad del suelo para tomar la cantidad exacta con base en el peso seco del suelo; para hacer los análisis de fósforo Olsen la muestra de suelo se secó al aire y a la sombra y se tamizó en tamiz malla 20.

Los suelos y la composta mejorada se analizaron en el laboratorio de suelos de Chapingo, el pH se determinó con CaCl₂ en relación 1:2; la materia orgánica por el método de Walkley y Black; el nitrógeno total con el Kjeltex -auto analyzer 1030; el fósforo por el método de Olsen; el potasio por

Cuadro 2. Características químicas de los insumos utilizados en los tratamientos de la incubación con suelos de parcelas cafetaleras.

Característica química	Composta mejorada	Harina de hueso reacción básica	Superfosfato simple de calcio reacción básica
PH	6.1	-	-
Materia orgánica (%)	45.6	-	-
Nitrógeno total (%)	5.4	4.0	-
Calcio (%)	3.9	22.5	17.9
Magnesio (%)	1.2	0.6	0.3
Potasio (% K)	0.28	-	-
P (% P ₂ O ₅)	2.38	24.0	21.0
Azufre (%)	-	0.2	12.0

Cuadro 3. Resultados de análisis de P Olsen, y biomasa y actividad microbianas en los muestreos del proceso de incubación.

T	Tratamientos			Muestreo 1			Muestreo 2			Muestreo 3			Muestreo 4			
	R	C	H	F	P Olsen	BM	AM									
					(ppm)	(mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)	(mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)	(ppm)	(mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)	(mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)	(ppm)	(mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)	(mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)	(ppm)	(mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)	(mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)
1	1	0	0	0	46.8	4.3	0.7	0.4	5.9	0.2	1.8	1.0	0.6	0.1	4.8	0.2
1	2	0	0	0	69.0	4.0	1.1	2.1	4.2	1.0	2.2	3.2	0.8	1.6	5.0	0.9
1	3	0	0	0	98.7	4.7	1.2	1.9	6.9	0.6	1.3	3.5	1.2	0.4	6.9	0.9
2	1	0	0	1	53.8	5.1	0.3	40.7	5.1	0.2	40.2	1.5	1.1	34.2	3.6	0.6
2	2	0	0	1	58.9	4.5	0.7	36.8	6.1	0.4	34.6	2.1	0.8	32.5	3.2	1.6
2	3	0	0	1	76.2	5.7	1.1	27.3	6.4	1.1	25.8	2.1	1.3	20.1	2.3	1.5
3	1	0	1	0	57.0	4.3	1.0	22.6	2.4	2.2	17.1	1.4	0.6	14.9	2.9	1.1
3	2	0	1	0	39.3	6.0	1.0	9.7	5.8	0.6	11.9	3.3	0.8	9.3	4.8	0.7
3	3	0	1	0	60.4	6.6	1.7	12.0	8.3	1.2	12.2	3.3	1.4	9.2	3.9	1.7
4	1	0	1	1	91.7	3.2	1.7	56.9	5.9	0.5	60.0	2.2	0.8	50.1	3.7	1.4
4	2	0	1	1	72.5	3.5	1.4	47.8	5.3	0.9	45.3	1.7	1.1	38.7	3.4	0.9
4	3	0	1	1	75.5	5.5	1.9	47.2	5.9	1.6	42.8	2.1	1.7	35.2	2.4	2.0
5	1	1	0	0	54.6	5.0	0.4	6.2	5.9	0.5	8.6	3.3	0.9	5.5	6.0	0.7
5	2	1	0	0	125.7	4.4	1.0	11.0	6.3	0.9	6.2	3.2	1.1	4.7	5.6	1.4
5	3	1	0	0	133.6	4.1	1.3	9.9	6.8	1.5	6.5	3.7	1.2	44.1	6.0	1.7
6	1	1	0	1	126.5	3.7	0.7	56.2	5.8	0.6	55.3	2.2	0.8	49.3	3.7	0.9
6	2	1	0	1	106.2	4.2	0.7	45.2	5.1	0.8	41.1	2.1	0.6	36.2	3.7	1.0
6	3	1	0	1	86.3	6.6	1.3	38.8	5.1	1.6	37.1	2.2	1.2	34.3	1.8	2.3
7	1	1	1	0	86.8	2.9	1.2	16.8	2.4	3.5	20.4	3.5	0.9	17.7	5.0	1.0
7	2	1	1	0	132.8	4.2	1.7	11.3	5.9	1.0	13.1	2.9	1.3	8.8	6.3	0.7
7	3	1	1	0	92.8	10.8	1.4	12.4	7.4	1.5	13.4	4.2	1.3	10.1	6.3	1.5
8	1	1	1	1	128.9	4.9	1.2	70.5	6.8	0.8	70.6	1.8	1.0	58.9	3.4	0.7
8	2	1	1	1	90.9	5.0	1.4	47.8	5.6	1.0	47.4	2.8	0.9	37.7	2.4	1.4
8	3	1	1	1	112.3	7.5	1.7	48.5	6.6	1.8	45.0	0.6	2.6	36.6	3.4	1.9

T = Tratamiento, R = Repetición, C = Composta mejorada, H = Harina de hueso, F = Fertilizante químico (0-21-0), BM = Biomasa microbiana, AM = Actividad microbiana.

espectrometría de emisión de flama y el calcio y magnesio por espectrometría de absorción atómica. El hierro extractable con DTPA, relación 1:4, determinado por espectrometría de absorción atómica; el color en húmedo con la tabla de colores de Munsell; la textura por el método de Bouyoucos; las constantes de humedad (CC y PMP) con la olla y la membrana de presión. Los análisis del proceso de incubación se realizaron en los laboratorios de ECOSUR (P Olsen y la actividad y biomasa microbianas), estos últimos con el procedimiento de Jenkinson y Powelson (1976a,b).

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de análisis de P Olsen, biomasa y actividad microbianas en los cuatro momentos de muestreo del proceso de incubación. Con estos resultados se realizaron análisis de varianza. Los productos de estos análisis de varianza se presentan en el Cuadro 4.

En el análisis de varianza se reportan diferencias altamente significativas para P Olsen entre momentos de muestreo, y por efectos de las aplicaciones de la composta mejorada y del fertilizante químico fosfatado, también por las interacciones entre los momentos de muestreo y composta mejorada y de los momentos de muestreo con el fertilizante químico

fosfatado. Se reportan diferencias significativas por la aplicación de la harina de hueso.

En estos resultados sobresalen los efectos de la aplicación del fertilizante químico fosfatado, aunque también con la adición de la composta mejorada se reportan efectos altamente significativos en el P Olsen del suelo (Cuadro 4). Las diferencias entre medias por efecto de la aplicación de estos tres insumos se presentan en el Cuadro 5. La dinámica del P Olsen en el tiempo también es altamente significativa, con una fuerte disminución después del primer momento de muestreo. El P Olsen decrece con el tiempo tanto en el tratamiento con adición de fertilizante químico fosfatado como en el tratamiento con adición de composta mejorada (Figuras 1 y 2).

Los resultados de análisis de la actividad microbiana reportan diferencias altamente significativas entre muestras de suelos (REP) y por efecto de la aplicación de la harina de hueso y diferencias significativas por efecto de la aplicación de la composta mejorada (Cuadro 4). Las diferencias altamente significativas entre las muestras de suelos provenientes de diferentes parcelas sugieren que la actividad microbiana es diferente entre ellas y su comportamiento puede estar definido por las características del suelo y por su posición altitudinal. Esta posición altitudinal determina el clima en que se ubica cada parcela y también la dinámica de la

Cuadro 4. Análisis de varianza en parcelas divididas aplicado al P Olsen y a la biomasa y actividad microbianas del suelo del diseño factorial 2³ en cuatro momentos de muestreo del proceso de incubación.

Fuente	GL	Características del suelo		
		P Olsen (Pr >F)	Actividad microbiana (Pr >F)	Biomasa microbiana (Pr >F)
REP	2	0.4912	0.0037**	0.0859
M	3	0.0001**	0.4091ns	0.0024**
M*REP	6	0.3270	0.5154	0.0643
C	1	0.0001**	0.0150*	0.0908ns
H	1	0.0154*	0.0004**	0.8724ns
C*H	1	0.3374	0.7414ns	0.3552ns
F	1	0.0001**	0.9249ns	0.0007**
C*F	1	0.9306ns	0.3720ns	0.3645ns
H*F	1	0.1484ns	1.0000ns	0.8865ns
C*H*F	1	0.6004ns	0.8136ns	0.6817ns
M*C	3	0.0001**	0.2460ns	0.9167ns
M*H	3	0.4687ns	0.1176ns	0.4228ns
M*C*H	3	0.8020ns	0.2435ns	0.7331ns
M*F	3	0.0009**	0.0860ns	0.0033**
M*C*F	3	0.8865ns	0.8869ns	0.5932ns
M*H*F	3	0.6403ns	0.1057ns	0.2124ns
M*C*H*F	3	0.6052ns	0.4449ns	0.3787ns

GL = Grados de libertad, C = Composta mejorada, H = Harina de hueso, F = Fertilizante químico fosfatado, M = Momentos de muestreo en la incubación, ** = Diferencias significativas al 01 %, * = Diferencias significativas al 05%, ns = Diferencias no significativas al 05%.

