



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

TERRA

Volumen 13

Enero-Marzo de 1995

Número 1

TRABAJO
INVITADO

DIVISION I

Retos y oportunidades de la ciencia del suelo al inicio del siglo XXI.

A. AGUILAR S. 3

Herramientas de análisis espacial en la definición del uso potencial del suelo: caso de la RH36.

Ch. BOUVIER y
J. ESTRADA A. 17

Perspectivas de la percepción remota de las propiedades físicas de los suelos.

K. OLESCHKO. 30

DIVISION II

Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de compuestos nitrogenados y producción de materia seca en cebolla.

H.R. URIBE M.,
G. ALCANTAR G.,
J.L. TIRADO T.,
A. AGUILAR S. y
M. SANDOVAL V. 49

Colonización de las raíces de *Phaseolus vulgaris* L. por cepas autóctonas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*.

E. CORONADO R.,
J.M. SANCHEZ Y.,
J.J. PEÑA C. y
P.E. MORENO Z. 60

Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la inoculación con bacterias fijadoras de nitrógeno.

M.M. GARCIA G.,
J.M. SANCHEZ Y.,
J.J. PEÑA C. y
P.E. MORENO Z. 71

EDITORIAL

Trabajo Invitado

- Retos y oportunidades de la ciencia del suelo al inicio del siglo XXI. A. AGUILAR S. 3

Artículos Científicos

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

- Herramientas de análisis espacial en la definición del uso potencial del suelo: caso de la RH36. Ch. BOUVIER y J. ESTRADA A. 17
- Perspectivas de la percepción remota de las propiedades físicas de los suelos. K. OLESCHKO. 30

División II: Relación Suelo-Clima-Biota

- Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de compuestos nitrogenados y producción de materia seca en cebolla. H.R. URIBE M., G. ALCANTAR G., J.L. TIRADO T., A. AGUILAR S. y M. SANDOVAL V. 49

- Colonización de las raíces de *Phaseolus vulgaris* L. por cepas autoctonas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*. E. CORONADO R., J.M. SANCHEZ Y., J.J. PEÑA C. y P.E. MORENO Z. 60

- Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la inoculación con bacterias fijadoras de nitrógeno. M.M. GARCIA G., J.M. SANCHEZ Y., J.J. PEÑA C. y P.E. MORENO Z. 71

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

- Fertilización del agave tequilero (*Agave tequilana* Weber) en la región de Tequila, Jalisco, México. A.G. VALENZUELA Z. y D.R. GONZALEZ E. 81

- Fertilización fosfatada en dos gramíneas forrajeras de las sabanas de huimanguillo tabasco, México. C. GUZMAN E. y F. PUENTE F. 96

Comentarios y Cartas al Editor

- Comentario sobre uso correcto de palabras. J. ALVARADO L. 107

COMISION EDITORA

DR. JORGE D. ETCHEVERS B.,
Editor en jefe
DR. JAVIER Z. CASTELLANOS,
Editor adjunto
DR. ANDRES AGUILAR SANTELISES,
Editor técnico
DRA. KLAUDIA OLESCHKO,
Editor técnico
DR. JUAN JOSE PEÑA CABRIALES,
Editor técnico
M.C. JORGE ALVARADO LOPEZ,
Editor de estilo

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

DR. NICOLAS AGUILERA HERRERA, México
DR. GABRIEL ALCANTAR GONZALEZ, México
DR. MANUEL ANAYA GARDUÑO, México
DR. JESUS CABALLERO MELLADO, México
DR. LENOM J. CAJUSTE, México
DR. RONALD FERRERA CERRATO, México
DR. BENJAMIN FIGUEROA SANDOVAL, México
M.C. MARGARITA E. GUTIERREZ RUIZ, México
DR. REGGIE J. LAIRD, México
DR. ANGEL MARTINEZ GARZA, México
DR. ROBERTO NUÑEZ ESCOBAR, México
DR. JOSE LUIS OROPEZA MOTA, México
M.C. CARLOS ORTIZ SOLORIO, México
DR. ALEJANDRO VELAZQUEZ MARTINEZ, México
DR. ENRIQUE PALACIOS VELEZ, México
DR. OSCAR L. PALACIOS VELEZ, México
DR. BENJAMIN V. PEÑA OLVERA, México
DR. ANTONIO TURRENT FERNANDEZ, México

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

DR. EDUARDO BESOAIN M., Chile
DR. WINFRIED E.H. BLUM, Austria
DR. ELMER BORNEMISZA, Costa Rica
DR. LUIS ALFREDO DE LEON, Colombia
DR. HARI ESWARAN, USA
DR. JUAN F. GALLARDO LANCHO, España
DR. RENATO GREZ Z., Chile
DR. ALBERTO HERNANDEZ, Cuba
DR. JOSE M. HERNANDEZ MORENO, España
DR. ERIC S. JENSEN, Dinamarca
DR. WALTER LUZIO LEIGHTON, Chile
DR. JOHN T. MORAGHAN, USA
DR. HECTOR J. M. MORRAS, Argentina
DR. CHRISTIAN PRAT, Francia
DR. PARKER F. PRATT, USA
DR. PAUL QUANTIN, Francia
DR. JOSE RODRIGUEZ, Chile
DR. CARLOS ROQUERO, España
DR. KARL STAHR, Alemania
DR. RAFAEL VILLEGAS, Cuba
DR. EDUARDO ZAFFARONI, Brasil

CUERPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

M.C. ROBERTO QUINTERO LIZAOLA,
Distribución
SRA. CARELINA C. AALMERS DE AGUILAR,
Administración
SRA. MARCELINA ESPEJEL E.,
Producción

"TERRA", Registro en Trámite. Organismo científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.

Volumen 13-1, enero-marzo 1995.

ISSN 0187-5779

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total del contenido 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, al: Editor de la Revista TERRA, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Edo. de México, México.

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

Teléfono: (595) 4-22-00, ext. 5237.

EDITORIAL BOARD

DR. JORGE D. ETCHEVERS B.,
Editor-in-chief
DR. JAVIER Z. CASTELLANOS,
Associate editor
DR. ANDRES AGUILAR SANTELESIS,
Technical editor
DRA. KLAUDIA OLESCHKO,
Technical editor
DR. JUAN JOSE PEÑA CABRIALES,
Technical editor
M.C. JORGE ALVARADO LOPEZ,
Style editor

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

DR. NICOLAS AGUILERA HERRERA, Mexico
DR. GABRIEL ALCANTAR GONZALEZ, Mexico
DR. MANUEL ANAYA GARDUÑO, Mexico
DR. JESUS CABALLERO MELLADO, Mexico
DR. LENOM J. CAJUSTE, Mexico
DR. RONALD FERRERA CERRATO, Mexico
DR. BENJAMIN FIGUEROA SANDOVAL, Mexico
M.C. MARGARITA E. GUTIERREZ RUIZ, Mexico
DR. REGGIE J. LAIRD, Mexico
DR. ANGEL MARTINEZ GARZA, Mexico
DR. ROBERTO NUÑEZ ESCOBAR, Mexico
DR. JOSE LUIS OROPEZA MOTA, Mexico
M.C. CARLOS ORTIZ SOLORIO, Mexico
DR. ALEJANDRO VELAZQUEZ MARTINEZ, Mexico
DR. ENRIQUE PALACIOS VELEZ, Mexico
DR. OSCAR L. PALACIOS VELEZ, Mexico
DR. BENJAMIN V. PEÑA OLVERA, Mexico
DR. ANTONIO TURRENT FERNANDEZ, Mexico

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

DR. EDUARDO BESOAIN M., Chile
DR. WINFRIED E.H. BLUM, Austria
DR. ELMER BORNEMISZA, Costa Rica
DR. LUIS ALFREDO DE LEON, Colombia
DR. HARI ESWARAN, USA
DR. JUAN F. GALLARDO LANCHO, Spain
DR. RENATO GREZ Z., Chile
DR. ALBERTO HERNANDEZ, Cuba
DR. JOSE M. HERNANDEZ MORENO, Spain
DR. ERIC S. JENSEN, Denmark
DR. WALTER LUZIO LEIGHTON, Chile
DR. JOHN T. MORAGHAN, USA
DR. HECTOR J. M. MORRAS, Argentina
DR. CHRISTIAN PRAT, France
DR. PARKER F. PRATT, USA
DR. PAUL QUANTIN, France
DR. JOSE RODRIGUEZ, Chile
DR. CARLOS ROQUERO, Spain
DR. KARL STAHR, Germany
DR. RAFAEL VILLEGAS, Cuba
DR. EDUARDO ZAFFARONI, Brazil

EDITORIAL STAFF

M.C. ROBERTO QUINTERO LIZAOLA,
Distribution
SRA. CARELINA C. AALMERS DE AGUILAR,
Management
SRA. MARCELINA ESPEJEL E.,
Production

"TERRA", Registration pending. Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science.

Volume 13-1, January-March 1995.

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, Edo. de México, México.

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

Telephone: 52-595-42200, ext. 5237.

INDEX

Invitational paper

Challenges and opportunities in soil science in the dawn of the 21st century. A. AGUILAR S. 3

Scientific Articles

Division I: Diagnosis Methodology and Evaluation of the Soil Resource

Spatial analysis software applied to land use planning: the case of the Hydrological Region 36 of Mexico.. Ch. BOUVIER and J. ESTRADA A. 17

Opportunities in remote sensing of soil physical properties. K. OLESCHKO. 30

División II: Soil-Climate-Biota Relationship

Effect of N fertilization on the contents of N compounds and dry matter yield of onion. H.R. URIBE M., G. ALCANTAR G., J.L. TIRADO T., A. AGUILAR S. and M. SANDOVAL V. 49

Colonization of the root system of *Phaseolus vulgaris* L. by indigenous strains of *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*. E. CORONADO R., J.M. SANCHEZ Y., J.J. PEÑA C., and P.E. MORENO Z. 60

Response of maize (*Zea mays* L.) to inoculation with nitrogen fixing bacteria. M.M. GARCIA G., J.M. SANCHEZ Y., J.J. PEÑA C., and P.E. MORENO Z. 71

División III: Use of the Soil Resource

Fertilization of *Agave tequilana* Weber of Tequila, Jalisco, Mexico. A.G. VALENZUELA Z. y D.R. GONZALEZ E. 81

Phosphorus fertilization in two gramineae forage crops from Huimanguillo, Tabasco, Mexico. C. GUZMAN E., and F. PUENTE F. 96

Comments and Letters to the Editor

Comment about correct use of words. J. ALVARADO L. 107

EDITORIAL

BENEFICIOS QUE PODEMOS OBTENER DE LA ORGANIZACION EN MEXICO DEL XV CONGRESO MUNDIAL

El XV Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo fue un éxito en muchos sentidos. Todos los miembros de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo podemos sentirnos satisfechos de haber cumplido bien la tarea de organizar la reunión más importante a nivel mundial en suelos. El número 7 del boletín SUELO, que recientemente fue distribuido, contiene una serie de comentarios de los participantes en Acapulco que constituyen una clara evidencia que nuestra labor generó resultados que fueron calificados como muy buenos por los científicos más destacados del mundo.

La inversión también fue muy grande, tanto por lo referente al trabajo que muchos miembros de la SMCS generosamente ofrecieron, como por el dinero que muchas instituciones nacionales y extranjeras aportaron. Con gran alivio y satisfacción informamos que la organización del evento produjo una suma pequeña, pero significativa, que nos ha permitido amueblar y equipar a las oficinas de la SMCS y que facilitará el desarrollo de nuestras actividades en el futuro inmediato, actividades centrales como son la publicación de TERRA y la realización de nuestros congresos anuales. Sin embargo, aun cuando el terminar con un saldo financiero positivo en un evento de esta magnitud constituye un logro considerable, definitivamente no se justificaría, por este solo hecho, la enorme empresa que fue la celebración del Congreso. A continuación hago mención de algunos de los frutos que podemos recoger como beneficios derivados del Congreso.

Los libros de memorias contienen una colección de información actualizada de nuestro campo de trabajo que puede y debe ser usada como auxiliar para la planeación y ejecución de nuestras propias investigaciones. Prácticamente todas las bibliotecas nacionales relacionadas con los temas del congreso ya han recibido un ejemplar completo. Muchos de los simposios fueron planeados para cubrir temas de utilidad a Latinoamérica, en general, y a México en particular. A través de las páginas de estos libros se encuentra mucha información útil para resolver problemas técnicos y científicos, para fundamentar nuestras investigaciones y enriquecer nuestra labor docente. Obviamente, ahora debemos todos recoger estos frutos mediante el estudio y análisis de lo impreso en los libros; de no ser así, estaremos abandonando el trabajo realizado y desperdiciando sus resultados.

Las guías técnicas de los recorridos de campo en México contienen una gran cantidad de información sobre suelos de México. Gran parte de su planeación, muestreo, análisis físicos y químicos y clasificación de suelos fue realizada en colaboración con expertos de Estados Unidos. Estas guías podrían servir de referencia para los viajes de estudio que hacen algunas instituciones educativas del País. Los datos presentados en estos libros pueden servir como auxiliares para estudios de investigación.

Muchos colegas mexicanos establecieron, a través del congreso, nuevas relaciones con científicos extranjeros. Estas relaciones pueden ser el punto de partida para la ejecución de proyectos, estudios de

capacitación y pueden constituir un medio de comunicación extremadamente útil para obtener beneficios importantes para el desarrollo de la ciencia del suelo en México. En la planeación del Congreso se hizo evidente que nos falta personal capacitado en muchas áreas de la ciencia del suelo; colegas jóvenes nuestros fueron puestos en comunicación con especialistas científicos internacionales con el propósito de cumplir las tareas del Congreso y a la vez generar la oportunidad para estos jóvenes de continuar formándose profesionalmente. Es importante que se cultiven esas nuevas relaciones y se aprovechen para capacitar personal mexicano.

La Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo, así como todas las sociedades nacionales, están pasando por un proceso de actualización que las conduce hacia cambios fundamentales en sus objetivos, estructuras y funcionamiento en general. El lema del Congreso: **Uso del suelo en armonía con la naturaleza**; implica una nueva orientación de nuestro trabajo que va de un paradigma netamente agrícola hacia otro en que la importancia del medio ambiente nos lleva a estudiar al suelo como un recurso natural fundamental para la mayoría de las actividades humanas. Todo el conocimiento que los miembros de la SMCS han obtenido, mediante el congreso mundial, debe ser aprovechado para reestructurar a la SMCS de manera que sea más útil para sus socios y para la Sociedad Mexicana en general. Definitivamente, es

urgente que la SMCS emprenda un profundo análisis de sus objetivos, procedimientos y estructura. El nuevo paradigma adoptado gradualmente por los centros de investigación y educación internacionales, organismos gubernamentales y no gubernamentales, así como todos los elementos analizados por ellos, deben servir para enriquecer nuestros propios análisis y conclusiones. Para cosechar estos frutos necesitamos trabajar mucho, los elementos de trabajo están disponibles, falta aprovecharlos para conseguir la utilidad que nos beneficie a través de la superación de la SMCS.

Muchos otros beneficios pueden ser obtenidos por la SMCS del XV CMCS. Sin embargo, al igual que en el campo, la cosecha no se levanta sola, se requiere ejecutar una actividad más para disfrutar de su valor. Se requiere que las actividades de la SMCS, parcialmente interrumpidas durante la preparación del XV CMCS, vuelvan a surgir con mayor vigor, levantando la cosecha del XV CMCS para beneficio de la SMCS. Solamente así habrá valido el esfuerzo de que XV CMCS se efectuara en México. Espero que en noviembre de este año, en nuestro próximo congreso nacional en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Ciudad Victoria, se inicie una nueva fase de la vida de la SMCS, mucho más eficiente, mucho más productiva.

Dr. Andrés Aguilar S.

RETOS Y OPORTUNIDADES DE LA CIENCIA DEL SUELO AL INICIO DEL SIGLO XXI

Challenges and Opportunities in Soil Science
in the Dawn of the 21st Century

Andrés Aguilar Santelises

Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo,
56230 Chapingo, México.

Palabras clave: Ciencia del suelo, Campo de acción, Identidad.

Index words: Soil Science, Scope, Identity.

RESUMEN

La ciencia del suelo es una ciencia joven entre las ciencias y su campo de acción y su identidad están en proceso de definición especialmente cuando, al inicio del siglo XXI, el recurso suelo juega un papel fundamental en la producción de alimentos para la creciente población mundial y en la conservación de un ambiente propicio para la vida. En este artículo se discuten: a) la definición del suelo y b) las funciones del suelo como: productor de biomasa; filtro de regulador y transformador; hábitat biológico y reserva genética; medio físico para la construcción de estructuras técnicas e industriales; fuente de materias primas y herencia cultural. Se discuten las funciones del suelo en relación con los conceptos de agricultura y manejo sostenibles del suelo.

Recibido 11-94.

SUMMARY

Soil science is a young science among other sciences and its scope and identity are, at the present time, subjected to a process of analysis and definition; particularly now, in the dawn of the 21st century when the soil resource plays a fundamental role in food production and environmental protection. In this paper the author discusses the definition of soil and soil functions: biomass production, filtering, buffering and transforming actions; biological habitat and gene reserve; physical medium for infrastructures; source of raw materials and cultural heritage. These soil functions are discussed in relation to the concepts of sustainable agriculture and sustainable soil management.

INTRODUCCION

Al finalizar el siglo XX la humanidad enfrenta enormes retos para sostener y, de ser posible, mejorar el nivel de vida de la población mundial. Estos retos se derivan del rápido crecimiento de la población, el cual ejerce una enorme presión sobre los recursos naturales y afecta todas las

actividades del hombre, ya sean políticas, económicas, culturales o científicas. Se estima que la población se incrementa actualmente en casi 100 millones de personas por año con lo que el mundo llegará al año 2025 con una población de 8300 millones de

habitantes (Cuadro 1). Este acelerado incremento de la población mundial está acompañado de una enorme demanda de alimentos y del agotamiento de los recursos naturales esenciales para el desarrollo de todos los organismos; esto constituye el reto.

Cuadro 1. Estimaciones de la población mundial.

Región	Población (millones)			Incremento 1990-2025
	1990	2000	2025	
Economías de ingresos bajos y medios				%
Africa (sur del Sahara)	495	668	1 229	148
Asia oriental y pacífico	1 577	1 818	2 276	44
Asia del sur	1 148	1 377	1 896	65
Europa	200	217	252	26
Medio oriente y norte de Africa	256	341	615	140
América Latina y Caribe	433	515	699	61
Sub total	4 146	4 981	7 032	70
Otras economías¹⁾	321	345	355	11
Economías de altos ingresos	816	859	915	12
Mundo	5 284	6 185	8 303	57

1) Esta clasificación incluye a la antigua Unión Soviética, Cuba, República Popular Democrática de Corea, de las que no se cuenta con información confiable.

Fuente: Cuadro preparado por Borlaug y Dowsell (1994) con información del Cuadro 26 del World Development Report 1992.

El evidente impacto de las actividades humanas sobre los recursos naturales está alertando a la población mundial sobre la necesidad imperiosa de entrar en acción y los medios de comunicación han empezado a unir a los pueblos del mundo en una lucha en favor de los recursos naturales; una lucha global en la que las fronteras políticas no deben obstaculizar las acciones necesarias.

Obviamente, los recursos naturales disponibles no son ilimitados y su sensible reducción y deterioro han dirigido la

atención del mundo hacia el concepto de desarrollo sostenible como una meta hacia la cual se están canalizando enormes esfuerzos en todo el planeta. Esta es una meta muy lejana, difícil de alcanzar, pero la lucha por lograrla puede seguramente producir resultados parciales de la mayor utilidad; detectando el peligro, definiendo el reto y evaluando las necesidades, avanzamos en la ruta que nos conducirá hacia la solución del problema.

Por otra parte, contamos con ciencia y tecnología avanzadas que pueden ser la

herramienta fundamental para lograr un desarrollo sustentable.

Quienes nos ocupamos del estudio del suelo tenemos la tarea, ante el resto de la comunidad, de encauzar nuestras actividades hacia el conocimiento, aprovechamiento y conservación de un recurso natural de máxima importancia. Conscientes de nuestra tarea debemos definir objetivos, trazar rutas de trabajo y organizar nuestras acciones.

DEFINICIONES DE SUELO

Para analizar la identidad y el campo de acción de la ciencia del suelo y de las organizaciones nacionales e internacionales relacionadas con su estudio, uso y conservación, es imprescindible tener una clara definición de lo que es el suelo. Esto, sin embargo, no es simple. Para un ingeniero minero el suelo es el detrito que cubre a las rocas o a los minerales que deben ser excavados, para él es un estorbo y debe ser removido; a su vez, un constructor de caminos puede ver al suelo como el material sobre el cual se construye el piso del camino y lo estudia en cuanto a la estabilidad que sus características puedan impartir a la construcción; algo similar será para cualquier persona ocupada de la construcción de casas, edificios, puentes, presas, etc.

Es significativo que en la mayoría de los diccionarios, el suelo se describe solamente como la superficie de la tierra, el piso de una habitación o casa, el pavimento, el solar de un edificio; el terreno en que pueden asentarse los vegetales (Anaya, 1991; Real Academia Española, 1984). En contraste, al definir al agua se menciona su

fórmula química, sus propiedades físicas y químicas y se reconoce su abundancia y su carácter esencial para la vida.

Indiscutiblemente, es importante estudiar al suelo y generar conceptos útiles para entender la forma en que podemos beneficiarnos de su uso; para comprender bien su valor y para saber como conservarlo para las futuras generaciones. Así, los usos del suelo han generado diferentes necesidades en cuanto al estudio de sus características y su comportamiento; sin embargo, convenientemente podemos identificar dos corrientes principales que predominaron entre los científicos del suelo hace cuatro o cinco décadas y que aún distinguen el campo de acción de dos corrientes de especialistas dentro del campo general de la ciencia del suelo (Buckman y Brady, 1966). La pedología, que estudia el origen del suelo, su clasificación y su descripción detallada como un cuerpo natural y no toma mucho en cuenta su uso práctico inmediato, y la edafología, que estudia al suelo como un medio para el desarrollo de las plantas, analiza sus características y todos los procesos que en él se presentan, manteniendo atención en sus efectos sobre el desarrollo de las plantas.

Para un agricultor, el suelo constituye el hábitat de las plantas que cultiva, por lo cual aprecia su valor, ya que las cosechas evidentemente dependen en gran parte de su calidad. Así, se ha definido al suelo como el mineral no consolidado o material en la superficie de la tierra que sirve como un medio natural para el desarrollo de las plantas terrestres (SSSA, 1987).

Desde un punto de vista más general que el anterior y tomándolo como un producto natural, el suelo ha sido ampliamente aceptado como "el material no consolidado, mineral u orgánico sobre la superficie de la tierra que ha sido sometido e influenciado por factores genéticos y ambientales: material parental, clima (incluyendo efectos causados por el agua y la temperatura), macro y microorganismos, y topografía, todos actuando durante el tiempo y produciendo un producto - el suelo - que difiere, del material del cual se derivó, en muchas características y propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas" (SSSA, 1987).

De manera similar: "el suelo es el producto de la alteración, de la remoción y de la organización de las capas superiores de la corteza terrestre bajo la acción de la vida, la atmósfera y de los cambios de temperatura que se manifiestan". El suelo es pues un medio complejo y dinámico que está evolucionando bajo la influencia de factores externos (hidrosfera, atmósfera y biosfera). Sus propiedades se obtienen progresivamente bajo la acción combinada de varios factores: la roca madre se altera bajo la influencia del clima y de una vegetación inicial; la materia orgánica se mezcla con el suelo, los minerales de la roca se alteran y la materia orgánica se degrada lentamente, primero en humus fresco, posteriormente en ácido carbónico, agua, amonio y nitratos. Finalmente, los elementos minerales y orgánicos pueden ser desplazados por el agua de la lluvia infiltrada y diferenciar así al suelo en una sucesión de capas de textura, estructura y colores diferentes, llamadas horizontes. El suelo, así

definido, tendrá un grado de desarrollo dependiente de la manera y del tiempo en que ha sido sometido a la acción de los factores pedogenéticos. El suelo es consecuentemente una estructura tetradimensional (tiempo, espacio) en la cual persisten y transitan:

- los productos de la alteración de la capa mineral superficial del globo;
- las materias orgánicas muertas o vivas de la biomasa asociadas a esa capa superficial;
- los elementos provenientes de la atmósfera, o de la labranza accidental, o de la labranza cíclica (Lozet y Mathieu, 1990).

En las últimas décadas ha crecido gradualmente el reconocimiento a la importancia del suelo y de las ciencias del suelo en relación con la calidad del medio ambiente. La visión del suelo como interfase entre la atmósfera y la litosfera: la pedosfera, amplía enormemente el campo de acción de la ciencia del suelo y sus aplicaciones. La participación de los científicos del suelo en proyectos como el Programa sobre Cambio Global iniciado por el Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU, según sus siglas en inglés) mediante una serie de reuniones científicas y publicaciones (Arnold *et al.*, 1990; Batjes y Bridges, 1992; Bouwman, 1990; Sombroek, 1990) han ayudado a ampliar y actualizar el concepto de suelo. De estos trabajos, han surgido definiciones más amplias de suelo, tales como: "el suelo es un sistema estructural, complejo, polifuncional, abierto, polifásico, localizado en la parte superficial de la litósfera. Los suelos cubren toda la

superficie de la tierra y el fondo de las aguas poco profundas como parte de un "continuum" o manto, excepto en las rocas

desnudas. Este manto se denomina "pedosfera" (Arnold *et al.*, 1990; Sposito y Reginato, 1992) (Figura 1).