Cuadro 5. Valores medios de P Olsen, actividad y biomasa microbianas por efecto de la aplicación de fertilizante químico fosfatado, composta mejorada y harina de hueso, en el factorial de tratamientos 2³ en cuatro momentos de muestreo.

Característica del suelo	Fertilizante químico fosfatado		Composta mejorada		Harina de hueso		DSH
	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	
P Olsen (ppm)	28.2	55.3	34.3	49.2	38.3	45.2	5.6
Actividad microbiana (mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)	1.1	1.1	1.0	1.2	1.0	1.3	0.18
Biomasa microbiana (mg de C 10 ⁻¹ g de suelo)	4.8	3.9	4.2	4.6	4.3	4.4	0.47

DSH = Diferencia significativa honesta.

actividad microbiana. Esta actividad microbiana podría influir en el proceso de mineralización del fósforo presente tanto en la composta, como en la harina de hueso. Los valores medios de la actividad microbiana por efecto de las aplicaciones de la harina de hueso y de la composta mejorada se presentan en el Cuadro 5. El menor efecto en la actividad microbiana por la composta mejorada puede explicarse por el proceso de mineralización previo en dicha composta; por el contrario, con la aplicación de la harina de hueso, en ese momento se inicia en el suelo el proceso de mineralización.

Los resultados del análisis de la biomasa microbiana reportan diferencias altamente significativas por efecto de la aplicación de fertilizante químico fosfatado, entre diferentes momentos de muestreo y por la interacción entre el fertilizante químico fosfatado y diferentes momentos de muestreo (Cuadro 4). Los valores medios de la biomasa microbiana por efecto de la aplicación del fertilizante químico fosfatado se presentan en el Cuadro 5. La biomasa microbiana disminuyó drásticamente en el tercer momento de muestreo (febrero) debido posiblemente a las bajas temperaturas y la presencia de heladas en esta época (Figura 3).

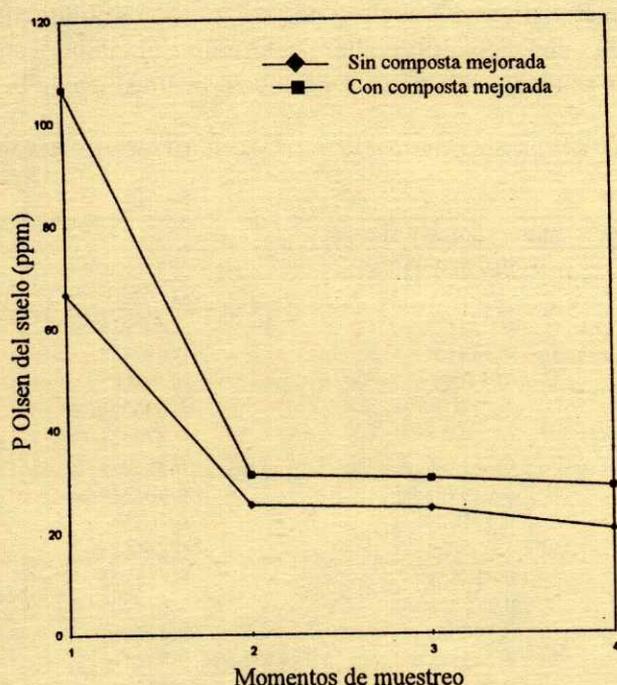


Figura 1. Valores medios de P Olsen del suelo por efecto de la interacción entre la composta mejorada y los diferentes momentos de muestreo en el proceso de incubación.

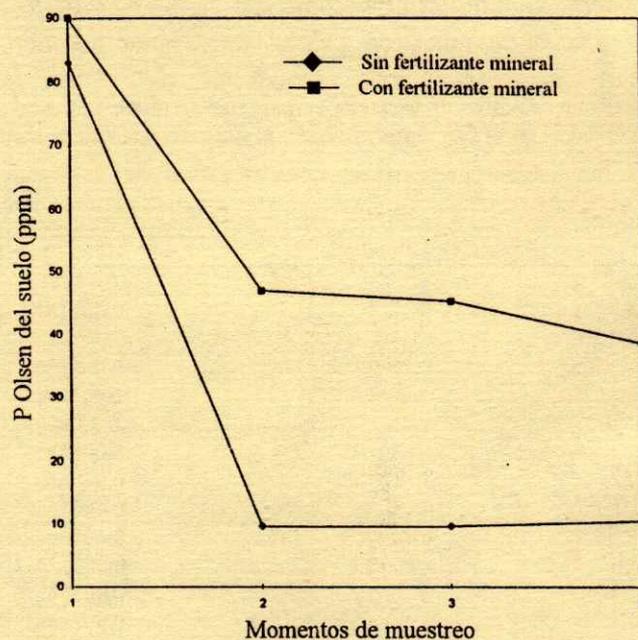


Figura 2. Valores medios de P Olsen del suelo por efecto de la interacción entre el fertilizante mineral y los diferentes momentos de muestreo en el proceso de incubación.

Los efectos encontrados en la biomasa y actividad microbiana por los tratamientos aplicados son diferentes. En la biomasa microbiana sobresalen los efectos de la aplicación del fertilizante químico fosfatado, y en la actividad microbiana sobresalen los de la aplicación de la harina de hueso y de la composta mejorada (Cuadro 4).

CONCLUSIONES

El P Olsen del suelo se incrementó significativamente con la adición del fertilizante químico fosfatado, con la composta mejorada y con la harina de hueso. Si bien sobresalen los efectos de la aplicación del fertilizante químico fosfatado, también con la adición de la composta mejorada y con la harina de hueso se incrementó significativamente el contenido de P Olsen del suelo.

La actividad microbiana se incrementó significativamente por la aplicación de la harina de hueso y de la composta mejorada; la biomasa microbiana se incrementó significativamente por la aplicación del fertilizante químico fosfatado. Estos bioindicadores del suelo responden de manera diferente a la aplicación de fósforo por diferentes fuentes. La actividad microbiana es un bioindicador más sensible que la biomasa microbiana ante la presencia de la harina de hueso y de la composta mejorada.

Las diferencias significativas de la actividad microbiana entre las muestras de suelos provenientes de parcelas ubicadas en diferentes posiciones altitudinales y climas, sugieren que la actividad microbiana es diferente en cada una de ellas. También es posible que el proceso de mineralización del fósforo de la harina de hueso pudiera ser diferente en cada una de estas parcelas. Estos datos sugieren que la adición de fósforo por medio de este fertilizante orgánico tendrá diferente eficiencia en cada una de estas condiciones ambientales.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Rockefeller, al Colegio de la Frontera Sur y a la Unión Majomut, por las facilidades y apoyos económicos, académicos, científicos, de infraestructura y logísticos para realizar la presente investigación.

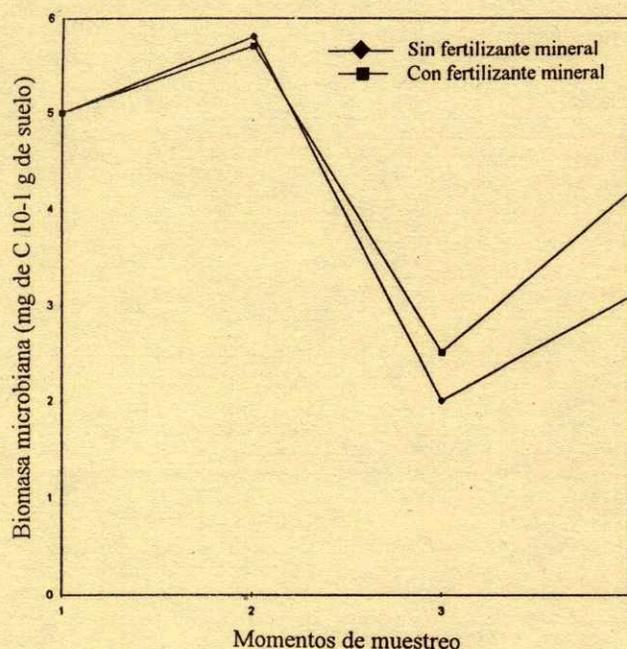


Figura 3. Valores medios de biomasa microbiana del suelo por efecto de la interacción entre el fertilizante mineral y los diferentes momentos de muestreo en el proceso de incubación.

LITERATURA CITADA

- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México.
- INEGI. 1985. Carta geológica, Tuxtla Gutiérrez (E15-11). Escala 1:250 000. Méx., D. F.
- Jenkinson, D. S. y D. S. Powlson. 1976a. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-I. Fumigation with chloroform. *Soil Biology and Biochemistry* 8: 167-177.
- Jenkinson, D. S. y D. S. Powlson. 1976b. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 8: 209-213.
- Mulleried, K.F. 1982. La geología de Chiapas. Ed. del Gobierno del Estado de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Pérezgrovas, G.V.; R. Marvey L.; W. Anzueto A.; F. Rodríguez E. Gómez H. 1997. El cultivo de café orgánico en La Unión Majomut. Red de Gestión de Recursos Naturales y Fundación Rockefeller. México. Estudios de Caso sobre Participación Campesina en Generación, Validación y Transferencia de tecnología.
- Teuscher H. y R. Adler. 1979. El suelo y su fertilidad. CECSA. Cuarta impresión. México, DF.

MODELO DE BALANCE NUTRIMENTAL PARA LA GENERACION DE RECOMENDACIONES DE FERTILIZACION PARA CULTIVOS

Nutrient Balance Model to Determine Fertilizer Recommendations for Crops

Víctor Volke Haller¹, Jorge D. Etchevers B.¹, Adán Sanjuan Ramírez², Tomás Silva Palomino²

RESUMEN

Uno de los enfoques utilizados para generar recomendaciones de fertilización para los cultivos es el de balance nutrimental, basado en que la dosis de fertilización depende de la demanda del nutrimento por el cultivo, el suministro del nutrimento por el suelo y la eficiencia de recuperación del nutrimento aplicado como fertilizante. Este enfoque requiere de menos recursos y tiempo para su implementación que otros enfoques, ventaja que lo hace atractivo de usar. En el presente trabajo se describe la aplicación de un enfoque de balance nutrimental para determinar recomendaciones de fertilización, para nitrógeno y fósforo en maíz de temporal en agrosistemas de la región de Nochixtlán, Oaxaca, y su comparación con un enfoque económico, tomado como referencia. La información usada corresponde a 82 siembras de maíz de agricultores bajo diferentes condiciones de suelo y clima. En cada siembra se determinaron: 1) la producción de grano y paja, 2) la extracción de nitrógeno y fósforo por el cultivo (grano y paja), 3) el nitrógeno total y fósforo Olsen del suelo, 4) el aporte de nitrógeno y fósforo de los residuos de cosecha y el estiércol, y 5) factores de suelo y clima, y de manejo del cultivo. Tanto para el enfoque de balance nutrimental, en sus componentes de la demanda del cultivo, del suministro del suelo y de la eficiencia de recuperación del fertilizante, como para el enfoque económico, se estimaron los correspondientes modelos matemáticos mediante análisis de regresión, para su operación. Los resultados indican que el enfoque de balance nutrimental, en la forma utilizada, dio recomendaciones de nitrógeno y fósforo para maíz de temporal similares a las dadas por el enfoque económico. Se considera aceptable el comportamiento del enfoque de balance nutrimental para generar

recomendaciones de nitrógeno y fósforo para maíz de temporal en agrosistemas de la zona de Nochixtlán, Oaxaca.

Palabras clave: Demanda nutrimental, suministro nutrimental, eficiencia de uso del fertilizante, maíz.

SUMMARY

One of the approaches to the generation of fertilizer recommendations for different crops is the nutrient balance approach. This approach is based on the fact that the fertilizer rate depends on the crop nutrient demand, the quantity of nutrient supplied by soil and the recuperation efficiency of the nutrient applied as fertilizer, and it demands less resources and time for its implementation than other approaches, advantage that makes its use attractive. The present work describes the application of a nutrient balance model to determine fertilization recommendations, for nitrogen and phosphorus on rainfed maize in the region of Nochixtlán, Oaxaca, and its comparison with an economic approach, used as comparison approach. The information used corresponds to 82 farmer plots of rainfed maize, grown under different soil and climate production conditions. In each plot were determined: 1) the yield of grain and straw, 2) the nitrogen and phosphorus extraction by the crop (grain and straw), 3) the total nitrogen and Olsen phosphorus of soil, 4) the nitrogen and phosphorus contribution of crop residues and manure, and 5) soil, climate and crop management factors. Both, for the nutrient balance approach, including its crop nutrient demand, soil nutrient supplied and fertilizer recuperation efficiency components, and the economic approach, the mathematical models were estimated by regression analysis for their operation. The results show that the calculated fertilizer recommendations were similar for the nutrient balance approach to the economic approach. It was considered that the nutrient balance approach can be appropriate to generate fertilization recommendations for rainfed maize in the region of Nochixtlán, Oaxaca.

¹Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Estado de México, México.

²CEICADAR, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Puebla, Pue., México.

Index words: Nutrient demand, nutrient supplied, recuperation efficiency of the fertilizer, maize.

INTRODUCCION

Existen diferentes enfoques para generar recomendaciones de fertilización, entre los que pueden citarse los de: la media regional; la estratificación del ambiente en unidades de suelo, clima y manejo, en sus variantes de agrosistemas y agrohábitats; el análisis químico de suelo y planta; y, las funciones generalizadas de producción (Laird, 1977). Con la excepción del enfoque de estratificación del ambiente en su variante de agrohábitat, todos estos enfoques se basan en el método de campo, en el cual se conduce cierto número de experimentos sobre la respuesta del cultivo a los fertilizantes, en una región determinada (Laird, 1966; 1977). Por su parte, el enfoque de estratificación del ambiente en su variante de agrohábitat se basa en información sobre la respuesta del cultivo a los fertilizantes que se obtiene directamente de las siembras de los agricultores (Cuanalo, 1989; Cuanalo y Ponce, 1981).

De estos enfoques, el de agrosistemas ha predominado en México en las últimas décadas (Laird, 1966; 1977; Turrent, 1978). Este enfoque permitió una mayor precisión de las recomendaciones de fertilizantes que el de la media regional, usado previamente; sin embargo, aún presenta algún grado de imprecisión, debido a que no considera las variaciones de los contenidos nutrimentales del suelo dentro del agrosistema, tanto en un momento dado (aunque podría hacerlo) como en el tiempo, de algunos factores de suelo, clima y manejo, que modifican el aprovechamiento que hace el cultivo del nutrimento disponible, y la demanda nutrimental del cultivo, que es una función fundamentalmente del rendimiento.

Por otra parte, el enfoque de agrosistemas, así como todos aquellos que se basan en el método de campo, debido a que necesitan experimentación de campo durante cierto número de años, presentan la desventaja de ser costosos y de requerir plazos relativamente largos para alcanzar una aproximación aceptable de las dosis de fertilización, sin que posteriormente haya ajustes de las mismas ante variaciones de los contenidos nutrimentales del suelo.

El enfoque de agrohábitats, que utiliza información de siembras de agricultores, puede constituir una opción más barata y rápida para generar

recomendaciones de fertilización, sin embargo, requiere cumplir con algunas condiciones para su mejor funcionamiento, tales como: considerar un tamaño de muestra tal, que incluya adecuadamente las variaciones de suelo, clima y manejo presentes en la región; que en las unidades edafoclimáticas existan agricultores que se encuentren utilizando niveles altos de fertilizantes y otros componentes tecnológicos; considerar los factores climáticos y su distribución de probabilidades; y, con miras de obtener una mayor precisión de las recomendaciones de fertilizantes, incluir el análisis del suelo.

Debido a las limitaciones que presentan los enfoques que se basan en el método de campo, en relación al costo y tiempo para la generación de las recomendaciones de fertilización, un enfoque que ha comenzado a utilizarse en México es el de balance nutrimental, con menores requerimientos en cuanto a información de campo, costo y tiempo de implementación (Rodríguez, 1987; 1990). Este enfoque se sustenta en el balance entre la demanda del nutrimento por el cultivo y el suministro del nutrimento por el suelo, de tal manera, que cuando la demanda es mayor que el suministro, se producirá un déficit del nutrimento que es necesario suplir con fertilización. Finalmente la fertilización estará definida por la demanda, el suministro y la eficiencia de aprovechamiento del fertilizante, en cuanto a que no todo el nutrimento del fertilizante es aprovechado por el cultivo, llegándose a un modelo conceptual simplificado para su cálculo como el siguiente:

$$\text{Dosis de fertilizante} = \frac{\text{Demanda del nutrimento por el cultivo} - \text{Suministro del nutrimento por el suelo}}{\text{Eficiencia de recuperación del fertilizante}}$$

La demanda de un nutrimento por un cultivo está dada por su producción de biomasa y la concentración del nutrimento en la planta. La concentración mínima de un nutrimento en la planta, para alcanzar el rendimiento máximo posible en una condición dada, aunque varía entre las distintas partes de ella, es relativamente constante a la madurez fisiológica si se considera la biomasa aérea en su conjunto. A esta concentración se le llama requerimiento interno (Greenwood, 1983). El requerimiento interno es

independiente del rendimiento potencial que se alcanza en distintas condiciones de suelo y clima, siempre que no existan limitaciones de manejo (Etchevers *et al.*, 1991; Obrador, 1994; Rodríguez, 1990). La producción de biomasa se puede estimar en la práctica a partir de la producción de la porción de interés económico (grano, biomasa aérea, fruto), y del índice de cosecha, dado por la relación entre producto de interés y la biomasa producida. El índice de cosecha suele ser bastante constante para un cultivo dado en condiciones óptimas de manejo, variando ligeramente por efecto de la variedad, pero, en condiciones no óptimas de los factores climáticos y de manejo, puede desviarse substancialmente del valor medio (Etchevers *et al.*, 1991; Obrador, 1994; Rodríguez, 1990).

De esta manera, la extracción del nutrimento por el cultivo estará determinada fundamentalmente por la producción de biomasa, y lo que corresponde hacer entonces es estimar el rendimiento máximo posible del producto de interés, ya sea para las distintas unidades edafoclimáticas o agrosistemas, o a nivel de parcela, caso en el que se estarán considerando las variaciones de suelo, clima y manejo propias del agrosistema.