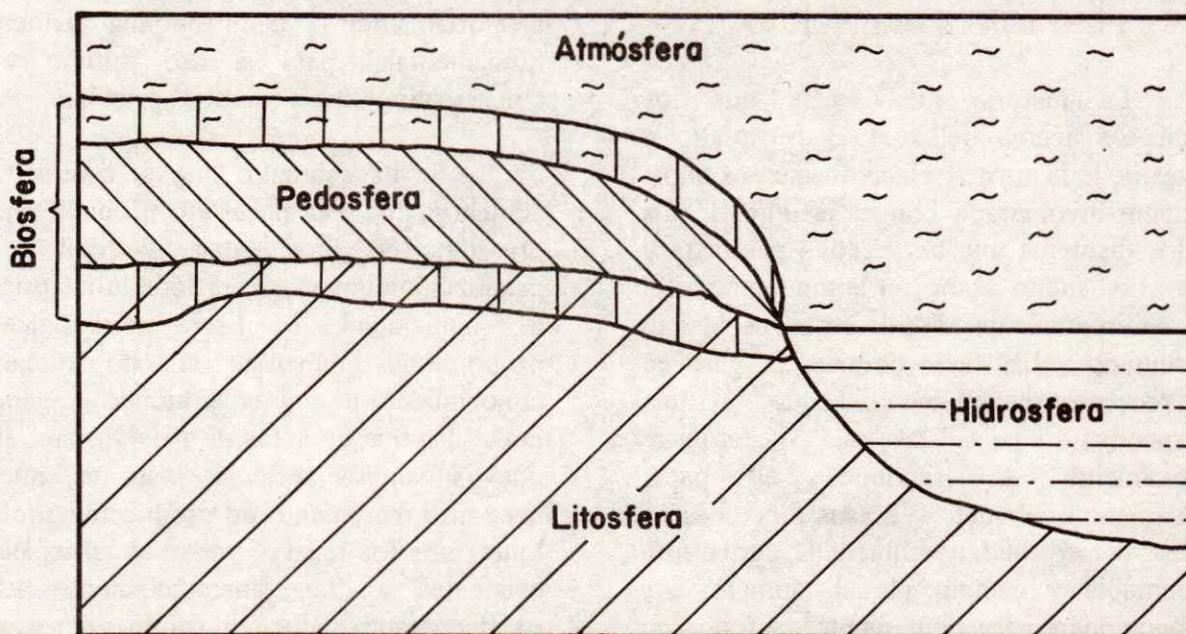


Figura 1. La pedosfera en el sistema biosfera-geosfera.

Fuente: Arnold *et al.*, 1990.

La ciencia del suelo estudia al suelo como un fenómeno natural, no solamente considerando su parte superficial sino también sus capas más profundas, como una membrana que separa y a la vez comunica a la atmósfera, a la litosfera y a la biosfera.

El reto para la ciencia del suelo básica es investigar profundamente este sistema natural; interaccionar con muchas otras disciplinas para desarrollar un concepto cada vez más holístico del medio ambiente y funcionamiento de los sistemas terrestres. Este tipo de investigación debe llevarse a

cabo en paralelo con las investigaciones básicas en otras geo y biociencias para proveer el conocimiento fundamental para desarrollar las soluciones duraderas y efectivas de los problemas de la agricultura, comercio, control ambiental, etc., que se relacionen con el recurso natural suelo (Sposito y Reginato, 1992).

El concepto de suelo, en relación con el medio ambiente y, específicamente, con problemas de protección del suelo, ha sido ampliado para incluir también aquellos sedimentos porosos y materiales rocosos

permeables junto con el agua que contienen. Así, el suelo puede alcanzar profundidades considerables (Blum, 1988; Blum y Aguilar, 1994) (Figura 2).

FUNCIONES DEL SUELO

La historia nos señala que los conceptos acerca del suelo han variado a través de la historia. Hace doscientos años, la gente involucrada con el estudio de los suelos mantenía una perspectiva paisajista y veía a los suelos como un componente vital del medio ambiente. Desde entonces, se han presentado varias fases dominantes pero en el presente estamos volviendo a una perspectiva paisajista y ecológica. Actualmente se reconoce el papel fundamental del suelo y de sus funciones en temas como calidad ambiental, agricultura sustentable y cambio global, aunque este reconocimiento frecuentemente solo alcanza un nivel conceptual, teórico, sin llegar a reflejarse en actividades prácticas (Krupenikov, 1993; Warkentin, 1992).

Así, al suelo se le atribuyen seis funciones principales que usualmente no se presentan simultáneamente en un área determinada. Tres de estas funciones son mayormente ecológicas y tres más están fundamentalmente relacionadas con las actividades humanas (Figura 3).

La primera función es la producción de biomasa, operando como una base para la vida, abasteciendo a animales y hombres con alimento, energía renovable y materias primas. En este sentido, el suelo sirve como un sustrato nutritivo que proporciona aire, agua y elementos nutritivos, además de

constituir la base física para las raíces de las plantas. Indiscutiblemente la producción mundial de alimentos depende, entre otros factores, de la disponibilidad de terrenos agrícolas. Aquí, el papel de la ciencia del suelo se enlaza con el de otras disciplinas, proporcionando a la agronomía elementos fundamentales para el uso óptimo y la conservación de los campos agrícolas.

Se ha estimado que la cantidad de alimentos que será necesario producir en los próximos 50 años iguala al total de la producción alimentaria en toda la historia de la humanidad. Este reto alcanza proporciones inmensas cuando tomamos conocimiento de que en el mundo en general no se dispone de áreas de reserva para abrir nuevos campos agrícolas; esto es, que el necesario incremento de producción se debe lograr con los mismos recursos agrícolas ya existentes y que, lamentablemente, estos recursos están reduciéndose en gran escala, un tanto por procesos naturales y en gran parte, por el manejo erróneo y, frecuentemente, por el abuso que el hombre ejerce sobre los recursos naturales (IWESLMDW, 1991).

La ciencia del suelo ha hecho grandes contribuciones para lograr la enorme producción de alimentos, especialmente en este siglo (Greenland, 1991) y esto explica que los objetivos y el campo de acción de la ciencia del suelo están íntimamente ligados a la agricultura. Esta es una relación y quizá una base tradicional de esta ciencia y justifica que en las estructuras de las instituciones de enseñanza e investigación, de la misma Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo y de las sociedades nacionales, se incluyan departamentos o secciones tales

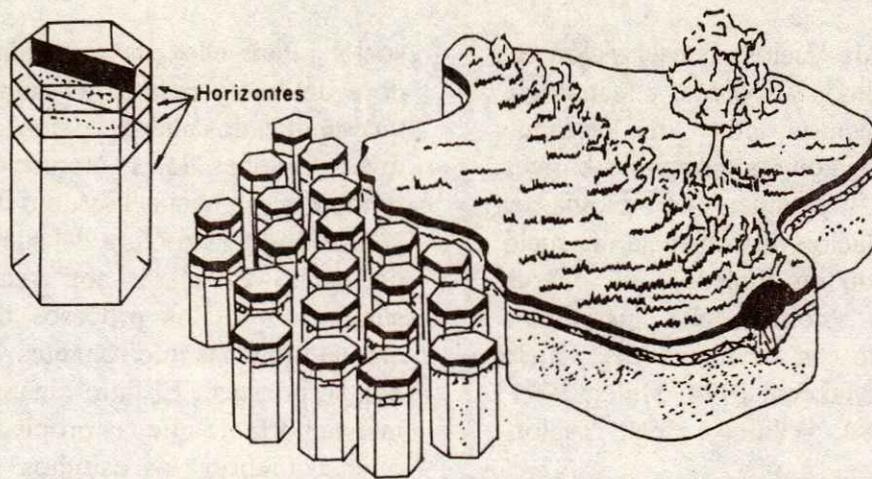


Figura 2. El suelo como un cuerpo tridimensional en la parte superior de la corteza terrestre incluyendo a los sedimentos porosos, el material parental rocoso y el agua subterránea en ellos (Blum, 1988).

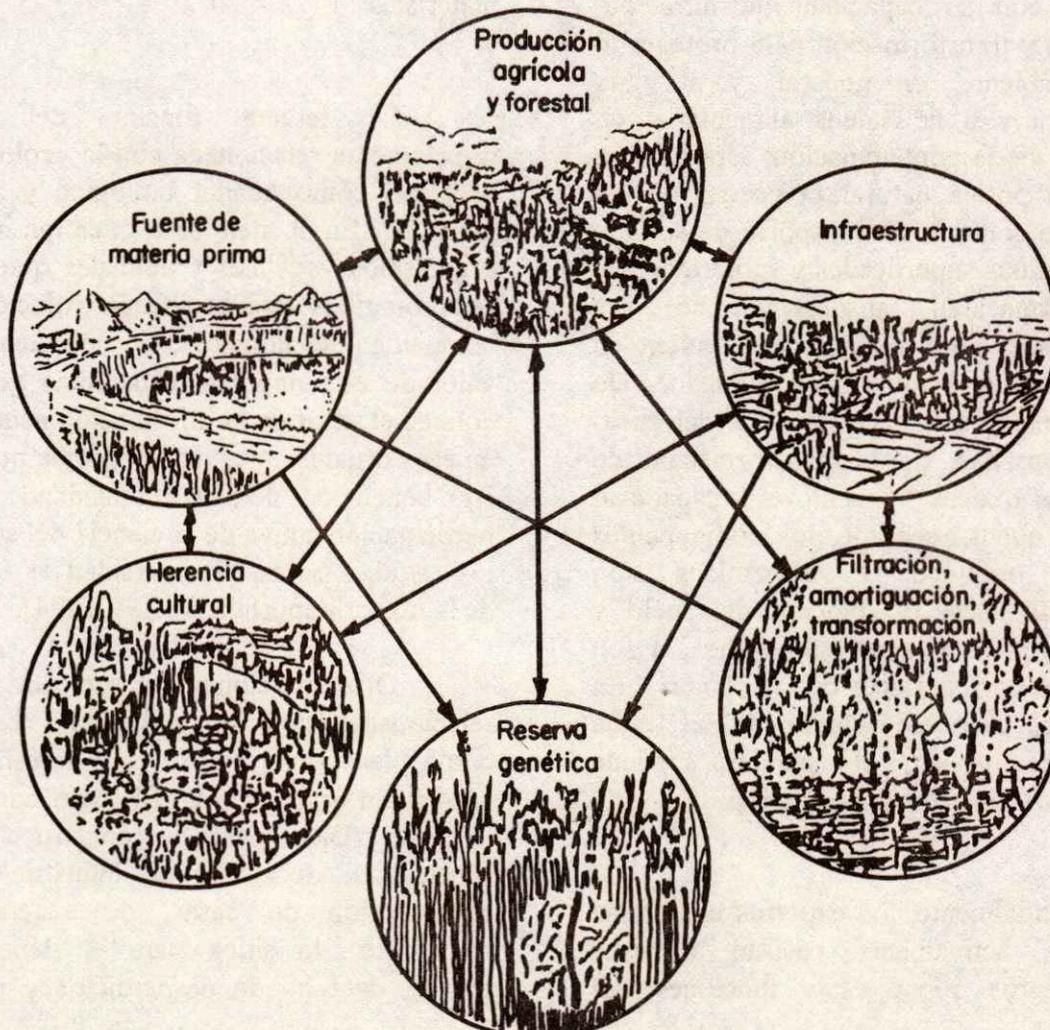


Figura 3. Las seis funciones principales del suelo (Blum, 1988).

como fertilidad de suelos, conservación de suelos, suelos salinos y sódicos, y tecnología de suelos, siempre con un enfoque agronómico, junto con las disciplinas básicas que son la física, la química y la biología del suelo. A esta relación de la ciencia del suelo con la producción de alimentos se refieren varios autores como el "paradigma agronómico" de la ciencia del suelo (Bullock, 1994; Makeev, 1994; Miller, 1991, 1993; Wild, 1989; Wilding, 1994; Yaalon, 1993).

La segunda función del suelo se relaciona con su capacidad de filtración, regulación y transformación para proteger al medio ambiente, en general, y al agua subterránea y a la cadena alimentaria, en particular, de la contaminación; esta función se explica por la naturaleza porosa de los suelos que controla el transporte de solutos hacia las aguas superficiales y subterráneas y a la capacidad absorbente de sus componentes químicos que le permiten en conjunto, actuar como filtro y regulador. De forma similar, la fauna y la flora del suelo son responsables de la transformación de sustancias tóxicas. Cuando esta capacidad del suelo queda rebasada, los componentes químicos, orgánicos e inorgánicos, son transferidos hacia la solución del suelo y desde allí, hacia el agua subterránea, o son absorbidos por las raíces de las plantas. En el primer caso se contamina el agua subterránea y en el segundo, puede contaminarse la cadena alimentaria.

Actualmente, los expertos en calidad del agua activamente revisan nuestros conocimientos sobre estas funciones del

suelo. Para ellos, la capacidad amortiguadora del suelo contra los cambios adquiere un significado nuevo, y los resultados de investigaciones de la interacción suelo-agua se multiplican hacia el estudio de la salinidad, la erosión, la estructura del suelo y la calidad del agua. El interés por crear modelos de simulación de los procesos del suelo está creando muchas interrogantes y aportaciones con respuestas. El flujo dinámico es mucho más importante que las propiedades estáticas o en equilibrio; los estudios clásicos sobre capacidad de intercambio de cationes abren sitio para los análisis sobre interacciones que afectan el destino y el transporte de materiales.

La tercera función del suelo, directamente relacionada con la ecología, es su papel como hábitat biológico y reserva genética. En el suelo se encuentran muchos organismos vegetales y animales que deben ser protegidos ante su posible extinción. La comunidad científica está consciente del valor de esta importante herencia genética, conoce el valor de la información acumulada en esos organismos y de su enorme potencial en beneficio de la humanidad. La participación activa de la ciencia del suelo en los estudios sobre biodiversidad es también de la mayor importancia (Lee, 1994).

Otras funciones del suelo están más relacionadas con las actividades humanas como la construcción, la industria, la recreación y la cultura. El suelo constituye la base física para la construcción de estructuras técnicas e industriales, la construcción de casas, de sistemas de transporte, de sitios para el deporte, el recreo, desecho de desperdicios y muchas

más. También constituye una fuente de materias primas como agua, arcillas, arena, grava, minerales, etc.

Finalmente, y no menos importante, la herencia cultural que representan los tesoros paleontológicos y arqueológicos que son una fuente única de información que debe ser protegida como un testimonio de la historia de la tierra y de la humanidad. Los objetos del pasado que se encuentran en el suelo no sólo sirven a la historia y la cultura en general, sino que, directamente, son de utilidad a la ciencia del suelo para el estudio de la pedogénesis.

Conviene aquí recordar la lección que representan las evidencias arqueológicas ubicadas en áreas actualmente desérticas, las que permanecen como mudos e inmóviles esqueletos de lo que fueron florecientes culturas, gracias, entre otros factores, a la disponibilidad de buenas tierras de cultivo, de agua limpia y de un ambiente benigno para el hombre.

La destrucción de los recursos naturales, ya sea por procesos naturales o por procesos inducidos por el hombre, debe servir para entender como conservar o, al menos, extender la vida útil de los mismos para beneficio de las futuras generaciones.

DESARROLLO SOSTENIBLE, AGRICULTURA SOSTENIBLE, MANEJO SOSTENIBLE DEL SUELO

Desde principios de los años 80 el concepto de desarrollo sostenible ha sido generado bajo la visión de que es posible armonizar las necesidades materiales de la

sociedad, el crecimiento de la población y el uso racional de los recursos naturales, de tal forma que la degradación ambiental se mantenga al mínimo. En 1993, la Asamblea General de las Naciones Unidas estableció la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo, posteriormente más conocida como la Comisión Brundtland por el nombre de la persona que la presidió.

En 1987 se publicó el libro *Our Common Future* (Brundtland *et al.*, 1988) que posteriormente fue aprobado por la ONU. En este libro se manifiesta la esperanza de que es posible satisfacer las necesidades humanas básicas para toda la población mundial y de manejar los recursos naturales y el medio ambiente de tal manera que las futuras generaciones encuentren un nivel de bienestar al menos similar al presente.

El concepto de desarrollo sostenible que presentó la Comisión Brundtland integró políticas económicas y ecológicas de tal forma que siempre que fuese necesario, los intereses ecológicos recibieron preferencia. Para lograr un desarrollo sostenible deben realizarse cambios fundamentales en las sociedades, tanto de los países en desarrollo como de los desarrollados, los cuales han sido propuestos y analizados a partir del reporte "Nuestro Futuro Común" hasta la fecha, por muchos autores.

Un producto importante de la Comisión Brundtland fue la decisión de la ONU, en 1989, de realizar la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo que tuvo lugar en Rio de Janeiro, Brasil, en junio de 1992. Uno de los resultados de esta Conferencia,

también conocida como Cumbre para la Tierra, es el documento conocido como Agenda 21 o Programa 21, que plantea un vasto plan de trabajo para el siglo 21 aprobado por 179 países reunidos en Río de Janeiro. Tal documento consta de 40 capítulos, entre los cuales se encuentran varios directamente relacionados con la

agricultura y con el suelo (Dooge *et al.*, 1991; Keating, 1993; Láng, 1994).

Concentrando la atención en el recurso suelo, el Cuadro 2 presenta los principales capítulos del Programa 21 y los principales temas sobre manejo de suelos (Sánchez, 1994).

Cuadro 2. Suelos y el Programa 21.

	Capítulo	Temas de suelos
9	Protección de la atmósfera	Regulación de flujos CO₂, CH₄ y N₂O desde el suelo
10	Ordenamiento sostenible de tierras	Degradación física y química de la tierra
11	Lucha contra la deforestación	Alternativas frente a prácticas agrícolas destructivas y la pérdida de fertilidad del suelo
12	Lucha contra la desertificación	Conservación de suelos y agua
13	Desarrollo sostenible de zonas de montaña	Control de la erosión
14	Agricultura y desarrollo sostenible	Combinación de fuentes orgánicas e inorgánicas de nutrimentos.

Fuente: Sánchez (1994).

Una definición de agricultura sostenible que puede servir como marco de referencia es la propuesta por Harwood (1990): "una agricultura que puede evolucionar indefinidamente hacia una mayor utilidad para la humanidad, hacia una mayor eficiencia en el uso de los recursos naturales y hacia un balance con el medio ambiente que sea favorable, tanto para los humanos como para la mayoría de las otras especies". Dentro de este marco general y con base en los conceptos anteriormente descritos de suelo y funciones del suelo, se puede definir al uso del suelo como el uso simultáneo, tanto en el tiempo como en el espacio, de las seis funciones del suelo y definir como manejo sostenible del suelo a la

armonización, tanto espacial como ecológica, de todos los tipos de uso del suelo. El principal problema de este concepto es, sin embargo, la competencia entre las seis funciones del suelo; por ejemplo, los usos de la tierra para producción agrícola y forestal, el uso del suelo como agente filtrante y amortiguador de compuestos orgánicos e inorgánicos y como hábitat para organismos vegetales y animales, son incompatibles con usos del suelo que lo destruyen. Por lo tanto, la armonización de todos los usos de la tierra implica un problema muy complejo que sólo se podrá resolver minimizando las pérdidas irreversibles de suelo que se presentan, por ejemplo, al construir edificios y carreteras, al

excavar, etc. Y deteniendo o reduciendo al máximo posible la degradación y la contaminación del suelo y de la tierra en general.

Resulta evidente, además, la necesidad de un enfoque integral basado en los conceptos anteriormente descritos para el estudio de los problemas relacionados con manejo sostenible del suelo y de los métodos para resolverlos. Para esto, como una consecuencia inmediata, está la necesidad de cooperación y coordinación con otras ciencias como la biología, la hidrología, la geología, la climatología, la medicina, etc.

En las páginas del libro intitulado: "El desierto invade a España?" se lee textualmente: "con cierta frecuencia se ha escrito que el suelo es el bien más precioso del planeta, ya que gracias a él existe la vegetación, que a su vez, ofrece alimento a los animales y, en última instancia, al hombre. Disquisiciones filosóficas al margen, el suelo es percibido como algo sumamente estable, que no puede desaparecer y que siempre está de una u otra forma a nuestra disposición. Pero nada más lejos de la realidad; el suelo es algo inestable y su uso agrícola no es la menor de las agresiones que sufre constantemente y que modifican su esencia misma, provocando incluso su desaparición".

Este tipo de aseveraciones en la literatura de divulgación científica son importantes y probablemente tan útiles como los estudios científicos sobre las propiedades del suelo y nos recuerdan también la importancia de la cooperación entre la

ciencia del suelo y las especialidades en sociología, educación, economía y política.

Mediante análisis históricos, se ha concluido que el colapso de la civilización maya tuvo su origen, en gran medida al menos, en el deterioro de los recursos naturales, especialmente del suelo (Deevey *et al.*, 1979; Laflen *et al.*, 1979; Laflen *et al.*, 1990) y que en diversas áreas del mundo la agricultura declinó y aun desapareció a consecuencia de la degradación del suelo, acelerada por inadecuadas prácticas de irrigación (Loudermilk, 1953).

La importancia de la conservación del suelo es innegable y la evaluación de la degradación de los suelos a consecuencia de las actividades humanas es esencial. Las causas principales de degradación del suelo y su efecto proporcional son: sobrepastoreo (35%), deforestación (30%); actividades agrícolas (28%); sobreexplotación (7%); e industrialización (1%) (Oldeman *et al.*, 1990a; 1990b).

Para finalizar esta sección, es conveniente recordar las palabras del Profesor Stanley W. Buol al término de su conferencia magistral, "El suelo, yugo de la sociedad con la tierra" en el XV Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo: "Los sueños visionarios sin la habilidad para llevarlos a cabo en la práctica son sueños vacíos. El suelo es el invisible, a veces ignorado y poco romántico, yugo que enlaza las esperanzas y las aspiraciones de la sociedad con la pragmática tierra. La sociedad está ligada al suelo. Aunque nuestro papel como estudiosos del suelo es rara vez glamoroso, siempre será necesario" (Buol, 1994).

COMENTARIOS FINALES

Malthus (1798) predijo que el crecimiento de la población rebasaría la capacidad para producir alimentos. Sin embargo, actualmente se mantiene la esperanza de alcanzar un equilibrio e incluso un desarrollo sostenible. La producción de alimentos se ha incrementado para satisfacer las necesidades de la población gracias a una serie de avances entre los que se encuentran importantes contribuciones de la ciencia del suelo. Los retos, sin embargo, son inmensos y los estudiosos del suelo tienen nuevamente la posibilidad de contribuir a las soluciones necesarias; por ejemplo, existe el convencimiento de que la falta de fertilidad del suelo es el factor más importante que limita los rendimientos agrícolas en los países en desarrollo (Borlaug y Dowswell, 1994), que una gran parte de los suelos salinos existentes se desarrollaron por efectos antropogénicos (irrigación) y que, a pesar de los esfuerzos realizados, la superficie ocupada por estos suelos sigue incrementándose (Szabolcs, 1994). También está entendiéndose cada vez más entre la comunidad internacional la importancia del suelo en un contexto ambientalista (Singer, 1994).

La ciencia del suelo es joven entre las demás ciencias y es importante que cada institución relacionada con el estudio y manejo del suelo contribuya al mejor conocimiento de los procesos que en él toman lugar y a aplicar esos conocimientos hacia la solución de problemas específicos, manteniendo una estrecha colaboración con los especialistas de todas las ciencias relacionadas y vigilando el impacto que cada

acción ejercida en el manejo del suelo pueda tener sobre el medio ambiente y la sociedad.

En el caso específico de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (SICS) se requiere desarrollar una clara identidad de la ciencia del suelo y la definición de sus campos de acción. Para lograrlo, la misma Sociedad debe analizar sus propios objetivos y reestructurarse convenientemente.

Recientemente la SICS definió las siguientes metas para el futuro inmediato:

1. Ampliar su membresía con integrantes provenientes de áreas diferentes a las ciencias agrícolas.
2. Expandir el campo de acción de la ciencia del suelo para incluir calidad alimentaria, geomedicina, manejo de ecosistemas, sostenibilidad de la biosfera, protección ambiental y medio ambiente urbano.
3. Intensificar el conocimiento fundamental de los sistemas edafológicos mediante un enfoque interdisciplinario más holístico, más dinámico y orientado hacia procesos específicos.
4. Identificación de indicadores preventivos de la degradación del suelo para lograr sustituir acciones de prevención por las de remediación.
5. Establecer una definición de calidad del suelo como indicador clave de un medio ambiente adecuado, enlazado al alimento, la tierra y los seres humanos.

6. Desarrollo de proyectos conjuntos; continuar con cursos para educar a la población en general sobre la importancia del suelo; celebrar simposios y talleres y desarrollar metodologías entre científicos del mundo en desarrollo y el mundo desarrollado.

Recientemente la SICS decidió establecer una comisión sobre Suelos y Medio Ambiente, subcomisiones de Suelos Forestales, Evaluación de Tierras, Remediación de Tierras y grupos de trabajo sobre Criosoles, Suelos en ecosistemas desérticos, Suelos urbanos y periurbanos, Base Mundial de información sobre el recurso suelo, Fertilizantes orgánicos y mejoradores y un comité permanente sobre Historia de la Ciencia del Suelo.

La reciente admisión de la SICS en el Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU) abre la posibilidad de grandes avances. Las contribuciones científicas presentadas en el XV Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo en 1994, señalan el camino que puede llevar a la ciencia del suelo a engrandecer su imagen entre el resto de las ciencias y a contribuir más eficientemente al establecimiento de un desarrollo sostenible.