El rendimiento del cultivo que interesa conocer es el rendimiento óptimo económico o uno cercano a él, y su estimación no está exenta de algunas dificultades que deben considerarse. Un aspecto es el referente al tipo de información disponible, en cuanto a si es de tipo experimental o si procede de las siembras de los agricultores, y la cantidad de ella en relación a los factores que afectan al rendimiento. Otro aspecto se refiere a que si el rendimiento de interés es el rendimiento óptimo económico o uno cercano a él, puede ocurrir que puesto que se trata de generar recomendaciones de fertilización, dicho rendimiento no sea conocido, particularmente a nivel de parcela. Un tercer aspecto es el que se presenta cuando hay factores limitativos de tipo climático, caso en el que se deberá estimar la distribución de probabilidades de ellos, considerándose una probabilidad de exceso o de deficiencia del factor, dada, según el factor presente efecto depresivo por deficiencia o por exceso, respectivamente, para determinar el rendimiento máximo posible. Cabe señalar al respecto, que usualmente se utilizan niveles de probabilidad del orden de 70 a 80 % (Etchevers *et al.*, 1991; Galvis *et al.*, 1993; Rodríguez, 1990; Volke y García, 1994).

Algunas opciones que se han manejado para la estimación de los rendimientos, y que pueden emplearse, son las siguientes:

1. Estimar el rendimiento máximo alcanzable para diferentes condiciones de producción, ya sea a nivel de agrosistema o de parcela, con base en una función de respuesta del rendimiento de siembras de agricultores como función de factores de suelo, clima y manejo. A partir del rendimiento máximo alcanzable en las diferentes condiciones de producción, se estima un rendimiento óptimo económico del orden de 90 % del rendimiento máximo. Sin embargo, el factor de 90 % para estimar el rendimiento óptimo económico puede ser afectado por los factores de suelo y clima relacionados con el régimen de humedad del suelo, en cuanto a sequía, y de algunos factores limitativos de suelo, como lo señala Volke (1993), así como por la relación de precios insumo/producto. Por otra parte, sería necesario que haya agricultores que se encuentran utilizando cantidades suficientes de fertilizantes, del orden de los óptimos económicos, o superiores a ellos.

2. Consultar con los agricultores sobre cuál es el rendimiento que esperan obtener en su cultivo. Mas, si el agricultor no tiene antecedentes sobre la magnitud del rendimiento óptimo económico, puede ocurrir que el rendimiento esperado por él sea inferior a éste cuando se encuentre usando una tecnología inferior a la óptima, que se está tratando de generar en cuanto a fertilización. Otra dificultad con esta opción puede derivarse en relación con el efecto de los factores climáticos y su distribución de probabilidades sobre los rendimientos, el cual sería difícil de obtener si no se tiene información precisa y cuantitativa.

3. Una situación diferente se presenta cuando se cuenta con información experimental que permite obtener una función de respuesta de los rendimientos máximos posibles u óptimos económicos como función de los factores del suelo, clima y manejo, y de las relaciones de precios insumo/producto, que permita estimar el rendimiento potencial para diferentes condiciones de producción, ya sea a nivel de agrosistema o de parcela, como la proponen Volke y colaboradores (Volke y García, 1994; Volke *et al.*, 1994).

El suministro del nutrimento por el suelo tiene relación, por un lado, con la disponibilidad de un nutrimento, y por otro, con la eficiencia de la planta para absorber el nutrimento disponible, por lo cual la capacidad del suelo para suministrar nutrimentos depende de distintos factores del suelo, clima, manejo previo y del cultivo, según el nutrimento de que se trate. Así, para el nitrógeno, el suministro depende de la cantidad, calidad y manejo previo de los residuos y factores de suelo y clima que afectan la mineralización

de la materia orgánica del suelo, y de la profundidad del sistema radical. Para el fósforo, el suministro depende de la capacidad de adsorción de fósforo por el suelo, de las fertilizaciones previas que condicionan los niveles de disponibilidad del fósforo, y la densidad del sistema radical. Para el potasio, el suministro depende de la capacidad de amortiguamiento de potasio por el suelo, determinada por el tipo y contenido de arcilla, del grado de saturación de potasio del complejo de intercambio, y de la densidad del sistema radical (Rodríguez, 1990).

La disponibilidad de la mayoría de los nutrimentos en el suelo puede ser estimada mediante el análisis químico de suelo, que provee índices de ésta cuando son apropiadamente empleados, esto es, cuando son seleccionados previamente como buenos indicadores de ella. Rodríguez (1990) considera que para el nitrógeno no hay buenos índices químicos, por lo que recomienda emplear como criterio de disponibilidad, las entradas de nitrógeno al sistema, mas, sólo para sistemas en equilibrio. En tal caso, la disponibilidad de nitrógeno es función de los residuos de cosecha que quedan en el campo (previamente incorporados al suelo) y de las raíces, así como del nitrógeno inmovilizado por la microflora correspondiente al fertilizante aplicado al cultivo anterior. Otros investigadores han considerado como índice al nitrógeno potencialmente mineralizable (Stanford y Smith, 1972; Flores, 1988); sin embargo, esta técnica es lenta y complicada. Para el fósforo, el método de Olsen permite evaluar eficientemente la disponibilidad de fósforo en una gran variedad de suelos y diferentes pH del suelo, y este índice, en conjunto con la eficiencia de absorción del cultivo, aspecto que depende del tipo de sistema radical, permite calcular el suministro de fósforo. En cuanto al potasio, la disponibilidad se estima a partir del potasio intercambiable del suelo, de la capacidad tampón del suelo, y la eficiencia de absorción del cultivo, la que depende del tipo de sistema radical (Rodríguez, 1990).

La eficiencia de recuperación del fertilizante depende de factores de la planta, suelo y clima, del régimen hídrico y de las características (fuente y solubilidad, y forma) y manejo (método y oportunidad de aplicación) del fertilizante, y presenta variaciones propias entre nutrimentos (Rodríguez, 1990). Para el nitrógeno, los factores de suelo a considerar son: la lixiviación, que depende de la capacidad de retención de humedad, la profundidad del sistema radical y la precipitación; la desnitrificación, según la

permeabilidad y drenaje del suelo y la temperatura; y, la volatilización, para el caso de algunos fertilizantes como la urea y el amoníaco, cuando se aplican muy superficialmente sin cubrir adecuadamente, o en suelos con altos contenidos de carbonatos solubles. Para el fósforo, los factores de suelo a considerar son aquellos relacionados con las reacciones rápidas y lentas de absorción de los iones fosfatos por los materiales coloidales y el factor de la planta que más se relaciona con la eficiencia de recuperación del fertilizante es la eficiencia de absorción del cultivo, el cual es función de la densidad de raíces, y del factor manejo, representado por la forma de aplicación del fertilizante. Para el potasio, los factores de suelo a considerar son el tipo y contenido de arcilla, y el grado de insaturación de potasio, y el factor de la planta que se relaciona con la eficiencia de recuperación del fertilizante es la eficiencia de absorción del cultivo, que es función de la densidad radical.

Otro factor que puede afectar la eficiencia de recuperación del fertilizante es el nivel de la recomendación, en cuanto a las relaciones de precios insumo/producto con que se determinen los óptimos económicos y recomendaciones, pues cuanto mayores sean estas relaciones menores serán los óptimos económicos, lo que dará lugar a eficiencias de recuperación mayores. La misma situación se dará para el caso de recomendaciones de capital limitado, menores a las de capital ilimitado.

La eficiencia de recuperación del fertilizante por un cultivo dado puede ser determinada en términos generales para condiciones de suelo, clima y régimen hídrico similares, pero a nivel parcelario, si se desea una mayor precisión, habrá que conocer o estimar las condiciones particulares relativas a los factores que la afectan.

En esta investigación se presenta un modelo de balance nutrimental, para generar recomendaciones de nitrógeno y fósforo para maíz de temporal en la zona de Nochixtlán, Oaxaca, con base en modelos matemáticos para estimar la demanda de nutrimentos por la planta, el suministro nutrimental del suelo y la eficiencia de recuperación del fertilizante, y su comparación con un enfoque de agrohábitats modificado, tomado como patrón de comparación.

La finalidad de la comparación es observar el funcionamiento del modelo de balance nutrimental en maíz de temporal, considerado a partir de información

de siembras de agricultores, y concluir sobre sus posibilidades de aplicación en zonas y cultivos que no disponen de información experimental de campo sobre la respuesta del cultivo a los fertilizantes.

El enfoque de agrohábitats se modificó, ya que se incluyeron el análisis de suelo y las variables climáticas y su distribución de probabilidades y se cambió la metodología estadística para estimar las funciones de producción, todo ello con fines de alcanzar una mayor precisión en las determinaciones de las recomendaciones de fertilización.

MATERIALES Y METODOS

La información utilizada correspondió a 82 parcelas de maíz de temporal, de agricultores cooperantes, del área de influencia del Plan Nochixtlán¹, en las cuales se tomaron observaciones sobre variables del cultivo y de factores de suelo, clima y manejo.

El área de influencia del Plan Nochixtlán se ubica en la zona este de la región Mixteca, ubicada a su vez en la parte noroeste del estado de Oaxaca. Ella comprende una superficie total de aproximadamente 330 000 ha, de las cuales alrededor de 30 000 ha corresponden a suelos propiamente agrícolas, aunque la superficie bajo uso agrícola actualmente son 63 000 ha. La agricultura es principalmente de temporal, y la superficie bajo riego incluye alrededor de 2100 ha. El principal cultivo es el maíz, fundamentalmente bajo condiciones de temporal. Los sistemas de producción de maíz son: maíz solo de temporal, maíz solo de riego, maíz de cajete (siembras de temporal con humedad residual) y maíz asociado con frijol de temporal.

El clima de la zona es templado subhúmedo, con régimen de lluvias en verano, poca oscilación térmica y presencia de sequía interestival (canícula). La precipitación media anual es de 670 mm, con variaciones de 407 a 725 mm, distribuidos predominantemente en los meses de mayo a septiembre. La temperatura media anual es 12.3 °C, con medias mínimas y máximas de 4 a 7 °C en los meses de diciembre a febrero, y de 14 a 17 °C en los

meses de abril a junio, respectivamente (Frausto, 1987; García, 1988).

Los suelos de la zona, de acuerdo con la clasificación FAO/UNESCO, corresponden a Cambisol cálcico, 38 %, Luvisol crómico, 37 %, Rendzina, 9 %, Vertisol pélico, 8 %, y Cambisol eútrico, 6 % (Cuanalo *et al.*, 1989).

Las 82 parcelas de maíz se seleccionaron mediante un muestreo aleatorio estratificado, por localidad y agricultor (un agricultor podía tener más de una parcela), de acuerdo con el procedimiento propuesto por Díaz (1990). En ellas se tomó información del cultivo y su tecnología, de suelo y de clima.

El rendimiento de grano y rastrojo se determinó en campo, con base en el método propuesto por el CIMMYT (1969), lo mismo que la densidad de plantas a la cosecha. Al grano y rastrojo se les determinaron los contenidos de nitrógeno y fósforo, mediante los métodos convencionales de laboratorio (Etchevers, 1988).

La información sobre la tecnología de producción se captó directamente de los agricultores, y ella incluyó: el sistema de maíz (de temporal con humedad residual o cajete y de temporal), el uso de riego, la preparación del suelo, la incorporación de residuos del cultivo anterior, el cultivo previo, la aplicación de abono orgánico, la fecha de siembra, la fertilización nitrogenada y fosfatada, las fuentes de fertilizante, las labores del cultivo, la presencia de plagas y malezas y su combate, y los cultivos, fertilización y rendimientos en los últimos cinco años.

Los factores de suelo profundidad y pendiente se midieron en campo, a la vez que a partir de una muestra compuesta de suelo de 0 a 20 cm tomada al momento de la siembra se determinaron las propiedades: textura, color, pH, acidez intercambiable, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno total, nitratos, fósforo Olsen, potasio intercambiable, sulfatos y carbonatos, mediante los métodos convencionales rutinarios de laboratorio (Etchevers, 1988).

En cuanto a los factores climáticos, sólo se consideró la sequía durante el ciclo del cultivo, a partir de información de los agricultores y observación directa en campo. De acuerdo con el período del ciclo del cultivo, su duración e intensidad, la sequía se clasificó como: inexistente, moderada y severa.

En el Cuadro 1 se presentan los valores medios y el ámbito de variación, para las variables del cultivo y los factores de suelo, clima y manejo.

¹Plan de Desarrollo Agropecuario del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, que opera en la zona de Nochixtlán, Oaxaca (CEICADAR, 1989).

Cuadro 1. Valor medio y ámbito de variación para las variables del cultivo y los factores de suelo, clima y manejo.

Variable o factor	Valor medio	Ámbito de variación
Del cultivo		
Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)	1117	41-3301
Rendimiento de paja (kg ha ⁻¹)	2168	171-5977
Contenido de nitrógeno (%):		
grano	1.35	0.94-1.75
paja	0.69	0.27-1.16
Contenido de fósforo (%):		
grano	0.30	0.15-0.42
paja	0.11	0.02-0.25
De suelo		
Topografía	-	Plano-lomerío
Profundidad (cm)	67	<30->75
Arena (%)	34	5-61
Limo (%)	23	10-47
Arcilla (%)	43	18-84
pH	7.6	6.1-8.4
Conductividad eléctrica (mmho cm ⁻¹)	0.14	0.03-0.28
Materia orgánica (%)	2.29	0.34-8.59
Nitrógeno total (%)	0.12	0.04-0.43
Nitratos (ppm)	8	1-15
Fósforo Olsen (ppm)	17	1-82
Potasio intercambiable (me/100 g)	0.79	0.07-2.25
Sulfatos (ppm)	36	1-141
Carbonatos (%)	13.5	0.6-41.3
De clima		
Sequía	0.4	Clases 0, 1 y 2†
Fecha de siembra, maíz temporal	6/6	10/4-25/7
De manejo		
Tipo de siembra:	0.11	
cajete	-	0
temporal	-	1
Residuos de cosecha:	0.085	
sin	-	0
con	-	1
Abono orgánico:	0.11	
sin	-	0
con	-	1
Fecha de siembra, maíz cajete	12/3	26/2-28/3
Densidad de plantas (plantas ha ⁻¹)	38 500	19 500-88 000
Nitrógeno aplicado (kg N ha ⁻¹)	35	0-165
Fósforo aplicado (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	19	0-92
Plagas:	0.44	
sin	-	0
con	-	1
Combate de plagas:	0.085	
sin	-	0
con	-	1

† 0 = sequía inexistente o leve; 1 = sequía moderada; 2 = sequía severa.

Por otra parte, también se consideraron las unidades edafoclimáticas, según la clasificación realizada por el Plan Nochixtlán (CEICADAR, 1989). Las unidades edafoclimáticas definidas en el área del

Plan Nochixtlán son ocho, sin embargo, sólo se trabajó en las cuatro unidades siguientes:

I. Suelos de valle, profundos y arcillosos, de las comunidades de Chachoapan, Yucuita, Sinaxtla, Yanhuitlán, Tillo, Suchixtlán, Andúa, Chindúa, Etlatongo, Tecamatlán, Nochixtlán, Tidaá, Jaltepetongo y Yodocono.

III. Suelos rojos de lomeríos, con profundidad menor que 60 cm y texturas medias, de las comunidades de Tamazola, Yucuxina, El Venado, Buenavista, La Unión, Victoria, Morelos y San Miguel.

IV. Suelos delgados rojizos, pedregosos y arenosos, de las comunidades de Nuxaá, Nuxiño, Santa Inés, El Cortijo, Ojo de Agua, Buenavista, La Paz y Reforma.

V. Suelos de ladera rosáceos, de textura arcillo arenosa, de las comunidades de Jaltepec, Tilatongo, Tidaá, Nuxaño, Zahuatlán, Amatlán y Los Angeles.

La metodología comprende la determinación de las recomendaciones de nitrógeno y fósforo con los enfoques de agrohábitats modificado, mediante una función de producción, y de balance nutrimental, y la comparación del enfoque de balance nutrimental con el enfoque de agrohábitats modificado, usado como enfoque de comparación.

Para la obtención de la función de producción, la metodología seguida fue la siguiente: 1) se graficó la relación entre el rendimiento de grano y los factores de suelo, clima y manejo; 2) a partir de las relaciones gráficas observadas, se especificó un modelo de regresión en sus variables simples, de manera aproximada, excluyendo de dos variables altamente correlacionadas ($r > 0.8$), aquella con menor asociación con la variable dependiente; 3) este modelo de regresión especificado se corrió con el procedimiento GLM del programa SAS (Statistical System Analysis), pidiendo los predichos y los residuales; 4) los residuales se graficaron *versus* los factores del modelo especificado, así como con aquellos no incluidos en el modelo; 5) si las gráficas mostraban alguna tendencia de respuesta, se procedía, cuando el factor era uno que se encontraba en el modelo especificado, a cambiar su o sus variables simples, según la forma de dicha tendencia, y, si era uno que no estaba incluido en el modelo especificado, a incluirlo en su o sus variables simples, conforme a la forma de dicha tendencia; y, 6) las interacciones se consideraron de acuerdo con su posible importancia, y se probaron con los residuales del modelo con variables simples obtenido en el punto anterior, de igual manera que los factores no incluidos

en un modelo dado. Finalmente, el modelo de la función de respuesta se obtuvo mediante el procedimiento de máximo incremento de R^2 del programa SAS, usando el menor cuadrado medio de desviaciones de regresión como criterio de bondad.

En este procedimiento para obtener un modelo de regresión cabe hacer algunas aclaraciones: 1) en el caso de factores altamente correlacionados, ambos no pueden entrar al modelo, debido a que, estando uno de ellos incluido en el modelo, los residuales del otro no incluido en el modelo, no indicarán tendencia de respuesta que sugiriese incluirlo; 2) para el caso de variables de un mismo factor altamente correlacionadas, ellas sí pueden entrar en el modelo, independientemente de su alta correlación, si es que son necesarias para explicar una respuesta dada; y, 3) para el caso de variables altamente correlacionadas, la variable excluida del modelo podría entrar en éste como en interacción con la variable incluida.