LITERATURA CITADA

- ANAYA. 1991. Diccionario Anaya de la Lengua. Grupo Anaya S.A. Madrid, España.
- ARNOLD, R.W., I. SZABOLCS y V.O. TARGULIAN. 1990. Global Soil Change. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Austria.
- BATJES, N.H. y E.M. BRIDGES. 1992. A review of soil factors and process that control fluxes of heat, moisture and greenhouse gases. Technical Paper 23, International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- BLUM, W. E.H. 1988. Problems of soil conservation. Strasbourg, Council of Europe, Publications and Documents Division.
- BLUM, W. E.H. y A. AGUILAR. 1994. A concept of sustainability and resilience based on soil functions: the role of ISSS in promoting sustainable land use. In: GREENLAND y SZABOLCS (eds.). Soil Resilience and Sustainable Land Use. CAB-International.
- BORLAUG, N.E. y C.R. DOWSWELL. 1994. Feeding a human population that increasingly crowds a fragile planet. Keynote Lecture. XVth World Congress of Soil Science. ISSS.
- BOUWMAN, A.F. (ed.). 1990. Soils and the greenhouse effect. John Wiley and Sons, Chichester.
- BRUNDTLAND, G.H. *et al.* 1988. Nuestro Futuro Común. Alianza Editorial, S.A. Madrid, España.
- BUCKMAN, H.O. y N.C. BRADY. 1966. Naturaleza y propiedades de los suelos. Traducción del inglés. UTEHA, Barcelona, España.
- BULLOCK, P. 1994. The need for a paradigm change in soil science in the next century. Proceedings of the XVth World Congress of Soil Science. Vol. 9: 427-436. ISSS.
- BUOL, S.W. 1994. Soil, societies yoke to the earth. Proceedings of the XVth World Congress of Soil Science. ISSS.
- DEEVEY, E.S., D.S. RICE, P.M. RICE, H.H. VAUGHAN, M. BRENNER y M.S. FLANNERY. 1979. Mayan urbanism: Impact on a tropical karst environment. *Science* 206: 298-306.
- DOOGE, J.C.I. *et al.* 1991. An agenda of science for environment and development into the 21st century. International Council of Scientific Unions. Cambridge Press.
- GREENLAND, D.J. 1991. The contributions of soil science to society - past, present and future. *Soil Science* 151: 19-23.
- HARWOOD, R.R. 1990. A history of sustainable agriculture. In: EDWARDS *et al.* (eds). Sustainable agriculture Systems. Soil and Water Conservation Society. Iowa, EUA.
- IWESLMDW. 1991. International workshop on evaluation for sustainable land management in the developing world. IBSRAM, FAO, ISSS. Bangkok, Thailand.
- KEATING, M. 1993. Cumbre para la Tierra. Programa para al Cambio. El Programa 21 y los demás acuerdos de Rio de Janeiro en versión simplificada. Centro para Nuestro Futuro Común. Genova, Suiza.
- KRUPENIKOV, I.A. 1993. History of soil science. A.A. Balkema Publishers. Brookfield VT, USA.
- LAFLEN, J.M., R. LAL y S.A. EL-SWAIFY. 1990. Soil erosion and a sustainable agriculture. In: EDWARDS *et al.* (eds). Sustainable Agricultural Systems. Soil and Water Conservation Society. Iowa, EUA.
- LANG, I. 1994. The ecological foundations of sustainable land use - Hungarian agriculture and the way to sustainability. In: Greenland and Szabolcs (eds). Soil Resilience and Sustainable Land Use. CAB-International.
- LEE, K.E. 1994. The functional significance of biodiversity in soils. Proceedings of the XVth World Congress of Soil Science. Vol. 4a: 168-178.
- LOUDERMILK, W.C. 1953. Conquest of the land through seven thousand years. Agriculture Information Bulletin 99. US Department of Agriculture. Washington, D.C., EUA.
- LOZET, J. Y C. MATHIEU. 1990. Dictionnaire de Science du Sol. Deuxième édition. Technique et Documentation. Lavoisier Paris, Francia.
- MAKEEV, O. 1994. Meaning and aim of contemporaneous soil science. Proceedings of the XVth World Congress of Soil Science. Vol. 9: 137-138. ISSS.
- MALTHUS, T.R. 1798. An essay on the principle of population as it affects the future improvement of society. Reprinted by the Royal Economic Society. Londres, Reino Unido.
- MILLER, F.P. 1991. Soil Science: should we change our paradigm? *Agronomy News*. October: 8-9.

- MILLER, F.P. 1993. Soil science: a scope broader than its identity (A guest editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 299.
- OLDEMAN, L.R., R.T.A. HAKKELING y W.G. SOMBROEK. 1990a. World map of the status of human induced soil degradation: an explanatory note. Rev. 2nd. ed. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- OLDEMAN, L.R., V.W.P. VAN ENGELEN y J.H.M. PULLES. 1990b. The extent of human - induced soil degradation. Annex 5 of OLDEMAN *et al.*. 1990a.
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. 1984. Diccionario de la Lengua Española. Espasa-Calpe. Vigésima edición. Madrid, España.
- SANCHEZ, P. 1994. Tropical soil fertility research: towards the second paradigm. Proceedings of the XVth World Congress of Soil Science. Vol. 1: 65-88. ISSS.
- SINGER, M.J. 1994. Soils in an environmental context. Proceedings of the XVth World Congress of Soil Science. Vol. 9: 115-116. ISSS.
- SOMBROEK, W.G. 1990. Do Soils matter... at Global Change? Pamphlet. International Society of Soil Science.
- SPOSITO, G. Y R. J. REGINATO. 1992. Opportunities in basic soil science research. Soil Science Society of America, Inc. Madison WI, EUA.
- SSSA. 1987. Glossary of soil science terms. Soil science society of America, Inc. Madison Wi, EUA.
- SZABOLCS, I. 1994. Prospects of soil salinity for the 21st century. Proceedings of the XVth World Congress of Soil Science. Vol. 1: 123-141. ISSS.
- WARKENTIN, B.P. 1992. Soil science for enviromental quality - how do we know what we know? *J. Environ. Qual.* 21: 163-166.
- WILD, A. 1989. Soil scientists as members of the scientific community. *J. Soil Sci.* 40: 209-211.
- WILDING, L.P. 1994. Soil Science. *Geotimes* 39: 13-14.
- YAALON, D.H. 1993. Soil Science in the eyes of the beholder. *Bull. Int. Soc. Soil Sci.* 84: 13-14.

HERRAMIENTAS DE ANALISIS ESPACIAL EN LA DEFINICION DEL USO POTENCIAL DEL SUELO: CASO DE LA RH36

Spatial Analysis Software Applied to Land Use Planning: the Case of the Hydrological Region 36 of Mexico

Bouvier Ch. y Estrada A.J.

Investigador del ORSTOM, Cicerón 609, 11510 México, D.F., México.

Investigador del CENID-RASPA. Apartado Postal 41, Gómez Palacio, Dgo., México.

Palabras clave: México, RH36, Uso potencial del suelo, Regionalización, Análisis espacial, Modelo numérico de elevación, Sistema de información geográfica.

Index words: Mexico, RH36, Landscape use planning, Regionalization, Spatial analysis, Digital model of elevation, Geographical information system.

Asimismo, se integran los datos relativos a los suelos, a partir de la digitalización de los mapas de INEGI. Como ejemplo, se muestra un mapa del uso potencial de los suelos en términos de agricultura de temporal. Este ejemplo se obtiene a partir de los datos del MNE y del SIG, así como de un estudio preliminar de la relación entre precipitación y altitud a nivel regional. La utilización del MNE y del SIG simplifica la elaboración de mapas y permite generalizar en aspectos más diversos y complejos en la definición del uso potencial del suelo.

RESUMEN

En el marco de desarrollo de la Región Hidrológica 36 (RH36), ubicada en el norte de México, se presenta una metodología de elaboración de mapas de uso potencial del suelo, con la utilización de un Modelo Numérico de Elevación (MNE) y de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Del MNE, elaborado por INEGI, se obtienen datos localizados de altitud y pendiente que son integrados en el SIG.

SUMMARY

In order to develop Mexico's Hydrological Region 36 (RH36), a method of lands use planning is presented, based upon spatial analysis software like Digital Model of Elevation (DME) and a Geographical Information System (GIS). Geomorphological data are supplied with the INEGI-processed DME, they are integrated into the GIS. Likewise data referring to soils from digitalized INEGI thematic maps are integrated into the

GIS. A basic map is shown to illustrate the method in case of rainfed agriculture, considering geographical data and the regional analysis of rainfall and temperature. It is concluded is that the spatial analysis software may be really helpful to face the large variety and complexity of land use planning.

INTRODUCCION

La Región Hidrológica 36 (RH36) se ubica en el norte de México, en una superficie aproximada de 90 000 km². Con el objeto de conocer el potencial hidrológico superficial en esta región, así como la posibilidad del planteamiento de alternativas para un mejor uso del agua a nivel regional, se desarrolla un proyecto a largo plazo (Loyer *et al.*, 1993), por conducto del Centro Nacional de Investigación en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA) del INIFAP y el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM). En la primera fase de este proyecto, se recolectó la información existente en la región y se integró en un sistema de información geográfica (SIG). Este sistema tiene como objetivo la integración de los diferentes aspectos multidisciplinarios, así como su aplicación posterior en modelos de desarrollo.

En este artículo se describen la metodología y los primeros resultados obtenidos en lo que se refiere a la realización de mapas de uso potencial del suelo, considerando, para este caso, el tema de la agricultura de temporal. Se utilizan diferentes mapas de información relacionados con las características de los suelos y del clima, así como con las características geomorfológicas de la región, las cuales se procesaron a partir de un Modelo Numérico de Elevación (MNE)

elaborado por el INEGI. Los resultados presentados se refieren a una zona de prueba de la RH36.

LA REGION HIDROLOGICA 36 Y LA ZONA DE PRUEBA

La RH36

La RH36 se localiza al norte de México, en los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas, entre los 22°40' y 26°40' de latitud norte y los 101°30' y los 106°20' de longitud oeste (Figura 1). Comprende las cuencas endorreicas del río Nazas, del río Aguanaval y el Bolsón de Mapimí, las cuales se desarrollan en una superficie aproximada de 90 000 km². La RH36 presenta alternancia de zonas montañosas, piedemonte, bajada y planicie, con altitudes que varían entre 1000 y 3000 m. Su geología consiste de rocas ígneas en las sierras de la parte alta, lomeríos de conglomerados y cerros de caliza-lutita en las partes medias y bajas, con extensas playas de aluviones hacia las lagunas de los ríos. En la región, la precipitación anual varía de 200 mm en la parte más baja hasta 900 mm en la parte más alta. La distribución temporal de la lluvia sigue un régimen tropical, cerca de 80% se precipita en los meses más calurosos del año (de junio a septiembre). La altitud también influye en las temperaturas; se tiene una variación de 22 a 11°C en su media anual.

Origen y procesamiento de los datos

A nivel de la RH36, se estructuró un Sistema de Información Geográfica con el programa SAVANE (ORSTOM, 1989). Dentro de este sistema se integraron los temas físicos, bióticos y socioeconómicos. Por mencionar solamente los principales aspectos físicos, se tiene por un lado, la geología, tipo

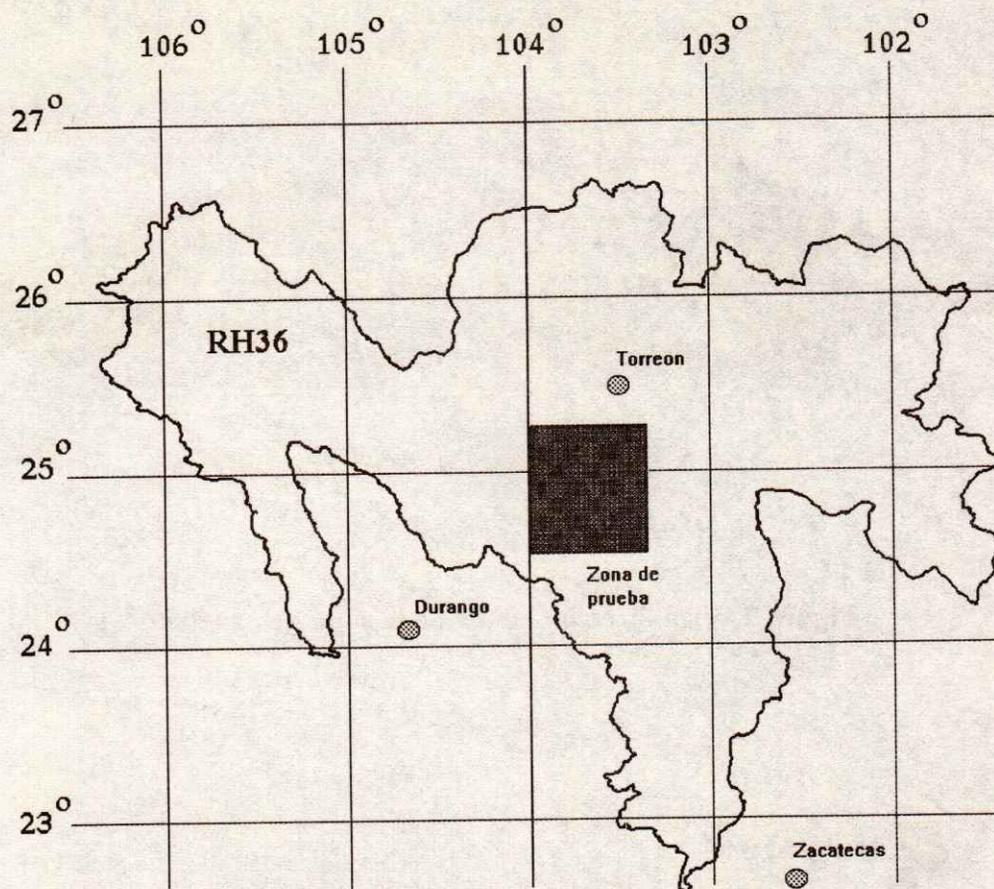


Figura 1. Situación geográfica de la RH36 y de la zona de prueba.

de suelo y sus fases físicas, y el uso del suelo, y por el otro, las altitudes, pendientes y sus orientaciones. La integración de los primeros se realizó a partir de los mapas temáticos a la escala 1:1 000 000, mientras que los datos de relieve resultaron del procesamiento del MNE que permite una reconstitución de los datos cada $0^{\circ}00'03''$ en latitud y longitud (malla cuadrada de aproximadamente 90 m por lado).

Zona de prueba

La zona de prueba está definida en una zona de $0^{\circ}40'$ de lado (Figura 1); en la Figura 2

se presenta una idea del relieve local por medio de la visualización del MNE. Esta zona es de transición entre materiales ígneos y sedimentarios, también se presentan depresiones de aluviones. En el Cuadro 1 se resumen las principales características de la zona (tipos de suelo, fase física, altitud y pendiente). Asimismo, en las Figuras 3 y 4 se muestran los mapas digitalizados de los tipos de suelos y las fases físicas, respectivamente.

DESARROLLO METODOLOGICO

Elementos metodológicos

El uso potencial del suelo tiene como objetivo caracterizar espacialmente la

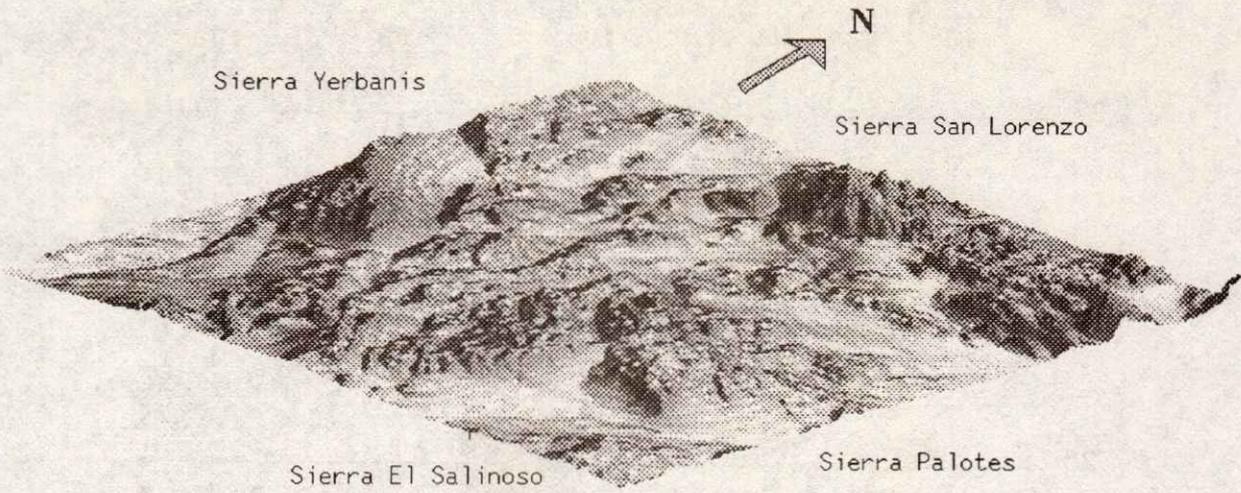


Figura 2. Visualización en 3D de la zona de prueba.

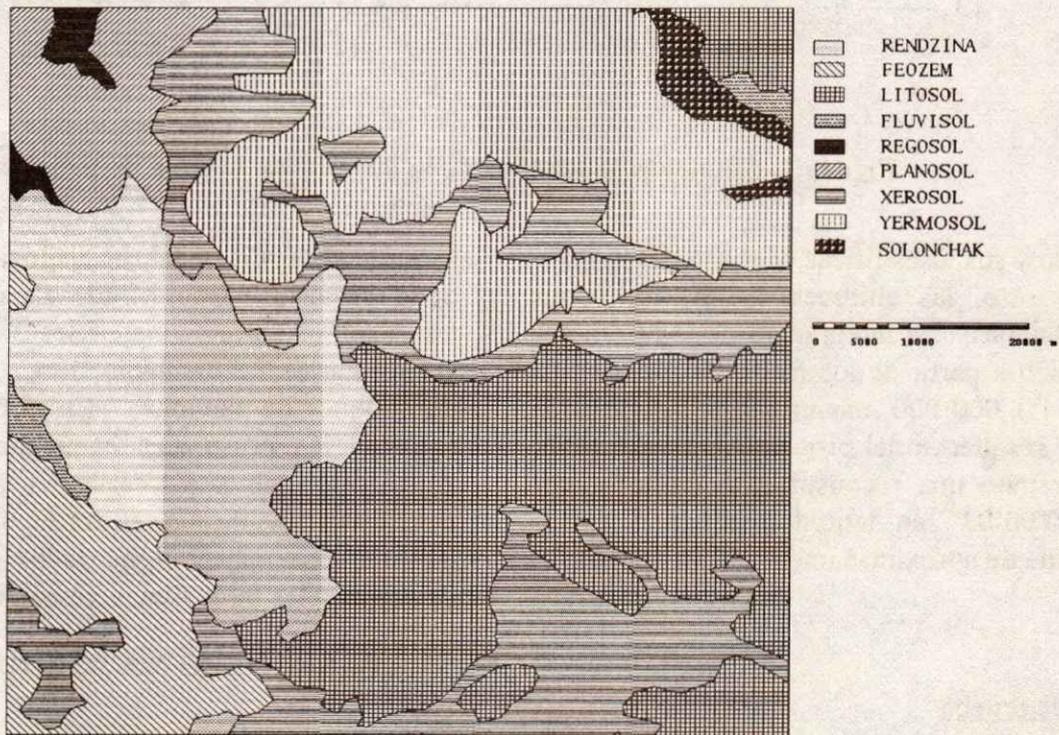


Figura 3. Localización de los tipos de suelos (Clasificación FAO).

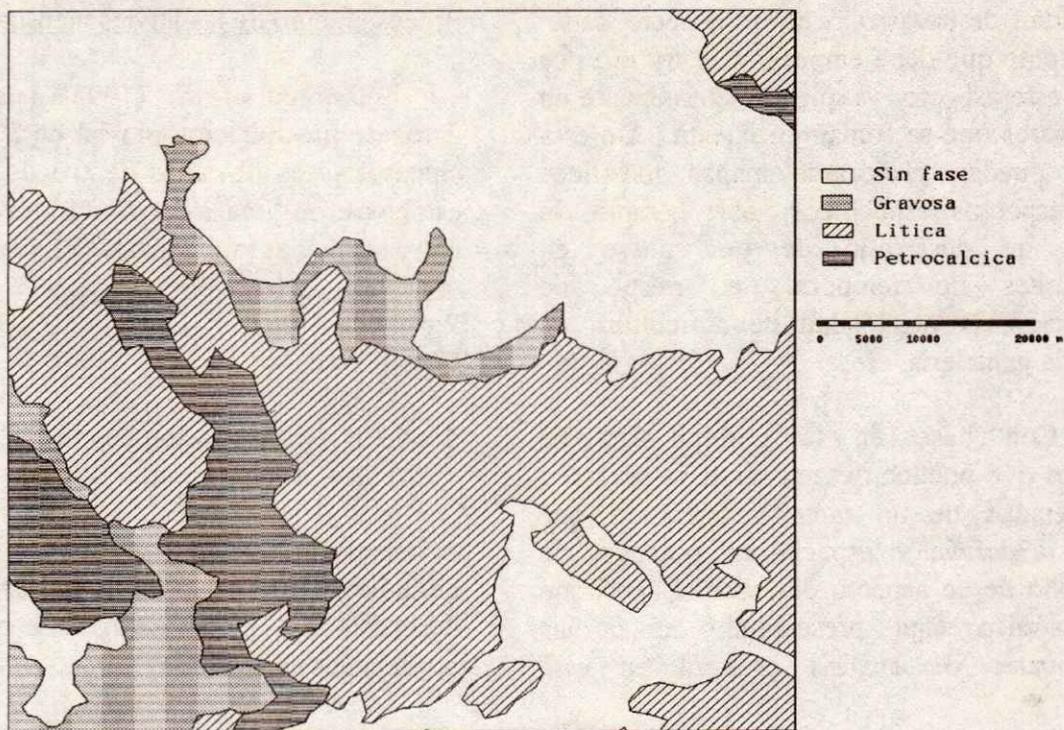


Figura 4. Localización de las fases físicas.

Cuadro 1. Características de la zona de prueba.

Tipo de suelo	(1)	Fase física	(1)	Altitud	(1)	Pendiente	(1)
	%		%	--- m ---	----- % -----		
Rendzina	17	Sin fase	45	1200-1400	6.5	0-2	59.8
Feozem	7	Gravosa	8	1400-1600	26.8	2-5	27.2
Litosol	25	Lítica	37	1600-1800	24.4	5-10	9.0
Fluvisol	1	Petrocálcica	10	1800-2000	29.6	10-20	3.8
Regosol	1			2000-2200	11.9	>20	0.2
Planosol	5			2200-2400	0.8		
Xerosol	22			2400-2600	0.0		
Yermosol	21						
Solonchak	1						

(1): Porcentaje de la superficie total

factibilidad de desarrollo de un aspecto dado. Es evidente que debe empezarse el trabajo por definir este aspecto, ya que es determinante en los factores que se toman en cuenta. De esta forma, pueden elaborarse mapas temáticos sobre aspectos específicos, por ejemplo; la aptitud de desarrollo de un cultivo en condiciones de temporal, el riesgo de producción, la posibilidad de agricultura de riego, de ganadería, etc.

Con base en la multiplicidad de aspectos que pueden desarrollarse, se presenta la necesidad de un método operativo que facilite la definición espacial del potencial de desarrollo de un aspecto deseado. El enfoque metodológico aquí presentando utiliza las herramientas de análisis espacial en este sentido.

En la ilustración del desarrollo metodológico, con un ejemplo sencillo, se considera un cultivo de temporal medio que supone las siguientes necesidades para su desarrollo:

- Balance hídrico-climático positivo en tres meses consecutivos de desarrollo del cultivo.
- Pendientes menores a 5%.
- Suelos profundos y ricos en materia orgánica, lo que motivó la clasificación siguiente en la zona de estudio:
 - Condiciones desfavorables: Litosol, Planosol, Solonchak, Regosol y otros suelos con fase olítica.
 - Condiciones intermedias: suelos de Rendzina y fases gravosa y petrocálica.
 - Condiciones favorables: Faeozem, Xerosol e Yermosol sin fase física.

Procesamiento de las lluvias mensuales

Estrada *et al.* (1993) analizaron los datos de precipitación pluvial de 59 estaciones climatológicas ubicadas dentro de la RH36 y establecieron una relación, a nivel regional, entre las lluvias interanuales (P) y la altitud (h):

$$P = 0.40 h - 267 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Con $R^2 = 0.74$

donde: P = precipitación en mm.
h = Altitud en m.

Asimismo, señala que la distribución mensual de la lluvia total anual es poco variable a nivel de la RH36. En el Cuadro 2 se muestran los porcentajes encontrados.

Con la Ecuación 1, los porcentajes de lluvia mostrados en el Cuadro 2 y las altitudes que proporciona el MNE, se obtienen las lluvias mensuales a nivel de cada malla de la zona de prueba, es decir, un valor estimado de la precipitación mensual a cada 0°00'03" de latitud y longitud.

Procesamiento de las temperaturas mensuales

Además del análisis regional de la precipitación, García (1993) realizó un estudio de la variación altitudinal de la temperatura en el cual utilizó los datos de 31 estaciones climáticas de la RH36. La siguiente es la relación encontrada:

$$T = -0.0062 h + 29.13 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Con $R^2 = 0.77$

donde: T = Temperatura en °C
h = Altitud en m.

Cuadro 2. Porcentajes de la distribución mensual de las precipitaciones en la RH36.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
%	2.4	1.2	0.6	1.4	3.3	14.0	22.0	23.7	18.7	7.6	2.6	2.5

Cuadro 3. Porcentajes de la distribución mensual de las temperaturas en la RH36.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
%	63	72	89	107	123	130	126	124	116	102	82	66

La distribución temporal de las temperaturas tiene poca variación a nivel de la RH36 y éstas pueden definirse mensualmente con relación al promedio anual, con los porcentajes mostrados en el Cuadro 3.

Aplicando la Ecuación 2 y los porcentajes del Cuadro 3 a las altitudes que proporciona el MNE, se obtuvieron, al igual que la precipitación, las estimaciones de las temperaturas mensuales en cada punto de la malla de la zona de estudio.

Procesamiento de las ETP mensuales y del balance hídrico

La estimación de la ETP en cada malla se realizó con la fórmula de Thorntwaite; se emplearon en el cálculo las temperaturas estimadas relacionadas con el mismo espacio de las mallas. Para la fórmula de Thorntwaite se utilizó la siguiente expresión citada por Roche (1963):

$$ETP = 1.6 (10. T/I)^a \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde: ETP = Evapotranspiración potencial mensual en cm.