Con la función de respuesta se determinaron las dosis óptimas económicas de nitrógeno y fósforo, mediante el método matemático (Volke, 1990), con una relación de precios insumo/producto de 4.5 y considerando tasas de retorno de 33, 55, 78, 100 %, lo que genera valores de 6, 7, 8 y 9 para la relación de precios insumo/producto, respectivamente, y para las medias de clases de materia orgánica o nitrógeno total y de fósforo Olsen del suelo, y los valores correspondientes al agrosistema de los demás factores incluidos en la función de producción.

Para la determinación de las recomendaciones de nitrógeno y fósforo con el enfoque de balance nutrimental se utilizó el modelo conceptual simplificado propuesto por Rodríguez (1990), estimándose los parámetros de demanda, suministro y eficiencia con base en modelos matemáticos, para cada nutrimento, estimados mediante la misma metodología seguida para el modelo de rendimiento, con lo cual finalmente se obtuvieron las recomendaciones correspondientes.

La demanda del cultivo se obtuvo a partir de la extracción de nutrimentos de la parte aérea de la planta (grano y paja) y una estimación de la extracción de nutrimentos por las raíces para el caso del nitrógeno. Esta extracción se determinó para el rendimiento óptimo económico correspondiente a la recomendación nutrimental dada por el enfoque de agrohábítats modificado y el rendimiento de paja estimado a partir del índice de cosecha, multiplicados ellos por los respectivos contenidos nutrimentales. La extracción de

las raíces se estimó para el caso del nitrógeno considerando una producción de raíces del orden de 15 % de la producción de grano y paja, y un contenido medio de 0.7 % de nitrógeno (Rodríguez, 1990). La demanda nutrimental así obtenida se asoció con el rendimiento de grano, el índice de cosecha y los factores de suelo, clima y manejo que causaren variaciones del contenido nutrimental del cultivo, para obtener el modelo matemático correspondiente.

El suministro del suelo se determinó a partir de la extracción de nutrimentos de la parte aérea de la planta,

grano y paja, más la cantidad estimada para las raíces para el caso del nitrógeno, en las siembras que no recibieron fertilización, calculada de igual manera que la extracción para el caso del rendimiento óptimo económico. Este suministro nutrimental de nitrógeno y fósforo se asoció con: 1) el índice nutrimental del nitrógeno dado por la materia orgánica o el nitrógeno total del suelo, y el índice nutrimental de fósforo dado por el fósforo Olsen del suelo; y, 2) con factores de suelo, clima y manejo, que pudiesen modificar el suministro nutrimental del suelo; a fin de obtener el modelo matemático para el suministro del suelo.

La eficiencia de recuperación del fertilizante se determinó por el método de la diferencia, con base en la cantidad del nutrimento que la planta extrae del fertilizante, la cual se estimó a partir de la extracción de nutrimentos del cultivo con fertilización menos la cantidad de nutrimento que suministra el suelo al cultivo (extracción del cultivo sin fertilización, que se estima con base en la función de respuesta para el suministro del suelo), todo ello dividido entre la cantidad del nutrimento aplicado como fertilizante. Esta eficiencia se asoció con el rendimiento de grano, el índice de cosecha y los factores de suelo, clima y manejo, para obtener el modelo matemático para la eficiencia de recuperación del fertilizante.

Por último, con los modelos matemáticos de la demanda nutrimental, del suministro nutrimental del suelo y de la eficiencia de recuperación del fertilizante, se obtuvieron las recomendaciones de nitrógeno y fósforo con el enfoque de balance nutrimental para los rendimientos obtenidos con el enfoque de agrohábítats modificado para una relación de precios insumo/producto dada y las distintas tasas de retorno, y para los valores medios de clases de materia orgánica o nitrógeno total del suelo para el caso del nitrógeno y de fósforo Olsen del suelo para el caso del fósforo, y los valores para el agrosistema de los demás factores

involucrados en los modelos de la demanda, del suministro y de la eficiencia.

RESULTADOS Y DISCUSION

Enfoque de Agrohábitats Modificado

Para la determinación de las recomendaciones de nitrógeno y fósforo mediante el enfoque de agrohábitats modificado, se hizo uso de la función de producción estimada, siendo ella la siguiente:

$$Y = + 505.27 R + 910.25 E + 179.83 M + 2623.6 n^{0.75} + 290.69 n^{0.75} p^{0.25} - 1789.4 n^{0.75} S + 2.3203 n^{0.75} A^2 - 0.024434 n^{0.75} A^3 - 0.46332 A^2 S + 0.0064190 A^3 S - 0.00004600 M F^3 - 140.20 N^{0.5} n^{0.75} + 0.11248 N^{0.5} A^2 - 0.0017320 N^{0.5} A^3 - 22.587 N^{0.5} S + 13.259 N^{0.5} P^{0.5}$$

(CMDR = 43 508.8, Pr. F = 0.0001, R² = 0.935)

Donde: Y es el rendimiento de grano (kg ha⁻¹), R es la incorporación de residuos de cosecha (sin incorporación R=0, con incorporación R=1), E es la aplicación de estiércol (sin aplicación E=0, con aplicación E=1), M es el sistema de maíz (de humedad residual o cajete M=0, de temporal M=1), F es la fecha de siembra (días a partir del 1 de enero), n es el nitrógeno total del suelo (%), p es el fósforo Olsen del suelo (ppm), A es la arena del suelo (%), S es la sequía (sequía inexistente S=0, sequía moderada S=1, sequía severa S=2), N es el nitrógeno aplicado (kg N ha⁻¹) y P es el fósforo aplicado (kg P₂O₅ ha⁻¹).

El rendimiento de grano estuvo relacionado: positivamente, ya sea de manera lineal o decreciente, con la incorporación de residuos de cosecha, la aplicación de estiércol, el nitrógeno total, fósforo Bray 1 y arena del suelo, y el nitrógeno y fósforo aplicados; y, negativamente, con la sequía y la fecha de siembra en el caso de las siembras de temporal.

Los factores incorporación de residuos de cosecha, aplicación de estiércol y nitrógeno total del suelo, tienen que ver con el suministro y la nutrición nitrogenada del cultivo, lo mismo que el nitrógeno aplicado.

Los factores aplicación de estiércol y fósforo Bray 1 del suelo tienen relación con la nutrición fosfatada del cultivo, al igual que el fósforo aplicado.

El factor arena del suelo probablemente tiene que ver con una mayor infiltración de agua por el suelo, y su aprovechamiento por la planta, a la vez que el factor sequía causa un déficit de agua para el cultivo.

Por otra parte, el rendimiento de grano no se vio afectado por factores como la profundidad del suelo y densidad de planta, como normalmente ocurre.

De acuerdo con esta función de producción, se calcularon las recomendaciones de nitrógeno y fósforo para los agrosistemas considerados, según los factores de suelo, clima y manejo que comprendan y se encuentren incluidos en las función de producción, y para las clases de nitrógeno total y fósforo Olsen del suelo.

Para esto se trabajó con distintas relaciones de precios insumo/producto, de 6, 7, 8 y 9, definidas a partir de los precios de los insumos y productos, y consideraciones de riesgo, con base en tasas de retorno de 33, 55, 77 y 100 %, respectivamente.

Si bien las dosis óptimas económicas de nitrógeno y fósforo con el modelo de agrohábitats modificado se obtuvieron para cuatro relaciones de precios insumo/producto, se vio que sólo con la de 8 eran congruentes con las obtenidas con el modelo de balance nutricional para el mismo nivel de rendimiento. No se tiene un conocimiento claro sobre esta situación, mas esto puede estar relacionado con la eficiencia del fertilizante, la que varía con la dosis óptima económica, y ésta a su vez con la relación de precios insumo/producto.

En el Cuadro 5 se presentan las recomendaciones de nitrógeno y fósforo estimadas con el enfoque de agrohábitat modificado, para los agrosistemas considerados, y los valores medios de clases de nitrógeno total y fósforo Olsen del suelo, y sequía moderada.

Enfoque de Balance Nutricional

Recomendaciones de nitrógeno. El modelo de la demanda se expresó en un modelo de regresión especificado en términos del rendimiento de grano, e interacciones del rendimiento de grano con factores de suelo, clima y manejo, que causen variaciones del contenido nutricional de la biomasa aérea, y con el índice de cosecha, que expresa la producción de paja. En primer término se estimó el modelo para el índice de cosecha, siendo éste el siguiente:

$$IC = +0.001268 Y^{0.75} - 0.000001663 Y^{1.5} + 0.08850 M - 0.00004678 D^2 + 0.0970 A^{0.5} - 0.006582 A - 0.03675 S$$

(CMDR = 0.004658, Pr. F = 0.0001, R² = 0.644)

Donde: IC es el índice de cosecha, Y es el rendimiento de grano (kg ha^{-1}), M es el sistema de maíz (de humedad residual o cajete $M=0$, de temporal $M=1$), D es la densidad de plantas (miles de plantas ha^{-1}), A es la arena del suelo (%) y S es la sequía (sequía inexistente $S=0$, sequía moderada $S=1$, sequía severa $S=2$).

El efecto positivo del rendimiento de grano indicaría que a mayores rendimientos habrán menos factores limitativos y, consecuentemente, se verá más favorecida la producción de grano, obteniéndose un mayor índice de cosecha. El efecto positivo del sistema de cultivo, según los valores de la variable auxiliar, se puede interpretar en términos de que el maíz de cajete se siembra más temprano y es de porte más alto que el maíz de temporal, lo que implica que presente una mayor producción de paja, para un mismo rendimiento de grano, que este último, de tal manera que el maíz de temporal presenta un mayor índice de cosecha que el maíz de cajete.