T = Temperatura media mensual en °C

$I = \sum_{1,12} [(0.09) (T^{1.5})]$

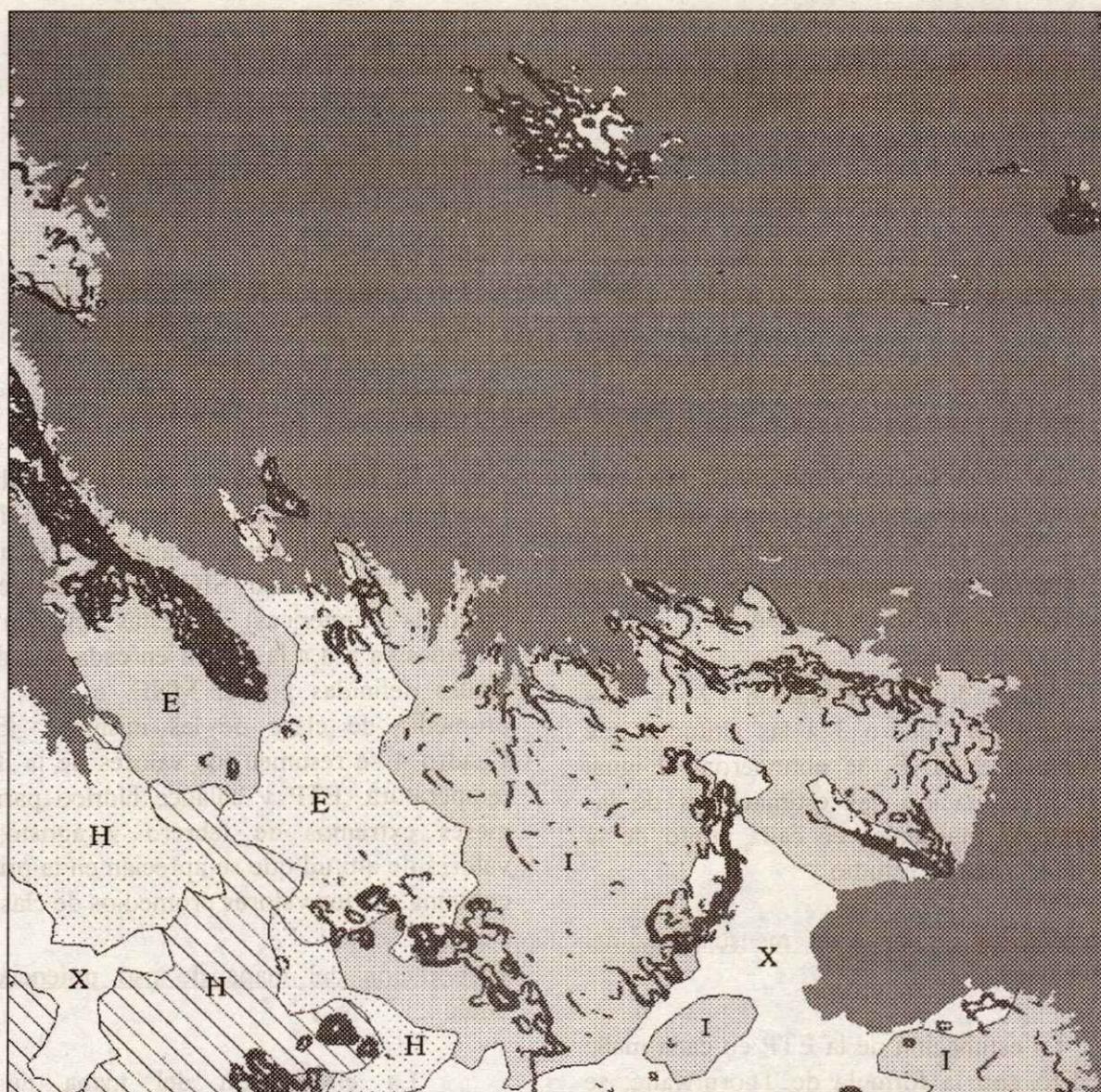
$a = (0.016) (I) + 0.5$

El balance hídrico mensual se obtuvo para cada una de las mallas al restar la ETP de la lluvia. Las diferentes etapas del cálculo se procesan dentro del SIG (a través de sus opciones numéricas) y éstas pueden ser referidas ya sea a la altitud en cada una de las mallas definidas por el MNE, o bien, a un promedio de clase de las mismas. En el Cuadro 4 se resumen los valores de la lluvia, temperatura, ETP y balance hídrico para los meses extremos de febrero y agosto; los valores de altitud que se aprecian en la primera columna son los valores promedios de clase.

Elaboración del mapa de uso potencial del suelo

La elaboración del mapa de uso potencial del suelo se obtiene mediante la sobreposición de los diferentes mapas de información considerados. Se utilizan aquí las opciones de cartografía del SIG.

En primer término, para el ejemplo desarrollado, sobre el mapa digitalizado de los diferentes tipos de suelo se sobrepusieron las pendientes mayores a 5% (Figura 5), así como el balance hídrico cuando este fue negativo en uno o más de los tres meses consecutivos de desarrollo del cultivo. De esta forma se obtiene la estimación espacial de las zonas,



Condiciones desfavorables

-  Pendientes > 5%
-  Balance hídrico negativo
-  Litosol, Planosol Solonchak, Regosol y fases líticas

Condiciones intermedias

- Feozem o Rendzina con
-  Fase petrocálcica
-  Fase gravosa

Condiciones favorables

-  Xerosol sin fase

H: Feozem E: Rendzina X: Xerosol I: Litosol

Figura 5. Mapa de uso potencial del suelo en agricultura de temporal.

Cuadro 4. Cálculo del balance hídrico.

Altitud m	Febrero				Agosto			
	Precip. mm	Temp. °C	ETP mm	Balance mm	Precip. mm	Temp. °C	ETP mm	Balance mm
1010	1.6	16.4	34.4	-32.4	32.4	28.3	127.6	-95.2
1110	2.1	16.0	34.3	-32.2	41.9	27.5	123.3	-81.4
1210	2.6	15.5	34.5	-31.9	51.4	26.8	119.1	-67.7
1310	3.0	15.1	34.8	-31.7	60.9	26.0	115.0	-54.1
1410	3.5	14.6	35.0	-31.4	70.3	25.2	111.1	-40.7
1510	4.0	14.2	35.1	-31.1	79.8	24.5	107.2	-27.3
1610	4.5	13.7	35.2	-30.7	89.3	23.7	103.4	-14.1
1710	5.0	13.3	35.3	-30.3	98.8	22.9	99.8	-1.0
1810	5.4	12.8	35.4	-29.9	108.3	22.2	96.3	11.9
1910	5.9	12.4	35.5	-29.5	117.7	21.4	92.9	24.8
2010	6.4	12.0	35.5	-29.0	127.2	20.6	89.6	37.6
2110	6.9	11.5	35.5	-28.6	136.7	19.8	86.4	50.3
2210	7.4	11.1	35.5	-28.1	146.2	19.1	83.3	62.8
2310	7.8	10.6	35.4	-27.5	155.7	18.3	80.3	75.3
2410	8.3	10.2	35.3	-27.0	165.1	17.5	77.5	87.6
2510	8.8	9.7	35.2	-26.4	174.6	16.8	74.7	99.8

ETP = Evapotranspiración potencial mensual.

donde, por condiciones de pendiente y disponibilidad de agua, es posible la producción de un cultivo medio de temporal.

En segundo término, las limitantes de producción del cultivo debido a los tipos y características de los suelos se determinaron considerando condiciones favorables, intermedias y desfavorables. Esta clasificación se realiza dentro del SIG mediante la agrupación de los diferentes atributos (unidades espaciales digitalizadas y referenciadas a una característica específica deseada) del mapa digitalizado de los suelos. En este caso, la agrupación de los atributos se realizó de la siguiente manera:

- Condiciones desfavorables: se agruparon los suelos de Litosol, Planosol, Solonchak, Regosol y fases líticas.

- Condiciones intermedias: se agruparon los suelos de Feozem o Rendzina con fase gravosa o petrocálica; balance hídrico positivo y pendientes menores que 5%.

- Condiciones favorables: en este caso se agrupó el tipo de suelo Xerosol sin fase física, con pendientes menores que 5% y balance hídrico positivo.

DISCUSION

El ejemplo que se presenta sólo es considerado como ilustración del aspecto metodológico. Para la obtención de documentos con información de mayor calidad pueden ser mejor precisados varios aspectos que resultan todavía generales, tal es el caso de la caracterización climática regional y la calidad de los datos integrados en el SIG. Asimismo, el

considerar otro tipo de información que hasta ahora no se toma en cuenta (riesgo de producción, variación climática, etc.) puede complementar los resultados obtenidos.

Caracterización climática regional

Las relaciones hechas entre la pluviometría y temperatura con respecto a la altitud resultan hasta ahora descripciones generales del clima, al considerarse únicamente su relación lineal (R^2 de 0.74 y 0.77, respectivamente). Dentro del cuadro global del proyecto regional se espera alcanzar una mejor caracterización climática al considerar otros factores como la exposición y localización geográfica. Cabe hacer notar que dichos factores pueden procesarse a partir del MNE, y que este solo aspecto supone una mejor descripción de la determinación espacial de las lluvias y las temperaturas.

En lo que se refiere a la definición de la ETP, la fórmula de Thorntwaite representa una aproximación general, ya que se considera únicamente la temperatura en el cálculo. Esta definición e la evapotranspiración puede mejorarse al considerar los datos de evaporación (tanques tipo A), existentes dentro de la RH36. Además, se planea utilizar otras fórmulas más completas, como las de Penman (1948) o de Priestley-Taylor (1972). Se notará que los parámetros de aquellas fórmulas se pueden deducir en parte de los datos, tanto meteorológicos como geográficos del SIG: por ejemplo, los datos de exposición que proporcionan los MNE pueden ayudar en el cálculo de la radiación solar y los datos de reflectancia pueden precisarse indirectamente por medio de imágenes Spot o Landsat (Escadafal, 1989).

Datos del MNE.

El MNE, procesado por el INEGI, se presenta en forma de una retícula de puntos distribuidos homogéneamente cada tres segundos de latitud y longitud (aproximadamente cada 90 metros por lado). Este modelo está elaborado a partir de curvas de nivel con equidistancia de 50 m que figuran en los mapas topográficos 1:250 000. Cabe señalar que INEGI procesa el MNE utilizando un método de interpolación de tipo lineal. En relación con la densidad local de las curvas de nivel que se utilizan para procesar el MNE, este tipo de interpolación puede generar efectos indeseables que se traducen por un relieve en forma de "escaleras", el cual se presenta en la proximidad de las curvas de nivel utilizadas en la interpolación (Bouvier, 1994a; Depraetere, 1990). En la Figura 6 se manifiesta este tipo de comportamiento al apreciarse, en el eje de las altitudes, valores extremos que corresponden a las altitudes de las curvas de nivel.

En las aplicaciones más comunes en que se utilizan los valores de las altitudes, este tipo de problema no tiene consecuencias importantes. Sin embargo, en el caso de las pendientes, éstas generalmente presentan oscilaciones ficticias que pueden alterar la clasificación del uso potencial del suelo.

Para moderar este efecto es aconsejable incrementar la densidad de curvas de nivel, o bien, utilizar otro tipo de interpolación como "krigging" o funciones "spline". Sin embargo, estos últimos casos implican digitalizar las curvas de nivel, perdiéndose la comodidad que proporciona el MNE procesado.

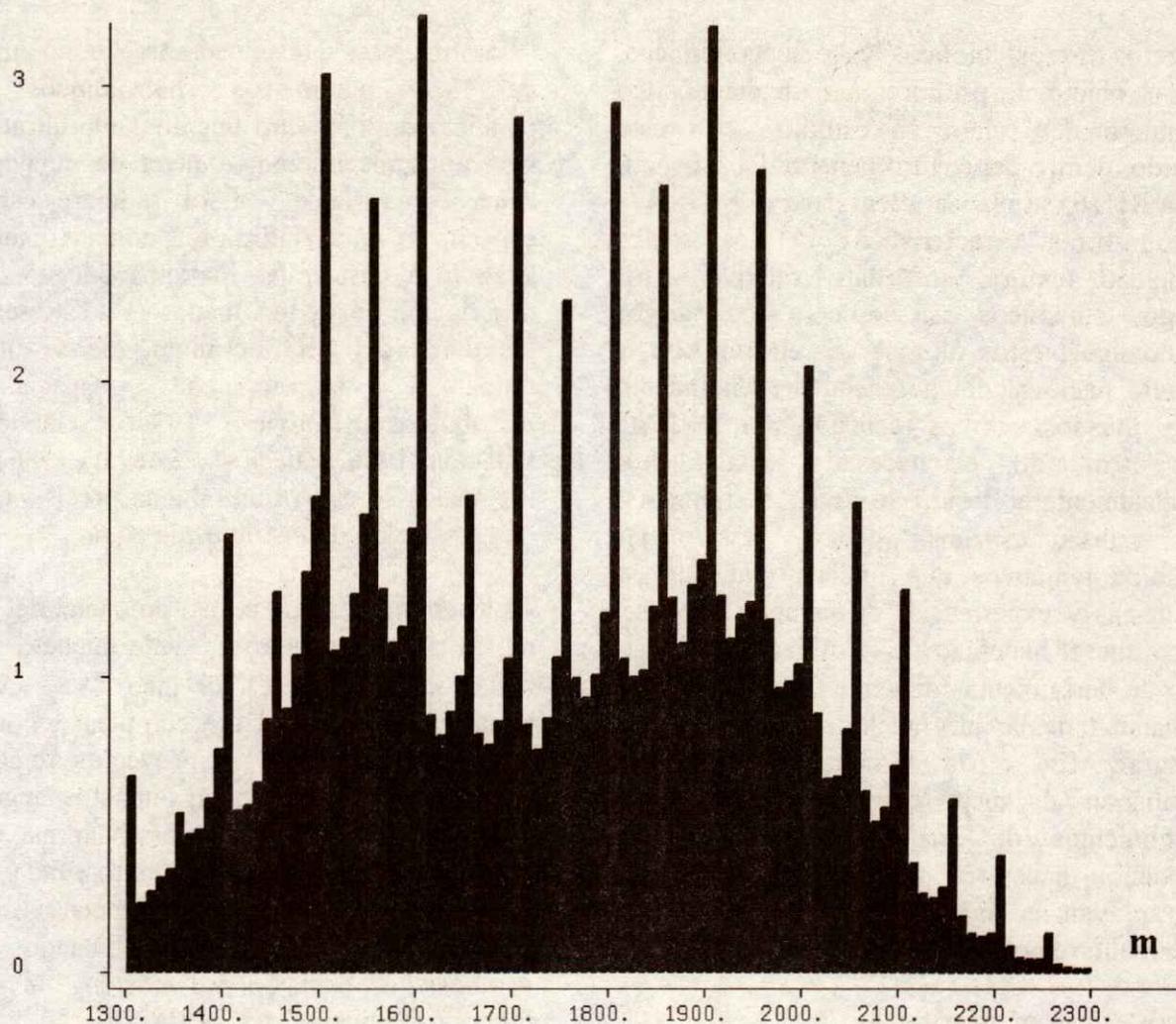


Figura 6. Distribución de las altitudes del MNE.

Datos del SIG.

La escala utilizada en los mapas de suelos, 1:1 000 000, no representa con precisión las zonas homogéneas, tanto en su delimitación como en su variedad. En la perspectiva de estudios de mayor precisión en la RH36, se planea digitalizar la información en escalas de 1:250 000 y, en ciertos casos, a 1:50 000. Cabe señalar que debido a la naturaleza del trabajo en la digitalización de mapas, éste

representa la principal limitación en el desarrollo metodológico, pudiéndose inscribir sólo en proyectos de largo plazo. En el futuro este inconveniente puede disminuirse ya que se está desarrollando rápidamente la entrega de mapas informatizados.

Datos adicionales

Un aspecto importante en la definición del uso potencial del suelo es el considerar los

aspectos físicos, bióticos y socioeconómicos, con el objeto de proporcionar un diagnóstico completo del sujeto en estudio. En este sentido, dentro del cuadro general del proyecto de la RH36, se planea integrar en el SIG de la región otras características de los suelos (salinidad, textura, etc.), datos relativos a los riesgos climáticos así como a los riesgos económicos, estos últimos en relación con el estudio nacional del potencial de rendimiento para diversos cultivos realizado por INIFAP. Por otro lado, es necesario señalar que, paralelamente al desarrollo de las herramientas de análisis espacial, deben desarrollarse estudios temáticos que implican mediciones, encuestas y experiencias de campo. Debe ser claro que el beneficio de la utilización de este tipo de herramientas depende en gran parte de la calidad de la información que se pretende integrar. En otros términos, esto puede resumirse al decir que la utilización de herramientas de análisis espacial es una condición necesaria pero no suficiente para lograr avances significativos en proyectos de desarrollo regional.

Perspectivas en otros temas.

Las perspectivas en otros temas, tales como la ganadería y la agricultura de riego, representan aspectos interesantes de discusión. Estos temas, aunque más complejos, representan un aspecto interesante de comprensión a nivel regional desde el punto de vista hidrológico, al considerarse no sólo el aspecto de la precipitación local sino las interacciones de ésta con el suelo, la cobertura vegetal y el relieve, a fin de conocer el potencial en almacenamiento en varios puntos de la cuenca. De esta forma, al contrario de la agricultura de temporal, se introduce en estos casos un aspecto dinámico que tiene por lo menos dos consecuencias:

- La primera es que se necesita el conocimiento de los parámetros hidrológicos que condicionan los escurrimientos, la infiltración y la evapotranspiración, a nivel de cuencas de superficie variable. Esto requiere estudios específicos en la hidrología con el objeto de adaptar o desarrollar modelos adecuados de descripción de los fenómenos. En este sentido, los datos del SIG permiten que se utilicen modelos hidrológicos espacialmente distribuidos (Bouvier, 1994b; Gandoy y Palacios, 1989; Palacios y Cuevas, 1986), con los cuales se espera una buena precisión en la determinación de los flujos de agua.

- La segunda es que el uso potencial del suelo de las zonas aguas arriba tiene impacto en las zonas aguas abajo, lo que hace que la planificación regional sea compleja. Por esto se deben armonizar los proyectos regionales para evitar que no tengan impactos negativos en las zonas localizadas aguas abajo; así, el uso del agua representa un elemento fundamental en la definición del uso potencial del suelo. Varias herramientas de planificación o de ayuda a la decisión ya existen, tal como Hydram (Pouget *et al.*, 1994).

CONCLUSIONES

A través del ejemplo desarrollado, se precisaron las posibilidades y perspectivas de las herramientas de análisis espacial para la elaboración de mapas de uso potencial del suelo, considerando un enfoque de desarrollo regional. Como se mencionó en la discusión, la utilización de estas herramientas es una condición necesaria, pero no suficiente, para lograr estos objetivos, ya que ante todo son necesarios datos temáticos de calidad. Sin embargo, se debe recordar que el uso potencial de los suelos tiene múltiples aspectos, ya que

deben elaborarse mapas según diferentes tipos de cultivos o tipo de actividad (agricultura de temporal o de riego, ganadería). Cada aplicación presenta, a su vez, varios grados de complejidad e involucra una gran diversidad de factores. De esta forma, la elaboración de mapas de uso potencial del suelo resulta una operación compleja y a la vez repetida, por lo cual es indispensable contar con las herramientas y metodologías eficientes en su definición. En este sentido, deben considerarse las ventajas que confiere la utilización del MNE y el SIG:

- El MNE proporciona datos detallados de altitud, pendiente, exposición y dirección de drenaje, los cuales son de gran interés, tanto en la regionalización de las características climáticas como en el manejo del recurso agua, elementos esenciales en la definición del uso potencial de los suelos.

- La integración de los diferentes mapas de información en el SIG facilita el trabajo debido a la simplificación del cálculo numérico, sobreposición y análisis relacionado de los datos y, finalmente, el aspecto cartográfico.

Cabe señalar que la metodología puede generalizarse en la utilización de imágenes de satélite y su integración en el SIG sin complejidad adicional a la metodología, ya que existen interfases entre SIG, MNE y teledetección. La utilización de las herramien-

tas de análisis espacial ofrece la facilidad y abre una amplia gama de perspectivas, no solamente en lo que se refiere el uso potencial del suelo, sino para la casi totalidad de los temas que se refieren a las ciencias de la tierra.

LITERATURA CITADA

- BOUVIER, C. 1994a. De la aplicación de los MNE en la hidrología. El ejemplo de las cuencas de Chalco (México). *Hydrologie Continentale* (en prensa).
- BOUVIER, C. 1994b. MERCEDES: Principes du modèle et notice d'utilisation. Editions de l'ORSTOM, France.
- DEPRAETERE C. 1990. OROLOG, Logiciel de calcul de modèles numériques de Terrain à partir de courbes de niveau. Editions de l'ORSTOM, France.
- ESCADAFAL, R. 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Thèse Doctorat. Coll. Etudes et Thèses. ORSTOM, France.
- ESTRADA A., J. CH. BOUVIER, L. DESCROIX. 1993. Régimen pluviométrico. In: Loyer J.Y., J. Estrada A., I. Jasso R., L. Moreno D. (eds.). Estudio de los factores que influncian los escurrimientos en la Región Hidrológica 36. ORSTOM-CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México.
- GANDOLY-BERNASCONI, W., O. PALACIOS-VELEZ. 1990. Automatic cascade numbering of unit elements in distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 112: 375-393.
- GARCIA H.G. 1993. Variabilidad de los elementos del clima. In: Loyer J.Y., J. Estrada A., I. Jasso R., L. Moreno D. (Eds.). Estudio de los factores que influncian los escurrimientos en la Región Hidrológica 36. ORSTOM-CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México.
- LOYER J.Y., J. ESTRADA A., I. JASSO R., L. MORENO D. 1993. Estudio de los factores que influncian los escurrimientos en la Región Hidrológica 36. ORSTOM-CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México.
- ORSTOM. 1989. SIG SAVANE, documentation de l'utilisateur, guide de l'utilisateur, exemples d'applications. Editions de l'ORSTOM, France.
- PALACIOS, O., B. CUEVAS. 1986. Automated river course, ridge and basin delineation from digital elevation data. *Journal of Hidrology* 86: 299-314.
- PENMAN, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soils and grass. *Proc. Roy. Soc. Ser. A* 93: 120-145.
- PRIESTLEY, C.H.B., R.J. TAYLOR. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2): 81-82.
- POUGET, J.C., A. DEZETTER, L. CABALLERO. 1994. Applications de hydram au schéma d'utilisation des eaux de la Guadeloupe pour l'eau potable et l'Irrigation. ORSTOM-Conseil Général de la Guadeloupe. France.
- ROCHE, M. 1963. *Hydrologie de surface*. Gauthier-Villars Editeur, Paris.

PERSPECTIVAS DE LA PERCEPCION REMOTA DE LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS SUELOS

Opportunities in Remote Sensing of Soil Physical Properties

Klaudia Oleschko

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

Palabras clave: Percepción remota, Cascada de métodos, Exploración electromagnética, Propiedades electromagnéticas.

Index words: Remote Sensing, Cascade of methods, Electromagnetic properties and exploration.

espacio y en el tiempo de un modo continuo. En el presente trabajo se discuten las bases teóricas de las nuevas técnicas de exploración electromagnética de los medios naturales, así como algunos datos del autor sobre las propiedades eléctricas y magnéticas del suelo.

RESUMEN

El suelo es un sistema variable en el espacio y dinámico en el tiempo. Una de las principales causas de esta variabilidad es la naturaleza jerárquica de la organización estructural del suelo, cuyo producto final es la porosidad diferencial. El estudio de ésta requiere del uso de técnicas no-destructivas del análisis del suelo, las que permiten evaluar el funcionamiento del sistema directamente *in situ*. La naturaleza específica del sistema estructural del suelo requiere del uso de una cascada de métodos de estudio, con una base física similar pero de diferente escala, los que permiten evaluar el suelo a todos los niveles de su organización y describir su variabilidad en el

SUMMARY

Soil is a system, variable in space and dynamic in time. One of the main causes of this variability is the hierarchical nature of its structural organization, which final product is differential porosity. The study of this porosity requires non-invasive measurements, which enable to assess the functioning of the system *in situ*. The specific nature of the structural system of the requires the use of a cascade of methods, with a similar physical base, but of a different scale, which allows the assessment soil at all levels of its organization and describes its variability continuously, in space and time. This work discusses the theoretical bases of the new techniques of natural environments electromagnetic exploration as well as the author's own data about the electric and magnetic properties of soil.

Recibido 3-94.

INTRODUCCION

Importancia del uso de técnicas no-destructivas en el estudio de los suelos.

Uno de los principales problemas que concentra el interés de la edafología moderna es la naturaleza de la variabilidad en el espacio y dinámica en el tiempo de las propiedades del suelo. El origen de la variabilidad es complejo ya que es, por un lado, producto integral de factores externos y, por el otro, consecuencia de los procesos internos del suelo. La naturaleza jerárquica de la organización de este último como sistema se considera una de las principales causas de su variabilidad en el espacio.

Se sabe que las estructuras moleculares, tanto minerales como orgánicas, dan origen a las partículas elementales del suelo (PES) que, a su vez, se arreglan entre sí en el espacio y forman agregados de diferente tamaño, los cuales se organizan dentro de los horizontes genéticos que dan origen a los perfiles cuya unión resulta en la formación de las cubiertas edáficas (Rozanov, 1986). Todas las unidades mencionadas (PES, agregados, horizontes, perfiles y cubiertas edáficas) se conocen en la edafología con el nombre de unidades elementales de organización del suelo y su arreglo mutuo en el espacio deriva en el desarrollo gradual de la porosidad presente en todos los niveles de la organización estructural del suelo, desde el micro hasta el mega.

La heterogeneidad de la porosidad en el espacio, considerada desde el punto de vista de la distribución de los poros por el tamaño, su morfología y continuidad determinan la variabilidad de las principales propiedades del suelo. Esto se debe a que por los poros

continuos se desarrollan los flujos de masa y energía, causantes directos de cualquier cambio ocurrido en las propiedades del suelo. La dinámica del espacio poroso en el tiempo se refleja en la dinámica de las principales propiedades físicas del suelo.

De este modo, puede asegurarse que la variabilidad del suelo en el espacio ocurre de un modo continuo y se presenta en todos los niveles de su organización.

Durante el análisis del suelo en el laboratorio, como resultado de la homogeneización de las muestras durante los numerosos pre-tratamientos, se destruye su variabilidad natural. Posteriormente, en el mejor de los casos, la heterogeneidad se conserva en los niveles más bajos de la organización, que correspondientes a las partículas elementales o a las estructuras moleculares. La profundidad de la brecha que existe entre las propiedades del suelo evaluadas *in situ* y las mismas analizadas en el laboratorio, depende del origen de la propiedad estudiada.

Al igual que un sistema, el suelo se caracteriza por una organización jerárquica, sus propiedades tienen un claro orden. Si la variabilidad, en el espacio o en el tiempo, de algunas de las propiedades físicas, como, por ejemplo, la porosidad, afecta inmediatamente y de un modo drástico el comportamiento de todo el sistema, la dinámica de otras, al contrario, se caracteriza por velocidades muy lentas y por una influencia insignificante sobre el sistema.

BASE FISICA DE LAS TECNICAS NO-DESTRUCTIVAS DE ANALISIS

La principal ventaja de las técnicas no-destructivas de análisis consiste en la posibilidad de estudiar al suelo como un cuerpo tridimensional, e incluir su porosidad, o sea, considerar su variabilidad en el espacio, tanto en dirección lateral como vertical, sin intervenir dentro del sistema de interés.

El avance tecnológico ha permitido desarrollar un conjunto de técnicas no-destructivas aplicables al análisis del suelo. Algunas de ellas son muy complejas y caras (la tomografía computarizada, la resonancia magnética nuclear, etc.) y otras son de uso más accesible (la microscopía óptica, algunos métodos submicroscópicos, la percepción remota, etc.) (Sposito y Reginato, 1992). La base física de la mayor parte de estas técnicas, que la edafología tomó de la geofísica, medicina u otras disciplinas, es única: el suelo o sus muestras inalteradas (después de una preparación especial o directamente *in situ*) son explorados por ondas electromagnéticas, de distinta longitud y frecuencia, las cuales, después de ser dispersadas por el objeto, son captadas por diferentes aparatos colectores.

Los cambios que ocurren en las amplitudes, fases y dirección de las ondas dispersadas reflejan las propiedades del objeto de interés.

Si la exactitud de las técnicas basadas en el uso de ondas de longitudes desde el infrarrojo (14 nm) hasta los rayos iónicos (menor que 1 nm), depende fuertemente de las prácticas de muestreo aplicadas y de los métodos de preparación de las muestras del suelo, las técnicas que utilizan las microondas y

las ondas de radio se aplican al suelo directamente en el campo, a nivel mega de la cubierta edáfica de su organización estructural. Estos métodos no requieren de la preparación de muestras y reflejan de un modo objetivo la variabilidad del suelo en el espacio a nivel mega. Sin embargo, su resolución es baja a nivel micro y, a veces, también a nivel macro. Estos últimos niveles tienen que estudiarse con las técnicas del primer grupo (las de ondas desde el infrarrojo hasta los rayos iónicos). Una descripción completa de la variabilidad en el espacio de las propiedades del suelo requiere del uso de una cascada de métodos de diferente escala.

Son tres los procesos físicos fundamentales que ocurren durante la interacción entre el suelo y las ondas electromagnéticas emitidas por diferentes emisores: el reflejo, la transmisión y la refracción. Las ondas resultantes de los procesos descritos son recogidas por receptores de diferente construcción, entre los cuales los lentes (nivel micro de observación) y las antenas (nivel macro o mega) son los aparatos más comunes.

Las señales obtenidas por los receptores son digitalizadas o transformadas en imágenes del objeto de interés. Estas últimas, posteriormente, se interpretan siguiendo procedimientos de rutina, distintos para cada técnica concreta (Figura 1). Actualmente, las técnicas no-destructivas de análisis del suelo han dejado de ser puramente cualitativas y han adquirido una alta precisión cuantitativa (Bisdorn *et al.*, 1990). Los aparatos que permiten cuantificar los diferentes aspectos de las imágenes se denominan analizadores de imágenes, los que, a su vez, pueden ser complejos (con monitor de colores y una

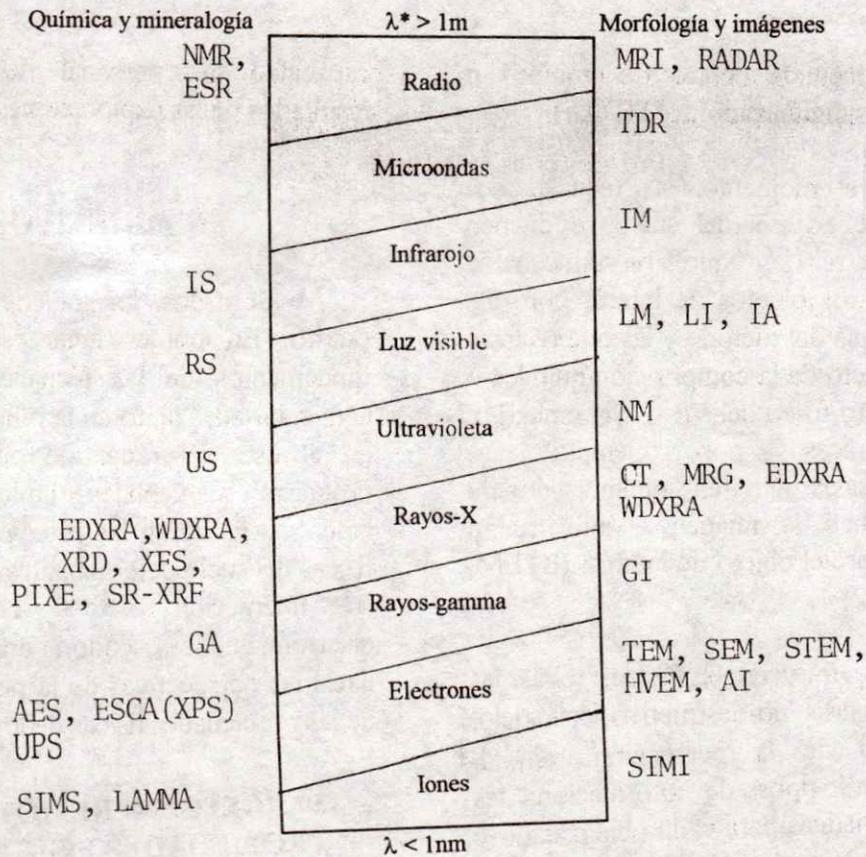


Figura 1. Las técnicas analíticas, no destructivas del estudio del suelo por la exploración con la radiación electromagnética, electrones e iones (según Bisdom *et al.*, 1990, con cambios hechos por el autor).
 *) - la longitud de la orden electromagnética, o el tamaño de las partículas elementales utilizadas durante la exploración.

Donde:

I. Técnicas químicas y microquímicas:

- NMR Resonancia magnética nuclear
- IS Espectroscopía infraroja
- US Espectroscopía ultravioleta
- EDXRA Análisis de dispersión de rayos -X
- XFS Espectroscopía fluorescente de rayos -X
- SR-XRF Radiación del sincrotrón - fluorescencia de rayos X
- AES Espectroscopía electrónica de Auger
- ESCA Espectroscopía electrónica para los análisis químicos.
- SIMS Espectroscopía secundaria de la masa de iones
- ESR Resonancia de los spines de electrones
- RS Espectroscopía de raman
- XRD Difracción de rayos-X
- WDXRA Análisis dispersivo de rayos X, de longitud de onda
- PIXE Emisión de rayos-X, inducida por partículas
- UPS Espectroscopía ultravioleta fotoelectrónica
- GA Análisis gamma
- XPS Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X
- LAMMA Análisis de masa con microsonda de laser.

II. Técnicas morfológicas y de análisis de las imágenes.

- MRI Imágenes del resonancia magnética
- LM Microscopía óptica
- TDR Reflectometría de las áreas del tiempo
- IA Análisis de imágenes
- CT Tomografía computarizada
- EDXRA Análisis de dispersión de rayos -X
- TEM Microscopía de transmisión de electrones
- STEM Microscopía electrónica de reflejo y transmisión
- AI Imágenes de Auger
- SIMI Imágenes secundarias de masa de iones
- IM Microscopía infraroja
- LI Imágenes de laser
- NV Microscopía ultravioleta
- MRG Microradiografía
- WDXRA Análisis dispersivo de rayos-X, de l longitud de la onda
- SEM Microscopía electrónica de reflejo
- HVEM Microscopía con electrones de alto voltaje
- GI Imágenes de gamma

computadora incluida dentro del equipo) o simples tabletas digitalizadoras (ZIDAS).

Hasta el momento, las técnicas no-destructivas de análisis del suelo se dividen claramente entre las que reproducen la morfología de los objetos de interés con una resolución propia del método y las que realizan un análisis directo de la composición química o de algún aspecto físico del suelo. Sin embargo, algunas técnicas, por ejemplo las submicroscópicas, permiten obtener de un modo simultáneo la imagen e información cuantitativa sobre el objeto de interés (STEM, TEM) (Figura 2).

Se cree que, en el futuro, todas las técnicas de análisis no-destructivo del suelo, incluyendo las de la percepción remota, utilizarán ambos tipos de información: las señales características para cada objeto dado y las imágenes, lo que permitirá ubicar las señales dentro del espacio y visualizar de un modo directo la variabilidad en éste de diferentes propiedades de los suelos.

Actualmente, entre las técnicas no-destructivas de estudio de los medios naturales, destacan por su uso más frecuente la reflectometría (time domain reflectometry - TDR) y el radar de penetración terrestre (GPR). En México, el Instituto de Geografía de la UNAM está en proceso de adquisición de ambos equipos mencionados. Entre las tareas que se pretende desarrollar utilizando estos últimos, se encuentra la exploración de la cubierta edáfica a nivel mega de observación con el propósito de diagnosticar los procesos de degradación química y física de los suelos. El uso adecuado del TDR y GPR depende de la calibración correcta de los equipos y de la

capacidad del personal de interpretar los resultados de las exploraciones.

OBJETIVOS

Son dos los objetivos del presente escrito. En primer lugar, se discutirán los fundamentos de las técnicas de percepción activa, basadas tanto en la reflectometría, como en el uso del radar de penetración, y se destacarán sus ventajas y limitaciones. Por otro lado, se analizarán las principales propiedades físicas del suelo determinantes del fenómeno de su interacción activa con las ondas electromagnéticas. Todo el análisis se enfocará hacia las perspectivas de la percepción remota de las propiedades físicas de los suelos.

PERCEPCION REMOTA DE LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS SUELOS

Las técnicas de percepción remota se dividen en dos grupos: las pasivas y las activas, ambas aplicables tanto a nivel mega como a nivel macro de observación. Si las primeras evalúan el grado (el coeficiente) de reflexión de la energía solar por la superficie terrestre, por lo que cuentan solamente con una antena receptora de las señales, las últimas utilizan, además, generadores de impulsos electromagnéticos.

Tradicionalmente, el satélite se utilizaba como una práctica pasiva de percepción remota, basada en la evaluación de las ondas electromagnéticas del espectro de la luz visible e infrarrojo emitidas por la superficie terrestre, por lo que su propósito más común fue y sigue siendo la medición de la temperatura de ésta y

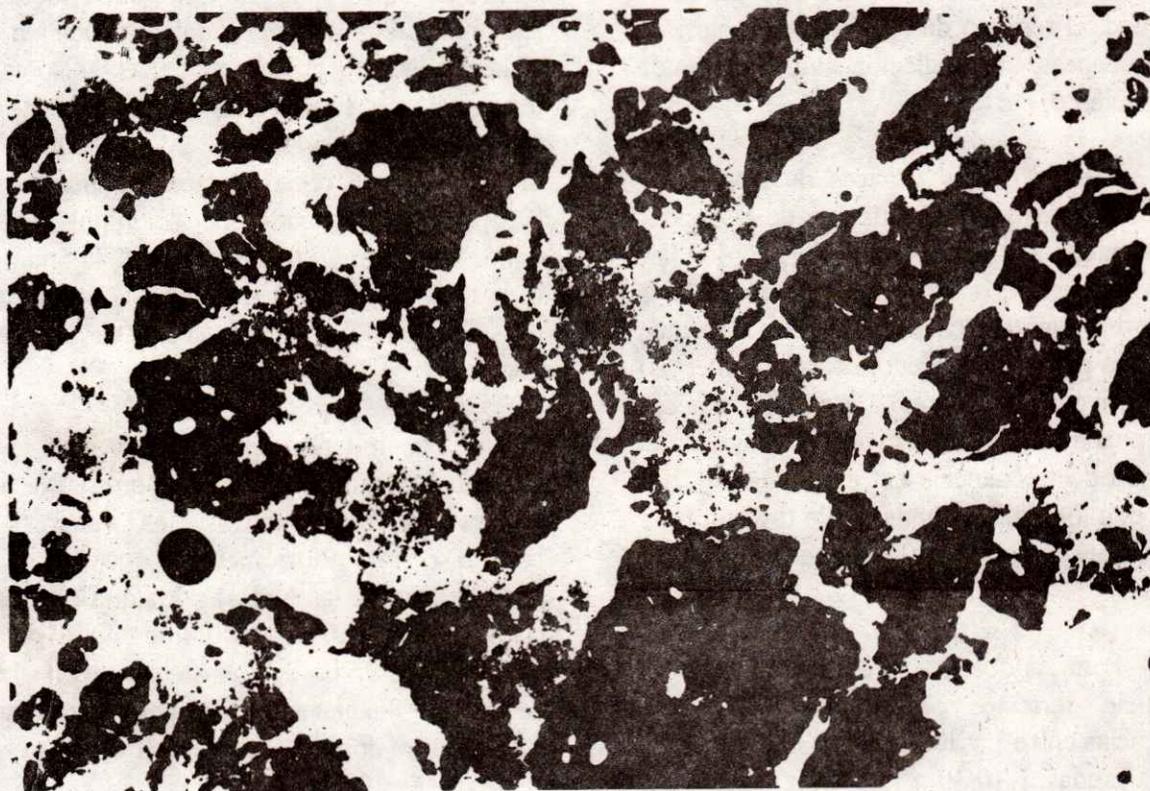


Figura 2. Una imagen del Vertisol pèlico degradado, Estado de Guanajuato. Microscopía óptica, aumento x10.

de su albedo, combinada con los principales datos meteorológicos.

Sin embargo, las posibilidades reales del uso de técnicas pasivas en la física de suelos son amplias e incluyen: la predicción de las tasas de evapotranspiración de los ecosistemas, las mediciones continuas de los contenidos de humedad, el registro de los regímenes hídricos de las cuencas, las predicciones de las tasas de escurrimiento, etc.

Dentro de las técnicas de percepción remota basadas en la evaluación de las ondas electromagnéticas de la banda de microondas, se distinguen dos grupos similares a las anteriores: las técnicas pasivas (los aparatos utilizados para esto se denominan radiómetros) y las activas (los radares). Todas las técnicas mencionadas utilizan las microondas en el diapason de frecuencias entre 0.3 GHz y 100 GHz, con longitud de onda desde 0.1 cm hasta 1 m (entonces, incluyen una parte de las ondas de radio).

Para las observaciones espaciales de la superficie terrestre se utilizan ondas de frecuencias entre 1 y 15 GHz (1 GHz = 10^9 Hz) de tres bandas: L (0.39 a 1.55 GHz), C (4.20 a 5.70 GHz) y X (5.75 a 10.95 GHz).

El TDR trabaja con las ondas de longitud de 100 a 600 mm. En el caso de los sensores activos, por ejemplo, los radares, una vez emitidas las señales electromagnéticas, éstas interactúan con el suelo y posteriormente son recibidas por las antenas-receptoras.

Las ventajas más importantes de los radares en comparación con las prácticas de percepción remota tradicionales son, por un lado, la independencia casi total de la calidad de

las imágenes de las condiciones del medioambiente y, por el otro, la posibilidad de estudiar la corteza terrestre a profundidad, como cuerpo tridimensional que es.

La resolución de los métodos activos, la trayectoria de las ondas electromagnéticas dentro del suelo y, por lo tanto, la claridad y la exactitud de la imagen obtenida, dependen de: a) las características de las antenas emisoras de los impulsos (el tipo y las dimensiones de las antenas, su polarización y el ángulo de incidencia de las ondas electromagnéticas, etc.); b) origen del generador de los impulsos (que define la longitud o la frecuencia de la onda); y c) la naturaleza del medio material con el cual ellas interactúan directamente (el suelo en nuestro caso).

Los radares activos se dividen, a su vez, en los que tienen como producto final señales electromagnéticas (los radares de barrido o los difusiómetros, que miden la retrodifusión de las ondas) y los que producen las imágenes. Entre estos últimos, los sistemas que funcionan a bordo de satélites se encargan de obtener imágenes de la superficie terrestre. La cobertura comercial de estas imágenes es de alrededor de 10 por 10 km.

Entre los radares utilizados como equipo de las plataformas espaciales, los más comunes son el radar de apertura real (por ejemplo, SLAR, side looking airborne radar) y el radar de apertura sintética (SAR). El último, en la mayoría de los casos, funciona en las bandas de microondas L (con resolución promedio entre los 25 y 40 m) y C (la resolución media 30 m) consideradas de mayor resolución. Entre las plataformas internacionales de sistemas de satélites equipadas con radares se encuentran:

SEASAT, SIR-A, SIR-B, ERS-1, RADARSAT y J-ERS-1. Todos estos radares forman parte de un sistema universal, cuyos objetivos están definidos dentro de un programa mundial conocido con el nombre de Sistema de Observación de la Tierra (EOS).

El principal objetivo de EOS es el estudio continuo de la superficie terrestre, con una cobertura global, con el propósito de obtener series de tiempo de la dinámica de la cubierta edáfica, de las áreas forestales, etc. (Evans, 1992).

Las ondas de longitud entre 3 mm y 30 cm son las más recomendables para las exploraciones del suelo, en tanto que las ondas de longitud menor o mayor a las señaladas propician ruidos considerables en las imágenes.

Además de estos sistemas que funcionan a nivel mega, existen los radares portátiles (activos, GPR y SIR), utilizados durante las exploraciones directas y puntuales del suelo o del subsuelo a nivel macro. El principal objetivo del análisis con este tipo de radares consiste en evaluar la discontinuidad de los horizontes dentro del perfil que se distinguen entre sí por sus propiedades físicas o químicas, con una profundidad de la exploración que va desde unos centímetros hasta 25 metros aproximadamente.

La base del radar está constituida por dos antenas : la emisora y la receptora de las señales electromagnéticas. Estas antenas pueden emitir y recibir ondas en diferentes polarizaciones. Si las ondas se emiten y se reciben en sentido vertical, las antenas tienen una polarización VV. Si las señales son emitidas y recibidas en sentido horizontal, la polarización de las antenas es HH. La

polarización de las antenas puede ser de cualquier otro tipo.

Dos puntos críticos del uso adecuado de los radares son la calidad de las imágenes y la capacidad del investigador de interpretarlas.

Se reconoce que la técnica de radares es fuertemente dependiente de las propiedades del sitio donde ella se aplica y también de la capacidad del personal que interpreta los resultados de las exploraciones (Doolittle, 1987).

Son tres los principales parámetros que definen la calidad de las imágenes del radar: la resolución lateral, la resolución vertical (o la profundidad de penetración de las ondas), y la heterogeneidad del medio estudiado.

El diámetro de las antenas es el parámetro determinante de la resolución lateral de la técnica. La resolución espacial de un sistema de apertura circular se calcula como:

$$R_s = lh / o \quad (1)$$

donde R_s , es el tamaño mínimo del objeto identificable; l es la longitud de la onda; h es la altura desde la cual se hace la observación; o es el diámetro de la apertura efectiva de la antena (Chuvieco, 1990).

La limitación del tamaño del área de trabajo derivada del diámetro de la antena se supera con el radar de apertura sintética, cuyo funcionamiento está basado en el fenómeno de Doppler. En este caso, el diámetro de la antena es equivalente a la distancia que existe entre los dos puntos observados.

Otros parámetros importantes son el ángulo del haz de rayos, la dirección de su propagación, la amplitud de las ondas, la variación espectral de estas últimas y la fase de las ondas electromagnéticas.

El ángulo del haz de rayos emitidos determina el ancho de la imagen de un horizonte dado. Mientras mayor sea el ángulo del haz, mayor es el área barrida (penetrada), pero menor es la claridad de la imagen de los límites de los horizontes. En este último caso se dice que los límites no son claramente delineables (Kung y Lu, 1993). En el aire, el ángulo medio del haz de rayos electromagnéticos es igual a 90 grados en tanto que en el agua es de 6.4 grados.

Para obtener una imagen clara, es necesario, por un lado, minimizar el ángulo del haz de rayos emitidos y, por el otro, maximizar el coeficiente de reflexión de las ondas.

En el caso concreto del radar de penetración terrestre (GPR), este puede moverse por la superficie terrestre durante la exploración o mantenerse en una posición fija. El movimiento se realiza manualmente o utilizando vehículo. La precisión de la imagen dependerá de la velocidad del movimiento del radar por la superficie. Según la bibliografía, las velocidades más comunes que se utilizan durante los trabajos de campo están en el intervalo de 1 a 5 km/h, para un estudio poco preciso y de 0.3-1.0 km/h para obtener una imagen de mayor precisión.

El tiempo de barrido (scanning) de la superficie por las ondas del radar es otro factor importante que varía ampliamente pero, en promedio, se puede hablar de 110 ns o de tasas

del barrido de 25.6 scans/seg (Mokma *et al.*, 1990).

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS QUE INTERVIENEN EN EL FENOMENO

Para entender mejor la problemática que existe durante las interpretaciones de las imágenes del radar se verá brevemente cuáles son las propiedades de los componentes condensados del suelo (sólido y líquido) que pueden influir de un modo activo sobre las ondas electromagnéticas externas.

En este punto de la discusión se consideran importante recordar el origen dual de la materia, semejante al de la luz. Este concepto es, quizá, el más discutido por los físicos hasta el momento y tiene, además, una inmensa importancia práctica dentro del campo de la percepción remota.

Se sabe que, en ciertas circunstancias, la materia se comporta como un conjunto de partículas de diferente tamaño y origen pero, en otras, tiene un comportamiento de tipo ondulatorio (Halliday y Resnick, 1978). De este modo, puede establecerse que, en determinadas condiciones, los electrones y todas las otras partículas, cargadas o descargadas, se comportan como ondas.

Sin embargo, si dentro de las técnicas pasivas de percepción remota el carácter ondulatorio de la materia es la base para la interpretación del fenómeno, en las técnicas activas este aspecto no se toma en cuenta hasta el momento.

Albedo.

La propiedad física de los suelos integradora del carácter ondulatorio de la materia, es el albedo, hasta la fecha utilizado solamente como un indicador de la reflexión relativa de la luz solar por la superficie del suelo.

El albedo (a_c) es una medida de la capacidad de reflexión de la superficie activa del suelo o de cualquier superficie en general. Muchas veces en física de suelos se maneja el término más complejo de albedo de la radiación de la onda corta. De este modo, el albedo se define como la relación entre la radiación de la onda corta reflejada (R_c) y la radiación acumulada (Q_c) (Dimo, 1976):

$$a_c = R_c / Q_c \quad (2)$$

La diferencia entre 1 y a_c se conoce como coeficiente de adsorción de la radiación de la onda corta - k_s .

En la definición del albedo mencionamos que es una propiedad relacionada con la superficie del suelo. En realidad a_c no caracteriza a la superficie en el sentido matemático del término, sino a una capa fina del suelo, dentro de la cual se realiza la adsorción de la radiación solar, un calentamiento y la emisión posterior de energía electromagnética. Comúnmente esta capa se denomina superficie activa, entendiendo como tal una capa tridimensional (Chudnovskiy, 1962).

El albedo del suelo depende de su color, de la rugosidad, de la humedad y del carácter de la vegetación (Vadiunina y Korchagina, 1986). Mientras más seco es el suelo, más lisa su superficie, y más claro su color, mayor es su albedo (Cuadro 1, según Voronin, 1986).

Cuadro 1. Coeficiente del reflejo de la radiación acumulada (α albedo) por las superficies naturadas (Voronin, 1986).

Carácter de la superficie	α	Carácter de la superficie	α
Nieve (fresca)	0.8 - 0.85	Campo en descanso	0.12 - 0.35
Nieve (derretida)	0.3 - 0.65	Suelo laboreado humedo	0.05 - 0.14
Sal (seca)	0.5	Pastizal verde	0.16 - 0.27
Cal	0.45	Pastizal seco	0.16 - 0.13
Arena de cuarzo	0.35	Estepa (humeda)	0.22
Arcilla oscura	0.02-0.08	Estepa (seca)	0.32
Arcilla fresca			
Arcilla oscura	0.16	Campo con rastrojo	0.15 - 0.17
Arcilla seca			
Arena humeda	0.03	Campo agrícola con gramíneas	0.1 - 0.25

Existe una estrecha relación entre la génesis del suelo y su capacidad de reflexión de la energía solar. Esta relación se basa en el carácter del material húmico del suelo. Según datos bibliográficos, el albedo de los Chernozems es de alrededor de 14% en estado húmedo y de 8% en estado seco, mientras que la nieve tiene un albedo de alrededor de 80% y la arena blanca del cuarzo, entre 35-40% (Vadiunina y Korchagina, 1986).

Los aparatos que se utilizan para medir el albedo reciben el nombre de los albedómetros.

Propiedades electromagnéticas de los suelos.

Las técnicas activas de percepción remota parten del hecho que las propiedades electromagnéticas del suelo son las responsables directas de su interacción con las ondas electromagnéticas. Estas propiedades tienen su origen en el campo eléctrico natural, propio de cualquier suelo que aparece de un modo espontáneo en el límite entre la fase sólida y el agua del suelo o que se forma como un producto de la aplicación de un campo externo (Vadiunina y Korchagina, 1986), y en el campo geomagnético natural de la tierra. Si el primer campo está bastante estudiado en suelos de diferente génesis, la influencia del segundo sobre las propiedades del suelo se ha considerado poco hasta el momento. Del mismo modo, si las propiedades eléctricas del suelo se toman en cuenta durante el estudio del fenómeno de su interacción con las ondas electromagnéticas, las propiedades magnéticas, a pesar de su importancia, siguen olvidadas por los físicos de suelos.

Se sabe que las partículas sólidas del suelo tienen cargas eléctricas, que pueden ser

constantes o variables, positivas o negativas, dependiendo esto último de la génesis del suelo. También es conocido que en la naturaleza predominan los suelos con cargas negativas, aunque en México, al igual que en otros países tropicales y subtropicales, los suelos de carga variable tienen mucha importancia.

Se tratará de describir brevemente las principales propiedades eléctricas del suelo que afectan la trayectoria del movimiento de las ondas electromagnéticas dentro de los medios condensados. Las cuales determinan la resolución vertical de las técnicas de la percepción remota activa y la exactitud de la imagen obtenida.