El efecto negativo de la densidad de plantas tendría su explicación en el hecho de que a densidades más altas de plantas, aumentará el consumo de agua, lo que bajo un régimen de temporal puede traducirse en deficiencias de humedad durante la etapa de llenado del grano y en menor producción de éste, y consecuentemente en un índice de cosecha menor.

El factor arena del suelo, así como también el factor sequía, probablemente tienen que ver con el régimen de humedad del cultivo durante su ciclo de desarrollo, y pueden estar confundidos con el factor rendimiento de grano, puesto que ambos afectan también a este último; sin embargo, también pueden tener un efecto propio sobre la producción de paja y, por tanto, sobre el índice de cosecha.

En el Cuadro 2 se presentan los valores estimados de índice de cosecha para distintos niveles de rendimiento y los dos sistemas de maíz: de humedad residual o cajete y de temporal, y a valores: medio de arena del suelo (47.0%), de 40 000 plantas ha^{-1} y de sequía moderada.

El modelo de la demanda de nitrógeno obtenido es el siguiente:

$$DN = +0.03857 Y - 0.03641 Y I + 9.548 R$$

(CMDR = 22.81, Pr. F = 0.0001, $R^2 = 0.918$)

Cuadro 2. Índice de cosecha estimado para distintos niveles de rendimientos y los sistemas maíz de humedad residual o cajete y de temporal.

Nivel de rendimiento	Sistema de maíz	
	Cajete	Temporal
500	0.227	0.316
1000	0.285	0.373
2000	0.342	0.431
3000	0.353	0.441

Donde: DN es el nitrógeno extraído por el cultivo (kg N ha^{-1}), Y es el rendimiento de grano (kg ha^{-1}), I es el índice de cosecha y R es la incorporación de residuos de cosecha (sin incorporación $R=0$, con incorporación $R=1$).

La extracción de nitrógeno estuvo relacionada positivamente con el rendimiento de grano y negativamente con el índice de cosecha, para un mismo nivel de rendimiento de grano, a la vez que también con el factor incorporación de residuos.

De estos factores, el rendimiento de grano explicó 87% de la extracción de nitrógeno, por lo que constituye el factor más importante asociado a la demanda de nitrógeno por el cultivo. De los demás factores, el índice de cosecha, que expresa a la producción de paja, explicó 3% de la extracción de nitrógeno, y la incorporación de residuos 1.5%.

El modelo del suministro de nitrógeno por el suelo obtenido es el siguiente:

$$SN = +4.139 + 14.20 R + 18.79 E + 19.08 n^{0.5} p^{0.25} + 5.343 n^{0.5} A^{0.5} - 23.28 n^{0.5} S - 1.452 A^{0.5} S$$

(CMDR = 26.40, Pr. F = 0.0001, $R^2 = 0.904$)

Donde: SN es el suministro de nitrógeno del suelo (kg N ha^{-1}), R es la incorporación de residuos de cosecha (sin incorporación $R=0$, con incorporación $R=1$), E es la aplicación de estiércol (sin aplicación $E=0$, con aplicación $E=1$), n es el nitrógeno total del suelo (%), p es el fósforo Olsen del suelo (ppm), A es la arena del suelo (%) y S es la sequía (sequía inexistente $S=0$, sequía moderada $S=1$, sequía severa: $S=2$).

El suministro de nitrógeno por el suelo estuvo afectado positivamente por factores de suelo, como el nitrógeno total, y de manejo, como la incorporación de residuos de cosecha y la aplicación de estiércol; a su vez, factores de suelo como el fósforo aprovechable y la

arena, favorecieron el aporte del nitrógeno total del suelo, y al contrario de la sequía, que lo desfavoreció. En relación con el efecto del fósforo Olsen del suelo sobre el suministro de nitrógeno, podría interpretarse en términos de que favorece la nitrificación de la materia orgánica, ya que su efecto es una interacción con el nitrógeno total del suelo.

Con el fin de tener conocimiento del orden de magnitud del suministro de nitrógeno por el suelo, con base en el modelo obtenido para el suministro, se calculó éste para las distintas clases de nitrógeno total y fósforo Olsen del suelo, un valor de 35 % de arena, el valor medio para los agrosistemas I, III, IV y V, la condición sin sequía, sin incorporación de residuos de cosecha y sin aplicación de estiércol, lo que se presenta en el Cuadro 3.

El modelo de la eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado obtenido es el siguiente:

$$EN = +0.004295 Y + 0.000009253 Y^2 - 0.00000002085 Y^3$$

(CMDR = 26.14, Pr. F = 0.0001, R² = 0.860)

Donde: EN es la eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado y Y es el rendimiento de grano (kg ha⁻¹).

La eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado quedó expresada, de manera positiva, exclusivamente por el rendimiento de grano del cultivo. A este respecto, se ha de señalar que si bien el rendimiento de grano depende de diversos factores de suelo, clima y manejo, puesto que en la práctica se debe estimar el rendimiento esperado al determinar las recomendaciones de nitrógeno, sería posible expresar la eficiencia en términos del rendimiento. Sin embargo, llama la atención que en el modelo de la eficiencia no haya quedado incluida la producción de paja, a través del índice de cosecha.

Cuadro 3. Suministro de nitrógeno y de fósforo por el suelo para las clases de nitrógeno total y fósforo Olsen del suelo consideradas.

Clase de nitrógeno total (%) y fósforo Olsen (ppm) del suelo	Suministro de nitrógeno por el suelo	Suministro de fósforo por el suelo
	kg N ha ⁻¹	kg P ha ⁻¹
0.048- 5	17.3	4.4
0.111-15	27.2	8.1
0.174-30	35.9	10.9
0.236-50	42.0	13.7

De acuerdo con el nivel de rendimiento esperado, la eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado estimada en los cuatro agrosistemas considerados es la que se presenta en el Cuadro 4. Estos valores de eficiencia son de una magnitud bastante baja, e indicarían la necesidad de estudiar las causas de esta baja eficiencia.

Finalmente se obtuvieron las recomendaciones de nitrógeno con el modelo de balance nutrimental para los agrosistemas considerados, según sus rendimientos esperados, y para distintas clases de nitrógeno total y fósforo Olsen del suelo, y considerando los respectivos suministros de nitrógeno del suelo y eficiencias de recuperación del fertilizante nitrogenado, y sequía moderada. Así, en el Cuadro 5 se presentan las recomendaciones de nitrógeno obtenidas con el enfoque de balance nutrimental.

De acuerdo con el Cuadro 5, en todos los agrosistemas se observa similitud de las recomendaciones dadas por ambos enfoques, excepto diferencias de 5 kg N ha⁻¹ para algunas clases de nitrógeno del suelo en los agrosistemas III, IV y V, lo cual resulta despreciable en la práctica.

Recomendaciones de fósforo. De igual manera que para el nitrógeno, el modelo de la demanda de fósforo se expresó en un modelo de regresión especificado en términos del rendimiento de grano, e interacciones del rendimiento de grano con factores de suelo, clima y manejo, que causen variaciones del contenido nutrimental de la biomasa aérea, y con el índice de cosecha, que expresa la producción de paja.

El modelo del índice de cosecha es el mismo obtenido para el caso del nitrógeno y, de esta manera, el modelo de la demanda obtenido es el siguiente:

$$DP = +0.005658 Y - 0.009432 Y I + 0.001889 Y p^{0.25}$$

$$- 0.0000007523 Y p^{0.25} C^2$$

(CMDR = 1.701, Pr. F = 0.0001, R² = 0.874)

Cuadro 4. Eficiencia del fertilizante nitrogenado y fosfatado estimada en los agrosistemas considerados.

Agrosistema	Rendimiento esperado	Eficiencia del fertilizante nitrogenado	Eficiencia del fertilizante fosfatado
	kg ha ⁻¹	%	%
I	2150	33	23
III	1800	27	19
IV	1800	27	19
V	2400	36	26

Cuadro 5. Recomendaciones de nitrógeno y fósforo obtenidas con los enfoques de agrohábítats modificado y de balance nutrimental, para distintas clases de nitrógeno total y fósforo Olsen del suelo, en agrosistemas de maíz de temporal de la región de Nochixtlán, Oaxaca.

Agro-sistema†	AR	AC	CO	Valor medio de clase de nitrógeno total (%) y fósforo Olsen (ppm) del suelo	DP	Rendimiento esperado	Recomendación de nitrógeno por enfoque‡		Recomendación de fósforo por enfoque‡	
							EAM	EBN	EAM	EBN
	----- % -----				pl. ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	--- kg N ha ⁻¹ ---		-- kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ --	
I	35	45	6	0.048- 5 0.111-15 0.174-30 0.237-50	55 000	2150	110 80 55 25	110 80 50 25	70 60 40 25	70 55 40 25
III	35	35	1	0.048- 5 0.111-15 0.174-30 0.237-50	45 000	1800	85 55 25 5	90 55 20 5	55 40 25 5	60 40 20 0
IV	45	25	1	0.048- 5 0.111-15 0.174-30 0.237-50	45 000	1800	80 45 15 0	85 45 10 0	50 30 10 0	55 35 10 0
V	45	35	1	0.048- 5 0.111-15 0.174-30 0.237-50	55 000	2400	115 85 55 30	110 80 55 30	80 60 45 25	75 60 45 25

† AR = arena del suelo, AC = arcilla del suelo, CO = carbonatos del suelo, DP = densidad de plantas.