Propiedades eléctricas.

Entre las propiedades eléctricas del suelo el primer lugar por su importancia y por la cantidad de información genética que lleva lo ocupan las propiedades electrocinéticas. Dentro de estas últimas se distinguen: a) el potencial electrocinético (μ); b) la conductividad superficial específica (K_s); c) el coeficiente de efectividad de la conductividad superficial del suelo (I) y d) el potencial de fluidez (la diferencia entre los potenciales que aparecen en los límites de la columna del suelo durante el flujo de agua bajo presión).

a) Potencial electrocinético.

Alrededor de las partículas sólidas cargadas del suelo se forma una doble capa eléctrica (DCE) de contraiones que tienden a equilibrar la sobrecarga. En el límite entre las fases sólida y líquida aparece el potencial termodinámico (Y). La parte de este potencial, conocida también con el nombre de potencial

de Nernst, desde la capa de iones fuertemente adsorbidos hasta la solución libre equilibrada (donde la carga es igual a cero), corresponde al potencial electrocinético o potencial- μ (Vadiunina, 1979).

El potencial electrocinético del suelo depende de la concentración de sales en la solución, del grado de dispersión del suelo, y del tipo de cationes que saturan las arcillas (Vadiunina, 1979). Según esta autora, los iones que no participan en la construcción de la red cristalina de minerales no cambian su potencial, por lo que cualquier incremento en su concentración provoca la disminución de la DCE y la correspondiente caída de potencial- μ . La dilución de la solución se refleja en un incremento del potencial electrocinético.

En lo que se refiere al grado de dispersión del suelo, según los estudios de Vadiunina (1979), mientras más pequeñas son las partículas, mayor es su potencial, tanto termodinámico como electrocinético. Las arcillas montmorilloníticas tienen un μ -potencial mayor que las caoliniticas (Vadiunina, 1979).

Según datos de Gorbunov (Vadiunina, 1979), en las arcillas saturadas con diferentes cationes, el potencial electrocinético cambia del siguiente modo: Li-arcilla, 74.9; Na-arcilla, 69.0; Ca-arcilla, 30.5 mV.

Además de las propiedades discutidas anteriormente, la magnitud del potencial- μ refleja de un modo objetivo otras propiedades del suelo tales como el grado de salinidad y la superficie específica.

b) Conductividad superficial.

Ya que en la doble capa eléctrica alrededor de la partícula sólida del suelo se concentra un exceso de iones (principalmente cationes), la superficie de las partículas es capaz de transmitir la corriente eléctrica (Vadiunina y Korchagina, 1986).

c) Coeficiente de efectividad de la conductividad superficial.

La relación entre la suma de las conductividades de la solución libre (K_v) y de la superficial (K_s), y la conductividad K_v se define como a_s , coeficiente de efectividad superficial de las partículas sólidas del suelo (Vadiunina y Korchagina, 1986). Según estos autores, el valor de a_s se incrementa al disminuir la concentración de la solución y el radio de los poros. Vadiunina y Korchagina (1986) relacionan este fenómeno con el decremento más rápido de los iones en la solución libre en comparación con el número de iones de la capa difusa de la DCE., por lo que aumenta el grado de participación de estos últimos en la transmisión total de la electricidad.

La siguiente propiedad eléctrica derivada tiene mucha importancia dentro del contexto del presente escrito: el coeficiente de resistencia estructural del suelo b . Este refleja el grado de disminución de la conductividad eléctrica del suelo (K_s) por la fase sólida (K_{fs}), que es un cuasi-dieléctrico que se determina según la siguiente ecuación:

$$K_s = b \cdot K_{fs} \text{ y } b = K_v / K_{fs} \quad (3)$$

Este coeficiente b tiene una significancia física única para la conductividad

de cualquier sustancia en el suelo, incluyendo tanto el calor como los gases y la materia. Su importancia en la física de suelos se relaciona con el papel de la fase sólida en diferentes tipos de flujos.

Los dos últimas propiedades eléctricas del suelo están relacionadas con el flujo de la fase líquida bajo la influencia de la corriente eléctrica externa y con el movimiento de las partículas sólidas. En el primer caso, se trata del coeficiente de electroosmósis y, en el segundo, del coeficiente de electroforesis. El origen y las regularidades del comportamiento de las propiedades mencionadas se discuten en cualquier libro de físico-química.

d) Conductividad eléctrica.

Por conductividad eléctrica del suelo se entiende su capacidad de transmitir una corriente eléctrica de intensidad I bajo la acción de la tensión eléctrica U (Vadiunina y Korchagina, 1986):

$$R = I/U \text{ (Sm/m)} \quad (4)$$

La conductividad eléctrica total del suelo consiste de la conductividad de la solución libre (K_v) y la de la superficie de las partículas sólidas del suelo (K_s). Si la contribución del primer componente en el fenómeno de la interacción de las ondas electromagnéticas y suelo es reconocida, el papel del segundo no está claro.

La conductividad eléctrica de las rocas y de los minerales fluctúa entre 10^{-7} y 10^{-15} Sm/m.

La conductividad eléctrica depende del contenido de humedad en el sistema (W_i), de

la concentración de sales (C), del contenido de aire (P) y de la temperatura del suelo (t).

e) Constante dieléctrica.

La principal propiedad del suelo que caracteriza su comportamiento como un dieléctrico es la constante dieléctrica, magnitud sin dimensión que muestra en cuánto la constante dieléctrica del suelo es mayor que la del vacío (donde ésta es igual a 1 en el sistema SI).

El suelo es un sistema compuesto de varias fases, por lo que son varios los parámetros que definen el valor de su constante dieléctrica. Antes de todo tiene que recordarse que tanto la fase sólida como la líquida del suelo son dieléctricas, aunque, a veces, a la fase sólida se le denomina como la semi-dieléctrica por su alta resistencia eléctrica. Los suelos salinos, al contrario, tienen una resistencia eléctrica baja y se describen como conductores (Vadiunina y Korchagina, 1986). En el caso de la presencia de una corriente eléctrica externa, dentro del suelo se inducen dos tipos de corrientes: la corriente reactiva I_r (que emerge entre las moléculas del dieléctrico sin que éstas cambien su posición) y la corriente de conducción I_a (relacionada con las moléculas libres que están en un movimiento térmico). La relación entre ambas corrientes define la pérdida de tensión de la corriente externa durante su paso por el dieléctrico (Vadiunina y Korchagina, 1986).

Para calcular la constante dieléctrica del suelo puede utilizarse, el modelo teórico de Maxwell, aplicable a una mezcla homogénea de sustancias con diferentes constantes dieléctricas distribuidas al azar dentro de un medio. Son cuatro las fases del suelo que, en

este caso, tienen que considerarse, ya que cada una de ellas tiene una constante dieléctrica que difiere considerablemente de la de las otras.

La fase sólida del suelo tiene una constante dieléctrica (ϵ_s) que varía en diferentes suelos entre 3 y 5. Sin embargo, varios suelos tropicales y subtropicales muestran valores excepcionalmente altos de esta constante (entre 15 y 30). Como ejemplos concretos de estos últimos suelos podemos mencionar los Vertisoles y los Ferrasoles (Dirksen y Dasberg, 1993).

El segundo componente del suelo que influye sobre la constante dieléctrica (ϵ) del sistema es la fase líquida, la que tiene que tratarse de un modo diferente, según las categorías de agua. Los cálculos se hacen aparte para el agua libre (ϵ_{fw}) y el agua fuertemente adsorbida por la superficie de las partículas (ϵ_{bw}). El contenido de la primera categoría de agua es igual a la diferencia entre Q_i y Q_{bw} , donde la última variable es el contenido de agua fuertemente adsorbida por la superficie del suelo. Ambas categorías de agua influyen sobre la constante dieléctrica del sistema, pero su influencia es de distinta índole (Dirksen y Dasberg, 1993). Así, por ejemplo, según estos autores, cualquier incremento en el contenido de agua libre en el suelo se refleja en un brusco aumento de su constante dieléctrica, ya que esta última propiedad tiene su valor máximo en el caso del agua libre ($\epsilon_{fw}=80$). En lo que se refiere al agua fuertemente adsorbida, según la bibliografía, se caracteriza por una constante dieléctrica cuyo valor fluctúa entre 20 y 50 (Dirksen y Dasberg, 1993).

El siguiente componente cuya presencia en el espacio poroso (θ) y $\epsilon_a=1$ influye de un

modo drástico sobre la constante dieléctrica del sistema es el aire, dado que su ϵ_a es igual a 1.

$$E = \frac{3\epsilon_s + 2(\theta - \theta_{bw})(\epsilon_{fw} - \epsilon_a) + 2\theta_{bw}(\epsilon_{bw} - \epsilon_a) + 2(\theta - \theta)(\epsilon_a - \epsilon_a)}{3 + (\theta - \theta_{bw})(\epsilon_s/\epsilon_{fw} - 1) + \theta_{bw}(\epsilon_s/\epsilon_{bw} - 1) + (\theta - \theta)(\epsilon_s/\epsilon_a - 1)}$$

(Ecuación 5)

Además del modelo teórico mencionado, existen varios modelos puramente empíricos que definen la relación entre la constante dieléctrica del sistema y el contenido de agua. Los más utilizados son el de Topp (Topp *et al.*, 1980) y el de Birchak y (Birchak *et al.*, 1974).

$$\epsilon = 3.03 + 9.3 \theta + 146 \theta^2 - 76.7 \theta^3 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\epsilon = (1 - \theta) \epsilon_a^\alpha + (\theta - \theta) \epsilon_a^\alpha + (\theta - \theta_{bw}) \epsilon_{fw}^\alpha + \theta_{bw} \epsilon_{bw}^\alpha \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde ϵ es el parámetro de la curvatura.

De todo lo señalado puede deducirse que las propiedades físicas del suelo que mayor efecto tendrán sobre la constante dieléctrica del sistema son la densidad aparente del suelo y su superficie específica (Dirksen y Dasberg, 1993), cuyas magnitudes, además del contenido de agua y la concentración de sales, pueden estimarse de la información obtenida por los sensores remotos.

Existen otras propiedades eléctricas del suelo que, por falta del espacio, no podrán describirse dentro del presente trabajo.

Propiedades magnéticas.

El conocimiento de las propiedades magnéticas de los sistemas dispersos (suelos, sedimentos etc.) es indispensable durante las exploraciones electromagnéticas de los medios naturales realizadas con el propósito de caracterizarlos desde el punto de vista físico. Sin embargo, los estudios de las propiedades magnéticas de los suelos son, hasta el momento, más que limitados.

Para la caracterización física de los suelos y de los subsuelos, desde el punto de vista de su actividad magnética se determinan la susceptibilidad magnética específica (X), el magnetismo residual (I_r), la magnetización saturada (I_s), y la fuerza coercitiva (H_c).

La capacidad de una sustancia de magnetizarse (o imanizarse) es caracterizada por su susceptibilidad magnética (Vadiunina y Korchagina, 1986). Entre los componentes de la fase sólida del suelo se encuentran: los diamagnéticos (con una susceptibilidad menor que 0, por ejemplo, las ortoclasas, el cuarzo, el agua y la materia orgánica); los para y antiferromagnéticos (con una susceptibilidad mayor que 0 y entre $12.6-1172 \cdot 10^{-6}$ SI, como por ejemplo, la biotita, la hematita, la siderita, la lepidocrocita etc.); los ferro y ferrimagnéticos (con una alta susceptibilidad magnética, que varía entre $3.15-100 \cdot 10^{-3}$ SI; ejemplos son los basaltos, las andesitas, la maggemita y la magnetita). De este modo la susceptibilidad magnética del suelo se compone de la susceptibilidad de los dia-, para- y ferromagnéticos (Vadiunina y Korchagina, 1986).

La propiedad más estudiada ha sido la susceptibilidad magnética de los suelos. Se acepta que su magnitud es distinta para suelos de diferente génesis y sus respectivos horizontes genéticos, por lo que la susceptibilidad magnética se define como una propiedad física característica de cada suelo (Vadiunina y Korchagina, 1986). Según los datos de estos autores, el valor máximo de la susceptibilidad magnética se presenta en los Krasnozems, desarrollados sobre los basaltos y andesitas (los suelos ferralíticos) y en los Chernozems. Todos los suelos hidromórficos tienen una susceptibilidad magnética mínima.

Los mismos autores mencionan que, dentro del perfil del suelo, los horizontes húmico e illuvial tienen la máxima susceptibilidad magnética, mientras que los horizontes hidromórficos se caracterizan por valores mínimos de esta propiedad. Según Vadiunina y Babanin (1972), la susceptibilidad magnética puede servir de un buen indicador de los procesos elementales de formación de suelos (gleización, acumulación de arcilla, proceso de formación de solod, podzolización, etc.), relacionados con las migraciones y transformaciones de los minerales del hierro en el suelo.

En general, el intemperismo provoca la disminución de los parámetros magnéticos intensivos en el suelo, en comparación con los del material parental (Ivanov *et al.*, 1994). Sin embargo, estos autores mostraron empíricamente que la susceptibilidad magnética se incrementa de modo simultáneo con la acumulación de humus en el suelo. Según Ivanov *et al.* (1994) este crecimiento se relaciona con el aumento en la concentración de magnetita en el horizonte húmico como resultado de su síntesis durante los procesos de formación de suelos.

El coeficiente universal K es utilizado para definir el grado de automorfismo de suelos de diferente génesis (Ivanov *et al.*, 1994). K representa la relación entre la susceptibilidad magnética del horizonte húmico del suelo y su material parental. Para estos autores, K es menor que 1 en los suelos hidromórficos y es mayor que 1 en condiciones automórficas.

Varios autores mencionan que la fracción de las partículas arcillosas del suelo tiene la máxima susceptibilidad magnética en comparación con las partículas de diámetro distinto. Este hecho se relaciona con la génesis

de la magnetita en los suelos (Ivanov *et al.*, 1994).

Las regularidades de la dinámica de las restantes propiedades magnéticas con la génesis del suelo han sido poco estudiadas hasta el momento.

La magnetización residual natural del suelo (I_n) se forma durante el enfriamiento de las rocas fundidas, con alto contenido de ferromagnéticos (Vadiunina y Korchagina, 1986). Las rocas memorizan información sobre el campo geomagnético de la Tierra que existía en el momento de su formación durante cientos de miles de años. Esta memoria es distinta en el caso las rocas cristalinas y las sedimentarias: si en las primeras I_n se relaciona con el proceso de orientación de los compuestos ferromagnéticos durante el enfriamiento de las rocas con una temperatura superior al punto de Kuri en la dirección del campo natural existente, en las rocas sedimentarias, frecuentemente ricas en carbonatos, el contenido de ferromagnéticos es menor (Vadiunina y Korchagina, 1986). Por esta razón, en el último caso I_n es mucho menor y fluctúa entre 10 y $15 \cdot 10^{-3}$ A/m.

Según los datos de Vadiunina y Smirnov (1976), en los suelos de distinta génesis y en diferentes horizontes genéticos I_n fluctúa entre 4 y $50 \cdot 10^{-3}$ A/m.

La magnetización se relaciona con la susceptibilidad magnética por la siguiente ecuación:

$$X = I/H$$

donde H es la tensión del campo magnético.

Se sabe que H de la Tierra es en promedio igual a 0.5 E. En el sistema SI H se mide en A/m. Un A/m es igual a $12.6 \cdot 10^{-3}$ E (Vadiunina y Korchagina, 1986).

De acuerdo con Nagat, citado por Vadinina y Korchagina (1986), sobre el valor de I influyen varios factores. Según el origen de ellos se distingue entre la magnetización, la isotérmica (I_t), la viscosa (I_v), la termorresidual (I_r), la sedimentaria (I_{no}) y la química (I_{nx}).

Como se mencionó anteriormente, hay pocos estudios sobre el comportamiento de estas propiedades magnéticas en suelos de distinta génesis.

Otra propiedad magnética es la fuerza de coerción H_c del suelo. Esta propiedad se mide, después de la determinación de I_n , desmagnetizando las muestras con corriente eléctrica alterna. Posteriormente, la muestra se magnetiza en un campo H-constante hasta la saturación y de nuevo se desmagnetiza con un campo magnético de dirección inversa al inicial. Finalmente, se mide la H_c .

Según Vadiunina y Korchagina (1986), H_c en los horizontes A₁ y B de un Podzol es igual a $31.84 \cdot 10^{-4}$ A/m. De acuerdo con los resultados de los autores recién citados, en los suelos grises forestales H_c fluctúa entre 33.4 y 39.8 por 10^{-4} A/m, mientras que en los Chernozems baja hasta $15.9 - 26.5$ A/m. Los resultados señalados permiten afirmar que I_n es más estable en los suelos Podzol y Gris forestal que en el Chernozem.

De este modo, podemos concluir que las propiedades magnéticas del suelo dependen directamente de su génesis y son indicadores de los distintos procesos de formación de suelos.

El conocimiento de las regularidades de su dinámica en los suelos es importante en el contexto de la interpretación de las imágenes obtenidas por los métodos de percepción remota activa.

Cabe mencionar que en los suelos tropicales y subtropicales los procesos de transformación y migración de las sustancias de hierro son fundamentales en la génesis de aquellos. Por otro lado, en México existe una estrecha relación de los suelos con los depósitos volcánicos, frecuentemente enriquecidos con basaltos y andesitas, rocas de alta susceptibilidad magnética. Lo mencionado resalta la importancia de su evaluación futura.

INTERACCION: SUELO - ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Una vez conocidos el origen y las principales regularidades del comportamiento de las propiedades electromagnéticas del suelo, se verán los supuestos teóricos que, hasta el momento, constituyen la base física de la interpretación, tanto cuantitativa como cualitativa del fenómeno de interés del presente trabajo. Las siguientes leyes físicas se suponen como básicas:

1. Se supone que la ley de Snell es aplicable a la estimación de la reflexión de las ondas del radar, por lo que se tiene:

$$\sin(Q_{in})/\sin(Q_r) = (E_r/E_{in})^{1/2},$$

donde:

Q_{in} = ángulo de incidencia de las ondas;
 Q_r = ángulo de los rayos reflejadas;
 E_r = constante dieléctrica del medio donde entran los rayos;
 E_{in} = constante dieléctrica del medio inicial (aire en nuestro caso).

2. Se supone que en medios con una conductividad eléctrica relativamente baja pueden predecirse los coeficientes de reflexión (r) de las ondas electromagnéticas, con base en los datos de las constantes dieléctricas de los

medios en interacción (E_{in} y E_r) (Ramo *et al.*, 1984):

$$r = (E_{in}^{1/2} - E_r^{1/2}) / (E_{in}^{1/2} + E_r^{1/2})$$

De este modo, puede concluirse que son solamente dos las propiedades físicas eléctricas del suelo a las que actualmente se les atribuye un efecto directo sobre las ondas electromagnéticas y cuya importancia dentro del fenómeno está demostrada empíricamente: la constante dieléctrica (ϵ_s) y la conductividad eléctrica de la solución del suelo (K_w).

Hasta el momento, los siguientes hechos relacionados con las propiedades mencionadas están confirmados empíricamente y forman la base física para la interpretación del fenómeno:

a. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas dentro de un medio es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica del medio (Kung y Lu, 1993).

b. La profundidad (the skin depth) de penetración de las ondas electromagnéticas dentro de un conductor es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su conductividad eléctrica: de este modo, un medio con mayor conductividad eléctrica tiene una menor profundidad de penetración de las ondas. La conclusión más importante de esta

regla es que la onda electromagnética que penetra a una profundidad Z es amortiguada exponencialmente en un valor Z/K (Ramo *et al.*, 1984).

c. Para suelos con alta conductividad eléctrica, la antena de frecuencia más baja puede ser de mayor utilidad, ya que la profundidad de penetración es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia (Kung y Lu, 1993).

Hasta el momento, la interpretación de las imágenes se basa en el análisis de las variaciones de la escala gris, de la luminosidad o de áreas de diferentes colores dentro de las imágenes. Durante estas evaluaciones se parte de la suposición de que el incremento de la señal de reflexión produce una imagen más oscura. Sin embargo, ya existen nuevas técnicas que incrementan la exactitud del proceso de interpretación. Entre estas técnicas se encuentran dos que llaman mayormente la atención. La primera es la segmentación de las imágenes multiparametrales, que permite segmentar las imágenes en varias clases de áreas geofísicamente homogéneas, las cuales posteriormente son analizadas. La segunda es la polarimetría de imágenes (imaging radar polarimetry). El nuevo producto de esta técnica es denominado datos o imágenes polarimétricas del radar (Evans, 1992).

NECESIDAD DEL USO DE LAS NUEVAS TECNICAS ANALITICAS

Según la bibliografía, las técnicas analíticas de la estadística clásica y de la geoestadística siguen siendo las más utilizadas en la edafología. Sin embargo, ninguna de ellas permite evaluar completamente el origen

continuo de la variabilidad de las propiedades del suelo en el espacio, presente a diferentes niveles de su organización jerárquica. La estadística clásica y permite considerar la variabilidad del suelo en el espacio a un solo nivel, al suponer que en todos los otros niveles el suelo es un cuerpo homogéneo.

El problema se agrava en el caso del uso de una cascada de métodos de diferente escala durante el estudio del suelo *in situ*.

La geometría fractal es una nueva técnica analítica que permite la descripción cuantitativa de la variabilidad del objeto a través de todo el rango de escalas (Sposito y Reginato, 1992). La geometría fractal permite manejar los sistemas compuestos de partes unidos entre sí en un todo por medio de los fractales (Feder, 1988). Los fractales forman una jerarquía dentro de la cual cada uno de los niveles representa una versión de un nivel de escala inferior o superior a él (Perfect y Key, 1991). Hasta el momento, la geometría fractal se utiliza con mucho éxito en la física de suelos para describir la distribución de las partículas sólidas elementales, de los micro y macroagregados y de los poros a diferentes niveles de organización del suelo. Sin embargo, su uso futuro es muy prometedor en los trabajos de percepción remota.

CONCLUSIONES

1. El estudio del suelo requiere del uso de técnicas no-destructivas de análisis, las que permiten evaluar su funcionamiento como un sistema.
2. El uso de una cascada de métodos de estudio, con una base física similar pero de

distinta escala, que permiten evaluar el suelo a todos los niveles de su organización, hará posible, en el futuro, describir la variabilidad de las propiedades del suelo en el espacio de un modo continuo.

3. El uso de radares y de cualquier otro tipo de técnicas de percepción remota o de la exploración electromagnética de suelos abre un nuevo horizonte para los estudios de física de suelos.

4. Los ruidos de las imágenes siguen siendo un aspecto crítico de la técnica de GPR. Otra desventaja de la misma sigue siendo la interpretación poco objetiva de las imágenes.

5. La interpretación de los resultados del análisis del suelo por una cascada de métodos de diferente resolución y el manejo integral de la información requiere del uso de nuevas técnicas analíticas, dentro de las cuales la geometría fractal ocupa un lugar especial.

LITERATURA CITADA

- BIRCHAK, J.R., C.G. GARDNER, J.E. HIPPI, and J.M. VICTOR. 1974. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. Proc. IEEE 62:93-98.
- BISDOM, E.B.A., D. TESSIER, and J.F.T.H. SCHOUTE. 1990. Micromorphological techniques in research and teaching (submicroscopy) pp. 581-605. In: L. Douglas (ed.). Soil micromorphology: a basic and applied science. Elsevier.
- CHUDNOVSKIY, A.F. 1962. Las características termofísicas de los materiales dispersos (en ruso). Moscú, Fismatisdat.
- CHUVIECO, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp, S.A. Madrid.
- DIMO, V.N. 1976. El concepto del régimen térmico del suelo y el intercambio térmico entre el suelo y la atmósfera. Pp. 246-302. In: Rode (ed.). Los principios de la organización y los métodos del estudio *in situ* de suelos (en ruso). Moscú, Nauka.
- DIRKSEN, C., and S. DASBERG. 1993. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. Soil Sci. Am. J. 57: 660-667.
- DOOLITTLE, J.A. 1987. Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys. Pp. 11-32. In: W.U. Reybold, and G.W. Petersen (ed.). Soil survey techniques. SSSA Special Publication, number 20. Madison, Wisconsin.
- EVANS, D.L. 1992. Current status and future developments in radar remote sensing. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 47: 79-99.
- FEDER, J. 1988. Fractals. Plenum Press, New York.
- HALLIDAY, D. y R. RESNICK, 1978. Fundamentos de Física. Compañía Editorial Continental, S.A. México.
- IVANOV, A.V., V.F. BABANIN, L.O. KARPACHEVSKIL, I.V. SHPILKINA. 1994. Soil magnetism and its application in diagnostics. In: J. Etchevers (ed.) Materiales del XV Congreso Internacional de ISSS, Acapulco, México.
- KUNG, K.J., and Z.B. LU. 1993. Using ground-penetrating radar to detect layers of discontinuous dielectric constant. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 335-340.
- MOKMAD, L., R.J. SCHAETZL, J.A. DOOLITTLE, and E.P. JOHNSON. 1990. Ground-penetrating radar study of orthoite continuity in some Michigan Hapludols. Soil Sci. Soc. Am. J. 54: 936-938.
- PERFECT, E., and B.D. KEY. 1991. Fractal theory to soil aggregation. Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 1552-1558.
- RAMO, S., J.R. WHINNERY, and T. VAN DUZER. 1984. Fields and waves in communication electronics. 2nd ed. John Wiley and Sons. New York.
- ROZANOV, B.G. 1986. Morfología de suelos (en ruso). Moscú, MGU. 320 p.
- SPOSITO, G., and R. REGINATO. 1992. Opportunities in basic soil science research. SSSA, Madison, Wisconsin.
- TOPP, G.C., J.L. DAVIS, and A.P. ANNAN. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16: 574-582.
- VADIUNINA, A.F. y V.F. BABANIN. 1972. Magnetic susceptibility of some soils (en ruso). Pochvovedeniye 10: 55-66.
- VADIUNINA, A.F. 1979. Electromejoramiento de los suelos salinosódicos (en ruso). Moscú, MGU.
- VADIUNINA, A.F. y Z.A. KORCHAGINA. 1986. Métodos del estudio de las propiedades físicas de suelos (en ruso). Agropromizdat: 328-376.
- VORONIN, A.D. 1986. Fundamentos de la física de suelos (en ruso). Moscú MGU.

EFFECTO DE LA FERTILIZACION NITROGENADA SOBRE LA CONCENTRACION DE COMPUESTOS NITROGENADOS Y PRODUCCION DE MATERIA SECA EN CEBOLLA

Effect of N Fertilization on the Contents of N compounds and dry matter yield of onion

Uribe¹, M. H.R., G. Alcántar² G., J. L. Tirado² T., A. Aguilar³ S. y M. Sandoval² V.

¹CEDEL-CIFAP Norte Centro, Apartado Postal 81 Cd. Delicias, Chih. 33000

²Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 56230

³ Depto. de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx. 56230

Palabras clave: Fertilización nitrogenada, *Allium cepa* L.

Index words: N-Fertilizers, *Allium cepa* L.

RESUMEN

Con el objetivo de estudiar las variaciones de concentración de compuestos nitrogenados y la producción de cebolla por efecto de la aplicación de fertilizantes nitrogenados, se llevó a cabo la siguiente investigación en invernadero en un suelo típico de la región productora de cebolla de Cd. Delicias, Chih., con cebolla de la variedad White grano P.R.R. Se determinó la producción de materia seca y la concentración de nitrógeno total, proteínas solubles, nitrógeno reducido y nitrógeno nítrico, por efecto de la aplicación de dosis crecientes de nitrógeno (0, 50, 100, 150, 200 y 300 kg ha⁻¹) provenientes de urea y nitrato de amonio. En el follaje, la urea incrementó la acumulación de materia seca y el nitrato de amonio favoreció

esta variable en los bulbos. En general, no hubo respuesta a la fertilización nitrogenada debido a un alto contenido de nitrógeno nativo en el suelo. La concentración de nitrógeno en el follaje siempre fue superior a la del bulbo y, en ambos órganos, la concentración mostró tendencia a disminuir conforme la planta alcanzó la madurez. La concentración de proteínas solubles resultó similar en follaje y en bulbo y en ambos órganos disminuyó cuando el cultivo alcanzó la madurez. Sin embargo, la acumulación de proteínas en el follaje se incrementó después del día 133 en más de 400%. Este período coincidió con el crecimiento acelerado del bulbo. Por otro lado, durante este mismo período, disminuyó la concentración de nitrato en el follaje pero aumentó la concentración de N-reducido en el bulbo en más de 400%, lo cual mostró la magnitud de la demanda de nitrógeno reducido en el bulbo para esta etapa de desarrollo del cultivo.

SUMMARY

Mexican farmers apply excessive amounts of nitrogen fertilizers to the onion

Recibido 2-95.

However, the increasing interest in environmental protection and the continuous increase in fertilizer price have lead us to conduct investigations to improve the efficiency of nitrogen fertilizers in order to avoid nitrogen losses by lixiviation and denitrification. In this research, a factorial experiment supplying five levels of N, equivalent to 0, 50, 100, 200 and 300 kg ha⁻¹ with two fertilizer sources, urea and ammonium nitrate, was carried out. Urea increased dry matter accumulation on the shoots of the plants, and dry matter of bulbs increased with ammonium nitrate application. Nitrogen concentrations in the shoots always were higher than N concentrations in the bulbs, and showed a tendency to decrease when plants reached ripeness. Soluble proteins decreased when the crop reached maturity, their concentration in tops and bulbs was similar. However, soluble protein accumulation in shoot was increased more than 400% after the 133th day of growth. That period coincided with the fast growth stage of the bulb. On the other hand, in the same stage nitrate concentration in shoot thereafter the N-reduced concentration in bulb increased more than 400%. The increase of 400% showed the importance of metabolic sink for N-reduced at this growth stage.

INTRODUCCION

El incremento en la demanda de productos agrícolas trae como consecuencia el uso de un mayor número de insumos, especialmente en zonas con agricultura tecnificada, lo cual repercute en un rápido incremento en el uso de los fertilizantes, en particular de los nitrogenados. Los sistemas de manejo en dichas áreas incluyen la aplicación fraccionada del fertilizante nitrogenado de

acuerdo con la demanda y el estado de crecimiento del cultivo, sobretodo en la agricultura de riego donde es posible aplicar el fertilizante disuelto en el agua en cualquier etapa de desarrollo de la planta.

Las plántulas de cebolla son de crecimiento lento y por lo tanto presentan baja demanda de nutrimentos minerales en sus fases iniciales. No obstante se ha reportado que, en general, la cebolla responde en forma favorable a la fertilización, sin embargo, realizar aplicaciones excesivas de nitrógeno, además de ser económicamente incosteable, puede deteriorar la calidad del cultivo y originar problemas ambientales.

Las respuestas del cultivo a las aplicaciones de N pueden ser de tres tipos: a) cuando no hay respuesta a los fertilizantes, situación poco común, como lo reportado por Riekels (1972) para cebollas sin riego, quien sugiere que el nitrato de amonio en cantidades superiores a 33.6 ó 134 kg de N ha⁻¹ puede ser detrimental o tóxico para el crecimiento de las cebollas en suelos con un alto contenido de N nativo, y especialmente en estaciones secas, b) cuando hay respuesta a dosis medias de nitrógeno, entre 111 y 150 kg ha⁻¹, caso en el que están situados la mayoría de los trabajos reportados (Greenwood *et al.*, 1992; Henriksen, 1987; Mengual-Crespo *et al.*, 1979; Riekels, 1972, 1977); y c) cuando hay respuesta a cantidades altas de nitrógeno (186-358 kg de N ha⁻¹) nivel en el que, por lo general, se reportan los rendimientos máximos para la mayoría de las investigaciones realizadas; dentro de éstas se encuentran los trabajos de Bishop, *et al.* (1972), Greenwood *et al.* (1992), y Maier *et al.* (1990a), además de las realizadas por Bailey y Corgan (1986) en la región de Nuevo México, Estados Unidos.

En relación con la concentración de nitrógeno en el follaje, cuando se toma la muestra al inicio del ciclo, es común encontrar valores de 2.60 a 4.57% de N (Duque *et al.*, 1983; Piggott, 1986). Muestras correspondientes a la mitad del ciclo de crecimiento y que han recibido fertilización (112-475 kg de N ha⁻¹) presentan valores de concentración de N de 2.36 a 3.50% de N (Brewster y Butler, 1989; Maier *et al.*, 1990b; Minotti y Stone, 1988; Piggott, 1986), sin embargo, Maier *et al.* (1990b) reportan como intervalo crítico para el follaje valores de 2.40 a 2.90% de N, para esta misma época.

Al final del ciclo, en la cosecha, Piggott (1986) reporta 1.30% de N en el follaje como valor crítico, sin embargo, Wiedenfeld (1986) encontró valores entre 1.34 y 2.87% de N para cebolla fertilizada con N (134 kg de N ha⁻¹), mientras que Duque *et al.* (1983) reportan un valor de 1.96% de N en el follaje.

En general, la concentración de N en el bulbo siempre es menor a la del follaje. Al inicio del desarrollo de la planta, Duque *et al.* (1983) reportan 3.23% de N. Para un cultivo a la mitad de su ciclo, Piggott (1986) establece un valor crítico de 2.75% de N en el bulbo, por lo que los valores reportados por Brewster y Butler (1989) de 0.98% y los de Minotti y Stone (1988) de 1.12-1.75% de N en plantas con fertilización de N (112 kg ha⁻¹) y 0.70-1.14% sin fertilización, se encuentran por abajo de este nivel crítico. Para valores durante la cosecha Piggott (1986) menciona que el nivel crítico es de 1% y el adecuado de 1.20-1.35% de N, por lo que los valores reportados por Bishop *et al.* (1972) con 1.13-1.39%; los de Henriksen (1987), con 1.16-1.46% y los de Duque *et al.* (1983), con 1.85% de N, están dentro del nivel de suficiencia.

Los intervalos de contenido de nitrógeno reportados para los diferentes órganos muestreados en el cultivo de cebolla son variables; a excepción de algunos investigadores (Maier *et al.*, 1990b; Piggott, 1986), la mayoría no reporta valores o rangos críticos, únicamente mencionan la concentración encontrada en el momento del muestreo. El objetivo del presente trabajo fue estudiar las variaciones de diferentes compuestos nitrogenados en follaje y bulbo de la planta y su posible relación, en las diferentes etapas fenológicas, con la producción de materia seca y rendimiento.

MATERIALES Y METODOS

La presente investigación se llevó a cabo en macetas en invernadero y se empleó la variedad de cebolla White grano P.R.R. de fotoperíodo corto. Se utilizó un suelo típico de la región productora de cebolla para bulbo de Cd. Delicias, Chih., clasificado como Yermosol cálcico (FAO/UNESCO), el cual tenía las siguientes características: textura migajón arcillo-arenosa; pH de 7.9 (H₂O, 1:2); conductividad eléctrica de 0.42 dS m⁻¹ (1:5); 1.29% de materia orgánica; 0.06% de nitrógeno total; 24 ppm de fósforo (Olsen); 0.11 meq de K intercambiable/100 g de suelo (CH₃COONH₄) y una capacidad de intercambio de cationes (CIC) de 14.0 meq/100 g de suelo. Al final del experimento se determinó el nitrógeno inorgánico extractable con KCl 2 N (Etchevers, 1987) en el suelo de las parcelas experimentales (Cuadro 1).

Los tratamientos fueron a base de urea o nitrato de amonio y se aplicaron cinco niveles de nitrógeno al suelo (0, 50, 100, 200 y 300 kg de N ha⁻¹). La fertilización nitrogenada se

Cuadro 1. Nitrógeno inorgánico extractable con KCl 2 N determinado en el suelo después del último muestreo de la planta.

Tratamiento	NH ₄	NO ₃ + NO ₂	N inorgánico
kg de N ha ⁻¹	ppm		
Urea			
0	38.6	121.3	159.9
50	31.5	269.3	300.8
100	35.0	297.0	332.0
200	32.6	313.8	346.4
300	32.6	393.0	425.6
Nitrato de amonio			
0	42.1	130.3	172.4
50	45.6	275.0	320.6
100	44.1	297.3	341.6
200	44.6	291.0	335.6
300	39.6	432.1	471.7

fraccionó en cuatro partes iguales en diferentes épocas de crecimiento, conforme a la Figura 1. Al aplicar la primera fracción de fertilizante nitrogenado, se efectuó además una fertilización complementaria equivalente a 100

y 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y K₂O, respectivamente; se utilizaron como fuentes el superfosfato triple de calcio y el cloruro de potasio.

El diseño del experimento consistió de un factorial en bloques completos al azar, con cuatro repeticiones, en donde la unidad experimental estuvo formada por dos macetas. Se realizaron un total de siete muestreos. En cada una de las muestras de follaje y bulbo se determinó la producción de materia seca, las concentraciones de N total (Etchevers, 1987), proteínas solubles (Lowry *et al.*, 1951), nitrógeno reducido (Yemm y Cocking, 1955) y nitrógeno en forma nítrica (Cataldo *et al.*, 1975). A las plantas del primer muestreo no se les determinó N total, ya que el material vegetal no fue suficiente.

RESULTADOS Y DISCUSION

Producción de Materia Seca.

La aplicación de urea incrementó ligeramente la producción de materia seca en el

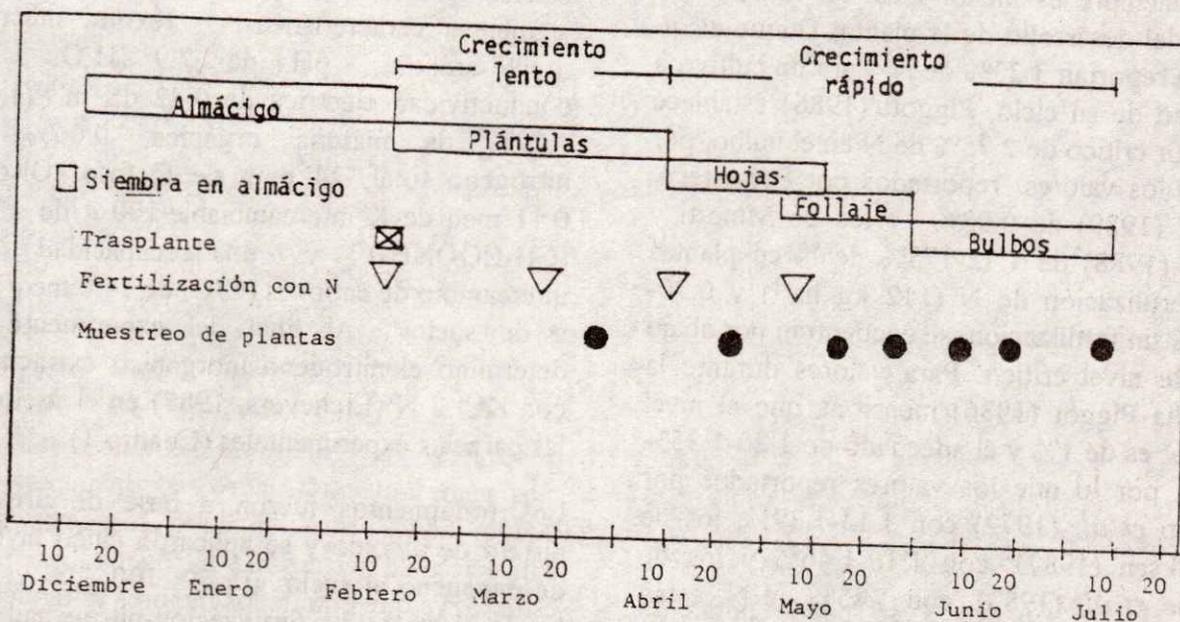


Figura 1. Cronograma del desarrollo del experimento.

Cuadro 2. Acumulación de materia seca en el bulbo y follaje en plantas de cebolla.

Fuente	Materia seca						
	26 de marzo	22 de abril	14 de mayo	27 de mayo	9 de junio	19 de junio	7 de julio
	----- g planta ⁻¹ -----						
Follaje							
Urea	0.173	0.223	0.315	0.519	0.665	1.386 a*	1.850
N de A ^z	0.163	0.244	0.321	0.498	0.608	1.152 b	1.818
C.V.							
Bulbo							
Urea	0.043	0.064 b	0.052	0.141	0.450	1.378 b	4.603
N de A ^z	0.046	0.093 a	0.056	0.127	0.457	1.721 a	4.638
C.V.	31.7	38.9	39.4	48.9	23.4	15.3	8.4

* Valores con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05)

z) Nitrato de amonio

Cuadro 3. Efecto del nivel de fertilizante sobre la producción de materia seca del follaje en cebolla.

Nitrógeno	Materia seca						
	26 de marzo	22 de abril	14 de mayo	22 de mayo	9 de junio	19 de junio	7 de julio
	----- g planta ⁻¹ -----						
kg ha ⁻¹							
0	0.190	0.318a*	0.382a	0.508	0.710	1.117 b	2.086a
50	0.168	0.210 b	0.368ab	0.473	0.724a	1.122 b	2.042 a
100	0.162	0.231ab	0.286 bc	0.565	0.590ab	1.358ab	1.748ab
200	0.170	0.193 bc	0.288abc	0.565	0.548 b	1.566 a	1.459 b
300	0.150	0.213abc	0.266 c	0.432	0.610ab	1.192 b	1.835ab
C:V.	28.6	30.3	20.5	25.9	16.2	15.8	16.6

*Valores con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey 0.05

follaje (Cuadro 2), aunque este comportamiento solamente resultó significativo durante el sexto muestreo (19 de junio; estadio intermedio del crecimiento acelerado del bulbo).

La acumulación de materia seca en el bulbo resultó mayor en las plantas fertilizadas con nitrato de amonio en la mayoría de los muestreos. Sin embargo, las diferencias fueron mínimas y solamente en el segundo y quinto muestreo alcanzaron significancia estadística (Cuadro 2).

En el Cuadro 3 se puede notar de manera sistemática que el tratamiento testigo (sin N) acumuló más materia seca en el follaje y

resultó diferente al compararlo con las dosis altas de N (200 ó 300 kg de N ha⁻¹) a excepción del sexto muestreo, en donde la dosis de 200 kg de N ha⁻¹, no fue estadísticamente diferente a 100 kg de N ha⁻¹, pero ambas fueron diferentes al testigo y a los niveles de 50 y 300 kg de N ha⁻¹.

Durante los tres últimos muestreos (etapa de crecimiento rápido del bulbo), el tratamiento testigo fue de los que produjeron más materia seca (Cuadro 4). En general, se puede indicar que no hubo respuesta a la aplicación de fertilizante nitrogenado en este estudio, ya que uno de los mejores tratamientos siempre fue el testigo, lo cual puede explicarse al analizar el Cuadro 1, donde resalta el alto

Cuadro 4. Efecto del nivel de nitrógeno sobre la producción de materia seca del bulbo en cebolla.

Nivel de nitrógeno kg ha ⁻¹	Materia seca						
	26 de marzo	22 de mayo	14 de mayo	27 de mayo	9 de junio	19 de junio	7 de julio
0	0.047	0.081*	0.064	0.149	0.621a	1.712a	4.720
50	0.045	0.064 b	0.052	0.140	0.588a	1.663a	4.739
100	0.042	0.056 b	0.064	0.157	0.394 b	1.639a	4.427
200	0.047	0.114a	0.053	0.129	0.333 b	1.261 b	4.738
300	0.041	0.77ab	0.037	0.096	0.330 b	1.474ab	4.479
C.V.	31.7	38.9	39.4	48.9	23.4	15.3	8.4

*Valores con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey 0.05)

contenido nativo de nitrógeno inorgánico del suelo utilizado. Estos resultados concuerdan con los de Riekels (1972), quien tampoco encontró respuesta a la fertilización nitrogenada en condiciones semejantes, especialmente en estaciones secas.

Concentración de Nitrógeno Total.

La fuente de nitrógeno no afectó la concentración de N en el follaje ni en el bulbo (Figura 2). La disminución de alrededor de 1% de N entre el primero y último muestreo, tanto en follaje como en bulbo, evidencia el efecto de dilución que se presenta en la mayoría de los cultivos anuales, al acumular una mayor cantidad de materia seca que de nutrimentos minerales en la etapa de formación y maduración de frutos. Corroborando lo reportado por otros investigadores, la concentración de N resultó mayor en el follaje que en el bulbo durante todo el ciclo del cultivo.

La concentración de N en el follaje permaneció constante en un período entre el segundo y cuarto muestreo (inicio de máxima producción de hojas, 22 de abril, a final del crecimiento rápido de follaje, 27 de mayo.

Posiblemente dentro de este período la concentración de N en el follaje puede ser un buen indicador del estatus de N para el cultivo de cebolla.

La concentración de N en el follaje, después del inicio del crecimiento rápido del bulbo (después del 9 de junio), varió desde 2.73% para el tratamiento testigo hasta 3.09% para el tratamiento con 300 kg de N ha⁻¹. Los resultados presentados concuerdan con los reportados por Minotti y Stone (1988). Estos datos se ubican dentro de los rangos críticos indicados por Maier *et al.* (1990b) y Piggott (1986). Inclusive estos valores se encuentran por arriba de los reportados por Brewster y Butler (1989), quienes señalan valores de 2.35% de N en follaje a la mitad del crecimiento (Cuadro 5). Al momento de la cosecha, en el follaje se encontró un valor de 2.42% de N en el tratamiento testigo y entre 2.50 y 2.69% de N cuando se fertilizó, valores más bajos que los reportados por Bishop *et al.* (1972), donde los tratamientos testigo, 90, 180 y 270 kg de N ha⁻¹ presentaron 2.46, 2.83, 2.92 y 3.00% de N, respectivamente. El tratamiento testigo presentó la concentración más baja de N en el bulbo durante todo el desarrollo de las plantas. Las concentraciones de N en el bulbo a la mitad del ciclo variaron

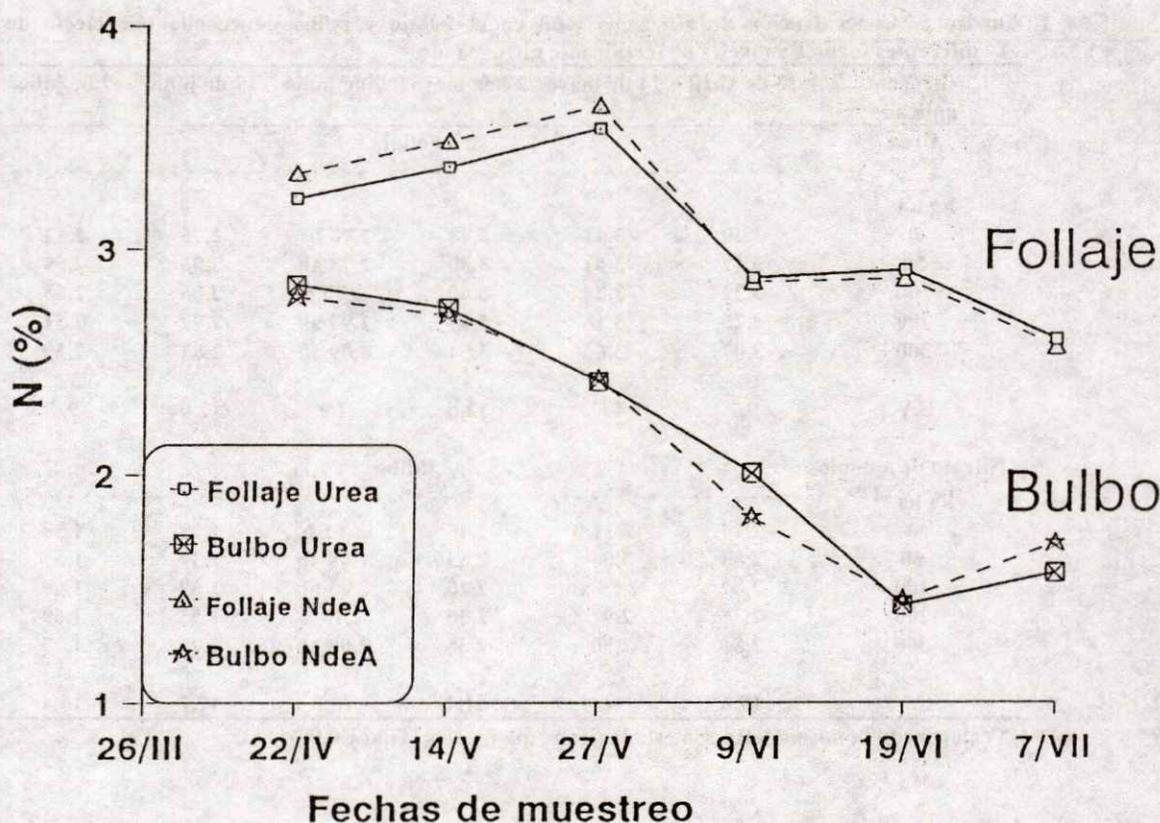


Figura 2. Tendencia de la concentración de N total por efecto de la fuente fertilizante en el follaje y bulbo de la planta de cebolla.

de 1.51% para el tratamiento testigo hasta 2.14% de N correspondiente al tratamiento con 200 kg de N ha⁻¹, 9 de junio (Cuadro 5). Estas concentraciones se ubican ligeramente por arriba de las reportadas por Minotti y Stone (1988), quienes registraron 1.12-1.75% de N con 112 kg de N ha⁻¹, pero se encuentran ubicadas abajo del nivel crítico reportado por Piggott (1986), el cual es de 2.75% de N en el bulbo.

Se han reportado rangos de concentración de N en el bulbo en el momento de la cosecha de 1.30 a 1.39% (Bishop *et al.*, 1972) y de 1.20-1.46% (Henriksen, 1987), sin embargo, Piggott (1986) menciona que el nivel crítico es de 1% y el rango adecuado de

1.20-1.73 de N en el bulbo a la cosecha. Los valores encontrados en este estudio fueron de 1.73% de N, 7 de julio (Cuadro 5), por lo que se puede inferir que las plantas del presente trabajo se encontraban ubicadas dentro del rango de suficiencia.

Contenido de Proteínas Solubles, Nitrógeno Reducido y Nitrógeno Nítrico

La concentración de proteínas solubles disminuyó, de manera muy semejante tanto en el follaje como en bulbos, conforme la planta se acercaba a su madurez (Figura 3). Este comportamiento pudo deberse a que la demanda de compuestos nitrogenados de bajo

Cuadro 5. Concentración de nitrógeno total en el follaje y bulbo de cebolla por efecto de diferentes fuentes y niveles de fertilizante nitrogenado.