‡ EAM = enfoque de agrohábítats modificado, EBN = enfoque de balance nutrimental.

Donde: DP es el fósforo extraído por el cultivo (kg P ha⁻¹), Y es el rendimiento de grano (kg ha⁻¹), I es el índice de cosecha, p es el fósforo Olsen del suelo (ppm) y C son los carbonatos del suelo (%).

La extracción de fósforo estuvo asociada positivamente con el rendimiento de grano y negativamente con el índice de cosecha, para un mismo nivel de rendimiento de grano, así como con factores que tendrían que ver con la nutrición fosfatada y el requerimiento interno de la planta, tales como el fósforo Olsen del suelo, de manera positiva, y los carbonatos del suelo, de manera negativa.

De estos factores, el rendimiento de grano explicó 73 % de la extracción de fósforo, lo que indica que constituye el factor más importante asociado a la demanda de fósforo por el cultivo. Por su parte, el índice de cosecha explicó 4 % de la extracción de fósforo, y los demás factores el 11 % restante.

El modelo del suministro de fósforo por el suelo obtenido es el siguiente:

$$SP = -2.285 + 5.844 E + 6.160 n^{0.5} p^{0.25} - 5.621 n p^{0.25} - 0.0003518 p^{0.25} C^2 - 0.8491 p^{0.25} S + 0.4664 A^{0.5}$$

(CMDR = 2.605, Pr. F = 0.0001, R² = 0.812)

Donde: SP es el suministro de fósforo del suelo (kg P ha⁻¹), E es la aplicación de estiércol (sin aplicación E=0, con aplicación E=1), n es el nitrógeno total del suelo (%), p es el fósforo Olsen del suelo (ppm), A es la arena del suelo (%), C son los carbonatos del suelo (%) y S es la sequía (sequía inexistente S=0, sequía moderada S=1, sequía severa S=2).

El suministro de fósforo por el suelo estuvo afectado positivamente por la arena del suelo y la aplicación de estiércol, y por el fósforo aprovechable del suelo, en interacción con el nitrógeno total del suelo; a la vez que negativamente por los carbonatos del suelo y la sequía. Con la finalidad de tener conocimiento sobre la magnitud del suministro de fósforo por el suelo, a partir del modelo obtenido para el suministro se calculó éste para las distintas clases de nitrógeno total y fósforo Olsen del suelo, un valor de 35 % de arena, el valor medio para los agrosistemas I, III, IV y V, la condición sin sequía y sin aplicación de estiércol, lo que se presenta en el Cuadro 3.

El modelo de la eficiencia de recuperación del fertilizante fosfatado obtenido es el siguiente:

$$EP = +0.0001071 Y$$

(CMDR = 0.005204, Pr. F = 0.0001, R² = 0.511)

Donde: EP es la eficiencia del fertilizante fosfatado y Y es el rendimiento de grano (kg ha^{-1}).

La eficiencia del fertilizante fosfatado quedó expresada, de manera positiva, exclusivamente por el rendimiento de grano del cultivo. Al respecto, se puede señalar que si bien el rendimiento de grano depende de diversos factores de suelo, clima y manejo, debido a que en la práctica se debe estimar el rendimiento esperado al determinar las recomendaciones de fósforo, sería posible expresar la eficiencia en términos del rendimiento.

Según el nivel de rendimiento esperado, la eficiencia del fertilizante fosfatado estimada en los cuatro agrosistemas considerados es la que se presenta en el Cuadro 4, mostrando ser relativamente baja, lo que convendría estudiar más detalladamente.

Por último, se obtuvieron las recomendaciones de fósforo con el modelo de balance nutrimental para los agrosistemas de la región, de acuerdo con sus rendimientos esperados, y para distintas clases de nitrógeno total y fósforo Olsen del suelo, y considerando

los respectivos suministros de fósforo del suelo y las eficiencias de recuperación del fertilizante fosfatado, y sequía moderada. En el Cuadro 5 se presentan las recomendaciones de fósforo obtenidas con los enfoques de agrohábittats modificado y de balance nutrimental.

Según el Cuadro 5, en todos los agrosistemas se observa similitud de las recomendaciones con ambos enfoques, excepto algunas diferencias de $5 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, las que resultan despreciables en la práctica.

Comparación de los Enfoques

Los enfoques de agrohábittats modificado y de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de fertilizantes, resultaron ser similares, tanto para nitrógeno como para fósforo, en los cuatro agrosistemas considerados.

En estos términos, se puede considerar aceptable el comportamiento del enfoque de balance nutrimental para generar recomendaciones de fertilización para maíz bajo las condiciones de producción consideradas.

Estos resultados se obtuvieron con una relación de precios insumo/producto de 8 para el caso del enfoque de agrohábittats, lo que requiere ser aclarado con relación a otras relaciones de precios insumo/producto.

CONCLUSIONES

El modelo de balance nutrimental, en la forma utilizada, dio recomendaciones de nitrógeno y fósforo para maíz de temporal en agrosistemas de la zona de Nochixtlán, Oaxaca, similares a las dadas por un enfoque de agrohábittats modificado, tomado como enfoque de comparación, quedando por aclarar lo referente al efecto de distintas relaciones de precios insumo/producto.

LITERATURA CITADA

- CEICADAR. 1989. Informe Anual 1988. Plan Nochixtlán, Colegio de Postgraduados, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y CADER Nochixtlán. Nochixtlán, Oax., México.
- CIMMYT. 1969. El Proyecto Puebla 1967-1969. CIMMYT, México, D.F., México.
- Cuanalo de la C., H. 1989. Metodología para la definición de agrohábittats. Serie Cuadernos de Edafología 14. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México.
- Cuanalo de la C., H. y R. Ponce H. 1981. Agrohábittat y agroecosistema. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx., México.
- Cuanalo de la C., H., E. Ojeda T., A. Santos D. y C. Ortiz S. 1989. Provincias, regiones y subregiones terrestres de México. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx., México.
- Díaz C., H. 1990. Manual para estimar rendimientos de maíz y determinar el uso de la tierra en programas de desarrollo agrícola regional. CEICADAR--CEDERU, Colegio de Postgraduados, Puebla, Pue., México.
- Etchevers B., J. 1988. Interpretación de los análisis químicos de suelo. pp. 180-196. In: Etchevers B., J. (ed.). Diagnóstico de la fertilidad del suelo. CEICADES, Colegio de Postgraduados, H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Etchevers B., J., J. Rodríguez S. y A. Galvis S. 1991. Generación de recomendaciones de fertilización mediante un enfoque sistémico racional. Terra 9: 3-10.
- Flores M., J.P. 1988. Determinación de clases 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, Méx., México.
- Frausto R., J. 1987. Identificación y caracterización de los principales factores físicos y sociales que influyen en el deterioro de los recursos suelo y agua en Nochixtlán, Oax. CEICADAR, Colegio de Postgraduados, Nochixtlán, Oax., México. (Mimeografiado).
- Galvis S., A., J.D. Etchevers B. y J. Rodríguez S. 1993. Estimación de rendimientos máximos alcanzables de maíz en áreas de temporal del estado de Tlaxcala. Terra: 226-234.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Tercera edición. Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F., México.

- Greenwood, D.J. 1983. Quantitative theory and the control of soil fertility. *New Phytol.* 94: 1-18.
- Laird, R.J. 1966. Metodología empleada para estudiar las necesidades de los fertilizantes. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, México, D.F., México.
- Laird, R.J. 1977. Investigación agronómica para el desarrollo de la agricultura tradicional. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx., México.
- Obrador O., J.J. 1994. Validación de parámetros de planta y clima que se utilizan en un modelo simplificado destinado a determinar dosis de fertilización de nitrógeno, fósforo y potasio para maíz. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México.
- Rodríguez S., J. 1987. Desarrollo de normas de fertilización para el cultivo de maíz y de cebada en el estado de Tlaxcala. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México. (Mimeografiado).
- Rodríguez S., J. 1990. La fertilización de los cultivos: un método racional. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.
- Stanford, G. y S.J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.* 36: 465-472.
- Turrent F., A. 1978. El agrosistema: un concepto útil dentro de la disciplina de productividad. Escritos sobre la Metodología de la Investigación en Productividad de Agrosistemas Núm. 3. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx., México.
- Volke H., V. 1990. Metodología estadística y económica para la generación de tecnología en la agricultura. Serie Cuadernos de Edafología 16. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México.
- Volke H., V. 1993. La relación rendimiento óptimo económico/rendimiento máximo para maíz en el modelo de balance nutrimental para generar recomendaciones de fertilización. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México. (Mimeografiado).
- Volke H., V. y A. García M. 1994. Recomendaciones de fertilización para maíz en agrosistemas del sur del estado de Tlaxcala. Cuaderno de Edafología 23. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México.
- Volke H., V., M. Bravo E. y F. Gavi R. 1994. Fertilización para maíz de temporal en la región Mixteca de Cárdenas, Oaxaca. Cuaderno de Edafología 22. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx., México.