Nitrógeno aplicado	22 de abril	14 de mayo	27 de mayo	9 de junio	19 de junio	7 de julio
Urea						
Follaje						
----- % -----						
kg ha ⁻¹						
0	3.40	3.41	3.44	2.73 b*	2.75	2.42
50	3.47	3.61	3.80	2.78 ab	3.06	2.69
100	3.22	3.28	3.60	2.75 b	3.86	2.68
200	3.25	3.18	3.61	2.93 ab	2.92	2.51
300	3.07	3.65	3.54	3.09 ab	2.82	2.59
C.V.	9.2	14.2	12.6	7.9	12.0	9.7
Nitrato de amonio						
Bulbo						
----- % -----						
kg ha ⁻¹						
0	2.76	2.11 b	2.46	1.51 b	1.28	1.58
50	2.83	3.06 a	2.53	1.88 ab	1.39	1.57
100	2.87	2.55 ab	2.40	2.03 ab	1.59	1.60
200	2.75	2.97 a	2.35	2.14 a	1.53	1.69
300	2.84	2.90 a	2.35	2.00 ab	1.46	1.73
C.V.	17.6	16.4	21.4	20.8	17.2	14.4

*Valores con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05)

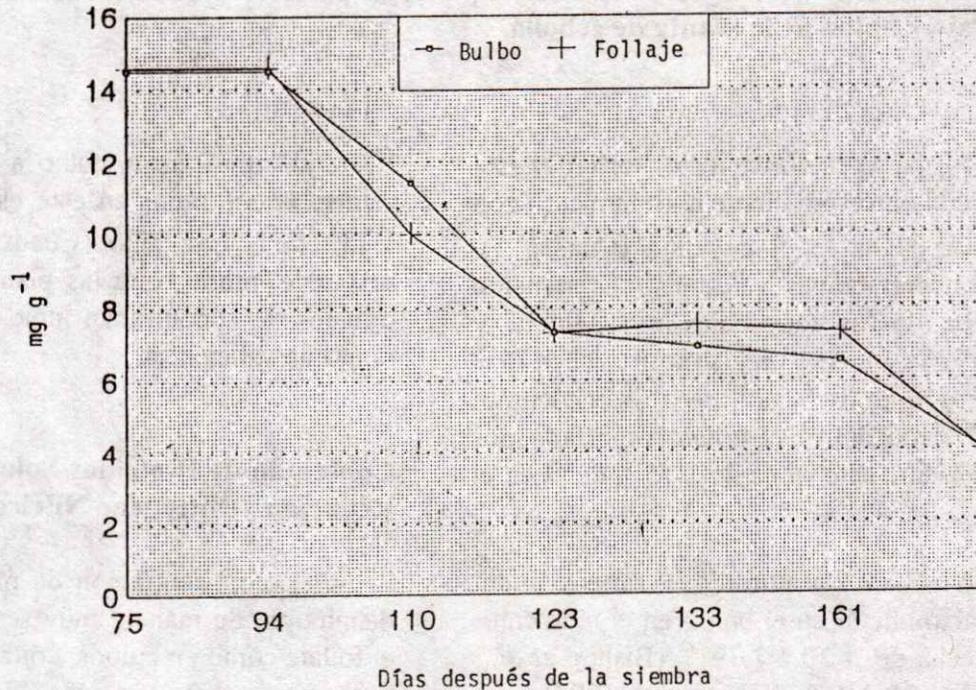


Figura 3. Concentración de proteínas solubles en bulbo y follaje de cebolla.

peso molecular aumenta a medida que el bulbo se empieza a desarrollar. Por otro lado, la acumulación de proteínas solubles mostró la misma tendencia en el follaje y en los bulbos durante casi todo el desarrollo del cultivo, sin embargo, se pudo observar un incremento en su acumulación, de aproximadamente 400%, durante el período de crecimiento rápido del bulbo, 123 a 161 días (Figura 4). Este incremento posiblemente resultó de la hidrólisis de las proteínas del follaje, las cuales son translocadas para satisfacer el alto requerimiento de compuestos nitrogenados del bulbo como principal sitio de demanda (sink metabólico). Durante todo el ciclo de

desarrollo del cultivo, la principal forma de nitrógeno soluble en el follaje resultó ser nitrógeno nítrico. Un considerable decremento en la concentración de nitrato y de nitrógeno reducido en el follaje se detectó a partir del período de rápido crecimiento del bulbo (Figura 5). La disminución en la concentración de nitrato y del nitrógeno reducido en el follaje coincidió con un incremento proporcional de este mismo tipo de compuestos en el bulbo, principalmente de nitrógeno reducido, por lo que se confirma que el bulbo es un importante sitio de demanda en ese período y que gran parte de esos compuestos provienen del follaje. En el bulbo permaneció constante la

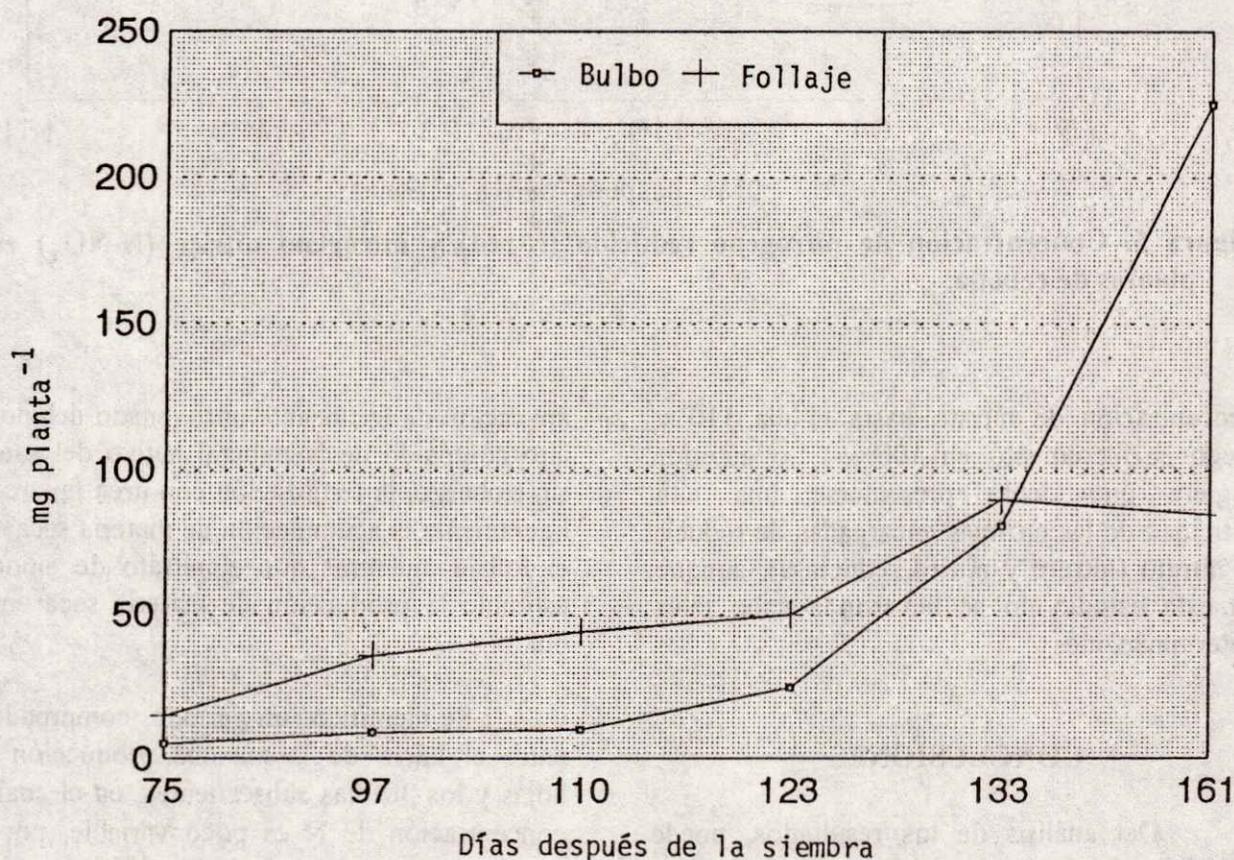


Figura 4. Acumulación de proteínas solubles en follaje y bulbo de cebolla.

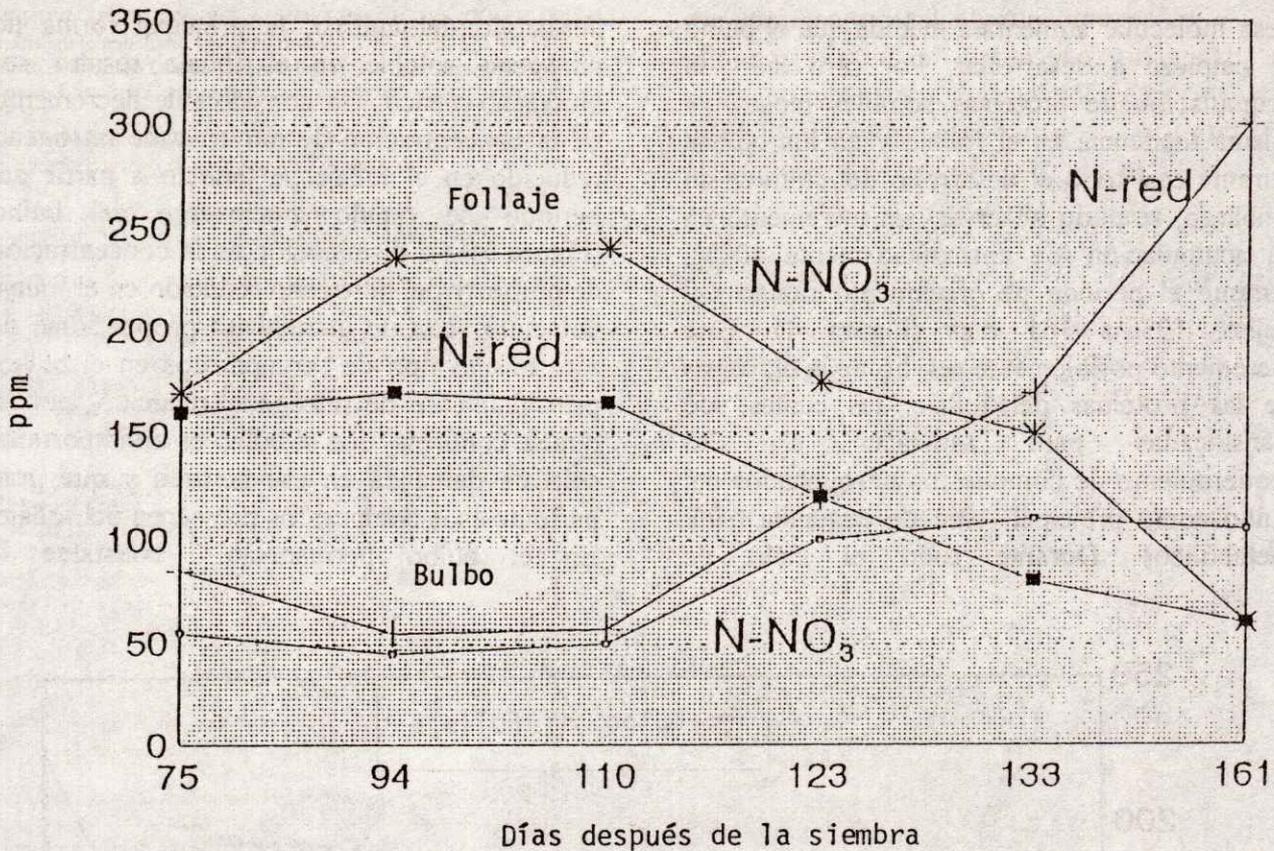


Figura 5. Concentración de nitrógeno reducido (N-red) y nitrógeno nítrico (N-NO₃) en plantas de cebolla.

concentración de nitrato hasta el día 110 y luego se incrementó en 100%. Lo anterior sugiere que debió presentarse una alta actividad de las enzimas encargadas de reducir al nitrato (nitrato y nitrito reductasa), aunque en este estudio no se llevaron a cabo tales determinaciones.

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados, puede concluirse lo siguiente:

La producción de materia seca no presentó una respuesta significativa a la

aplicación de fertilizante nitrogenado debido al alto contenido de N mineral nativo del suelo, sin embargo, la fertilización con urea favoreció ligeramente la acumulación de materia seca en el follaje, mientras que el nitrato de amonio estimuló la producción de materia seca en el bulbo.

Se identificó un período, comprendido entre el inicio de la máxima producción de hojas y los 30 días subsecuentes, en el cual la concentración de N es poco variable, por lo que la concentración de N en el follaje, tanto en forma de nitratos como de nitrógeno reducido, podría ser un buen indicador del estado nutrimental del nitrógeno en la planta.

El seguimiento de las concentraciones del nitrógeno reducido y del nitrato permite inferir sobre la dirección de transporte de estos compuestos nitrogenados y también establecer las etapas en las que podría ser más útil la fertilización fraccionada del nitrógeno.

LITERATURA CITADA

- BAILEY, L.A., and N.J. CORGAN. 1986. Growing onions in New Mexico. Cooperative Extension Service Circular 524. College of Agriculture and Home Economics. New Mexico State University.
- BISHOP, R.F., E.W. CHIPMAN, and C.R. MACEACHERN. 1972. Effect on nitrogen, phosphorus and potassium on yield and nutrients levels in onions grown on sphagnum peat soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 3: 97-111.
- BREWSTER, J.L., and H.A. BUTLER. 1989. Effects of nitrogen supply on bulb development in onion (*Allium cepa* L.). *J. Exp. Bot.* 40:1155-1162.
- CATALDO, D.A., M. HARDON, and L.E. SCHRADER. 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 6:71-80.
- DUQUE M. C.M., C.E. PERDOMO G. y J. JARAMILLO U. 1983. Crecimiento y absorción de nitrógeno, fósforo y potasio en cebolla (*Allium cepa* L.) variedad ocañera. *Acta Agron.* 33:16-22.
- ETCHEVERS B., J.D. 1987. Determinación de nitrógeno en suelos y planta mediante el procedimiento semimicro-Kjeldahl. Pp. 70-77. *In: A. Aguilar S., J.Z. Castellanos y J.D. Etchevers B. (eds). Análisis químico para determinar la fertilidad del suelo. Publicación especial 1 de la SMCS. Chapingo, México.*
- GREENWOOD, D.J., J.J. NETSON, A. DRAYCOTT, G. WIJNEN, and D.A. STONE. 1992. Measurement and simulation of the effects of N-fertilizers on growth, plant composition and distribution of soil mineral-N in nationwide onions experiments. *Fertilizer Research* 31:305-318.
- HENRIKSEN, K. 1987. Effect of N and P fertilization on yield and harvest time in bulb onions (*Allium cepa* L.). *Acta Horticulture* 198:207-215.
- LOWRY, O.H., N.J. ROSEBROUGH, A. FARR, and R. J. RANDALL. 1951. Protein measurements with folin reagent. *J. Biol. Chem.* 193:39-49.
- MAIER, N.A., A.P. DAHLENBURG, and T.K. TWIGDEN. 1990a. Effect of nitrogen on the yield and quality of irrigated onions (*Allium cepa* L.) cv. Cream Gold grown on siliceous sands. *Aust. J. Exp. Agric.* 30:845-851.
- MAIER, N.A., A.P. DAHLENBURG, and T.K. TWIGDEN. 1990b. Assessment of the nitrogen status of onions (*Allium cepa* L.) cv. Cream Gold grown on siliceous sands. *Aust. J. Exp. Agric.* 30:853-859.
- MENGUAL-CRESPO, G., L.T. RAMIREZ, and E. ORENGO. 1979. Effect of plant spacing and fertilizer levels on yield of dry bulb weight of onion cv. Texas Grano 502. *J. Agriculture LXXXIII:* 417-424.
- MINOTTI, P.L., and K.W. STONE. 1988. Consequences of not fertilizing onions on organic soils with high soil test values. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 19:1987-1906.
- PIGGOTT, T.J. 1986. Vegetal crops. pp. 150-187. *In: Plant Analysis; an interpretation manual.* D. J. Reuter and J.B. Robinson (eds.). Inkata Press.
- RIEKELS, J.W. 1972. The influence of nitrogen on the growth and maturity of onions grown on organic soil. *J. Amer. Hort. Sci.* 97:37-40.
- RIEKELS, J.W. 1977. Nitrogen-water relationships of onions grown on organic soil. *J. Amer. Hort. Sci.* 102:139-142.
- YEMM, E.W., and E.C. COCKING. 1955. The determination of amino acids with ninhydrin. *Analyst.* 80:865-870.
- WIEDENFELD, R.P. 1986. Rate, timing, and slow-release nitrogen fertilizers on cabbage and onions. *Hort. Sci.* 21:236-238.

COLONIZACION DE LAS RAICES DE *Phaseolus vulgaris* L. POR CEPAS AUTOCTONAS DE *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*

Colonization of the Root System of *Phaseolus vulgaris* L.
By Indigenous Strains of *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*

¹Coronado, R.E., ²J.M. Sánchez-Yáñez, ³J.J. Peña-Cabriales y
³P.E. Moreno-Zacarias

¹FCB-UANL, Apartado Postal 414, San Nicolás de los Garza, N.L. ²IIQB-UMSNH, Edificio B1. 58030 Morelia, Mich., ³CINVESTAV-IPN-Unidad-Irapuato, Apartado Postal 629, 36500 Irapuato, Gto.

Palabras clave: Colonización, Exudados, Espermósfera-rizósfera, Frijol, Nódulos, *Rhizobium*, Sobrevivencia.

Index words: Colonization, Exudates, Spermosphere-rizosphere, Common bean, Nodules, *Rhizobium*, Survival.

RESUMEN

La dinámica de la colonización de la espermósfera-rizósfera de tres variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.): Negro Jamapa, Canario y Flor de Mayo, por dos cepas nativas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*, se analizó en suelo no estéril en el sistema de jarras de Leonard.

Los resultados no mostraron diferencia estadística en la dinámica de colonización entre las cepas ni entre las variedades de frijol, lo que sugirió un efecto espermósfera-rizósfera positivo sobre las

cepas y un intercambio de señales químicas de reconocimiento entre *Rhizobium* y la leguminosa. Lo cual coincidió con el elevado porcentaje de ocupación de los nódulos encontrados en las variedades.

La sobrevivencia de las dos cepas de *Rhizobium* en el suelo fue semejante, limitada principalmente por la ausencia del sistema radical de la planta, lo que sugiere una dependencia de la bacteria por los exudados de la espermósfera-rizósfera del frijol para sobrevivir y crecer.

SUMMARY

The colonization dynamics of spermosphere-rizosphere of three common bean varieties: Negro Jamapa, Canario, and Flor de Mayo by two indigenous strains of *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* was analyzed under non sterile soil condition in the Leonard's jar system.

Results suggest that not statistical difference was observed between the two

Recibido 9-93.

indigenous strains of *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* on its colonization dynamics on the three common beans varieties or neither among these, which indicated a positive effect spermosphere-rizosphere on the strains, also an exchange chemicals recognition signals in coincidence with its high occupancy per cent in the nodules on the varieties.

The *Rhizobium*'s survival of the strains was similar in soil. Limited mostly by the absence of the root system of the plant, suggesting that *Rhizobium* depends on the spermosphere-rizosphere exudates of common bean for its survival and growth.

INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

La inoculación de leguminosas con especies de *Rhizobium* es una alternativa agrícola para reducir elevadas dosis de fertilización nitrogenada e incrementar su rendimiento (Somasegaran y Hoben, 1985; Vincent, 1970). Sin embargo, en ocasiones la planta no muestra los beneficios esperados, en parte por la incapacidad de competencia de las cepas de *Rhizobium* usadas en su inoculación; primero en el ambiente del suelo, luego en la espermosfera o zona de influencia de la semilla en germinación, la cual produce las primeras señales químicas de intercambio planta-*Rhizobium* (Brewin, 1991; Dazzo y Gardiol, 1984; Dénaire *et al.*, 1992) para iniciar la colonización de la raíz, la cual se continuará y estimulará por los productos liberados en la interfase suelo-rizósfera o sistema radical durante la floración cuando la planta alcanza un intensa actividad biológica. Este proceso

dinámico no concluirá, sino hasta la muerte de la planta en la senectud (Araujo *et al.*, 1994; Curl y Truelove, 1986; Kloepper *et al.*, 1991). Por lo tanto es comprensible que por razones naturales el reconocimiento de estas señales químicas por la población de *Rhizobium* autóctona del suelo, le confiera ventajas sobre las que se introducen (Meade *et al.*, 1985; Singleton y Tavares, 1986).

Una solución que ha sido planteada (Woomer *et al.*, 1988a, 1988b), pero no estudiada lo suficiente (Dughri y Bottomley, 1984; Moawad *et al.*, 1984), es la de seleccionar cepas autóctonas con alta capacidad de competencia, en lugar de introducir cepas que, aunque competitivas, provienen de nódulos o suelo ajenos al sitio en cuestión, debido a la determinante influencia de la población de *Rhizobium* autóctona del suelo sobre la respuesta de la leguminosa a la inoculación con cepas introducidas (Thies *et al.*, 1991a, 1991b).

En esta investigación se emplearon dos cepas autóctonas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* del municipio de Zaragoza, Coah. Estas cepas se evaluaron en campo y causaron una respuesta positiva en frijol, en términos de peso seco y rendimiento, comparada con diferentes niveles de fertilización nitrogenada y con un inoculante comercial. El objetivo de este trabajo fue analizar la dinámica de colonización de la espermosfera-rizósfera de tres variedades de frijol (Negro Jamapa, Canario y Flor de Mayo) por dos cepas autóctonas de *R. Leguminosarum* biovar *phaseoli*.

MATERIALES Y METODOS

Características fisicoquímicas del suelo usado.

Se usó un suelo agrícola del municipio de Apodaca, N.L., con propiedades fisicoquímicas muy semejantes a las de suelos de Zaragoza, Coah.: N total 0.07% (Kjeldahl), materia orgánica 1.28% (Walkley-Black), textura arcillosa (hidrómetro de Bouyoucos), pH 7.0 (potenciómetro) y humedad 30% de acuerdo con SCS-USDA (1984).

Cepas de *R. Leguminosarum* biovar *phaseoli*.

Las cepas de *Rhizobium* se denominaron como G-2 y Z-9, con diferente marca genética: G-2, resistente a estreptomycin (S) (Lakeside) 1000 µg/mL y Z-9, resistente a 1000 µg/mL diazinón (D) (Diazitox 25-E. 0,0-Dietilo-2 Isopropil-4-Metil-Pirimidil-6-fósforotioato. Química del Golfo). Estas sustancias se usaron para su recuperación y diferenciación adicionadas al agar extracto levadura manitol con rojo congo (ELMARC) g/L: manitol 10.0., K₂HPO₄ 0.5., MgSO₄.7H₂O 0.2., NaCl 0.1., extracto de levadura 1.0., rojo congo 10.0 mL (solución 1:400), pH 7.0, agar 18.0.

Preparación de la jarras de Leonard y variedades de frijol.

El experimento se realizó en condiciones de invernadero en jarras de Leonard con 3.5 kg del suelo de Apodaca, Nuevo León. Las tres variedades de frijol probadas fueron (Negro Jamapa, Canario y Flor de

Mayo). Las plantas se alimentaron con la solución de White (KH₂PO₄ 1 M-1 mL; CaCl₂.2H₂O 1 M-1 mL; FeSO₄ trazas; solución de elementos menores (H₃BO₄-2.68 g; ZnSO₄.7H₂O- 0.22 g; KCl- 0.09 g; NaMoO₄-trazas, agua destilada 100 mL, pH 7.0), 1 mL agua destilada 100 mL, pH 7.0), 1 ml agua destilada-1000 ml); con la adición de NH₄NO₃ 1 M, 5 mL/l, para el control con N.

Análisis estadístico del diseño experimental.

Se empleó un diseño estadístico de bloques al azar, con cuatro repeticiones por intervalo de muestreo y seis tratamientos: T-1 = variedad (var.) Canario inoculada (inoc.) con G-2; T-2 = var. Canario inoc. con Z-9; T-3 = var. Flor de Mayo inoc. con G-2; T-4 = var. Flor de Mayo inoc. con Z-9; T-5 = var. Negro Jamapa inoc. con G-2; T-6 = 6 var. Negro Jamapa inoc. con Z-9 y los controles con y sin N. con un análisis de varianza (ANOVA): modelo I trifactorial.

Manejo de las cepas.

Las cepas de *Rhizobium* se activaron en caldo extracto levadura manitol (ELM) por 30 h a 28 °C, lavadas tres veces en solución salina 0.85%. Se utilizó 1 x 10⁴ rhizobios/mL con el nefelómetro de Mc Farland, corroborado por cuenta viable (CV) en ELMARC.

Dinámica de colonización de las cepas en frijol.

El experimento se inició con la siembra de cinco semillas por jarra de cada variedad. Cada semilla se inoculó con 1 x 10⁴ *Rhizobium*/mL, las jarras se mantuvieron

en invernadero durante 50 días. En cada intervalo de 0, 3, 6, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 días después de la siembra de los dos tratamientos se consideró una serie de jarras, y se extrajo según el caso de 0.5 g a 1 g de semilla/principio de raíz, raíces antes de la nodulación, raíces-nódulos durante la floración y al final raíces-nódulos en lisis, para suspender en matraces de 25 mL con 12 mL de solución salina y agitar a 250 rpm por 30 min. De la suspensión se realizaron diluciones seriadas en solución salina y de la 10^{-4} , 10^{-5} y 10^{-6} . Se tomó 0.25 mL para sembrar por triplicado en cajas con ELMARC con S o D. Las cajas se incubaron por cinco días a 28 °C, para determinar el promedio del logaritmo del número de unidades formadoras de colonias (UFC) de las cuatro repeticiones/g de espermósfera (considerada así, de la siembra de semilla al primordio de raíz) y rizósfera (desde el desarrollo normal del sistema radical a la lisis total de los nódulos).

Determinación del por ciento de nódulos formados por las cepas.

Durante la floración aproximadamente 45 días después de la siembra, se determinó el porcentaje de nódulos formados por las cepas autóctonas de *Rhizobium* en las variedades de frijol. Para ello se trituraron 100 nódulos obtenidos de las cuatro repeticiones de cada tratamiento en cajas con ELMARC y (S) o (D). Las cajas se incubaron por cinco días a 28 °C, según descripción de Somasageran *et al.*, (1981).

Sobrevivencia de las cepas en el suelo.

En este experimento se utilizó un diseño estadístico de bloques al azar con dos

tratamientos: T-1= suelo inoculado con la cepa G-2; T-2= suelo inoculado con la cepa Z-9, y tres repeticiones. Para lo cual porciones de 50 g del suelo de Apodaca, se colocaron en recipientes de aluminio y se mantuvieron a una humedad de 60% de la capacidad de campo, a temperatura de 28 °C. La determinación del logaritmo promedio de las UFC de las cepas de *Rhizobium*/g de suelo seco, se realizó como sigue: se tomaron 2 g de suelo en cada intervalo (0, 6, 9, 12 y 15 días) y sus repeticiones, para suspender en matraces de 50 mL con 20 mL de solución salina y se realizaron diluciones de las cuales se usaron la 10^{-2} y 10^{-3} , se tomó 0.25 mL de cada una para sembrar en cajas con ELMARC, S o D, por triplicado; se incubaron por cinco días a 20 °C.

RESULTADOS Y DISCUSION

Dinámica de la colonización de las cepas de *Rhizobium* en el frijol.

La Figura 1 muestra la dinámica de colonización de las dos cepas autóctonas de *Rhizobium* en la espermósfera-rizósfera de la variedad de frijol Negro Jamapa. Se observó un efecto positivo estimulador de la espermósfera sobre ambas poblaciones (Dazzo y Gardiol, 1984), desde los primeros días de la germinación de la semilla hasta el sexto día, cuando alcanzaron su máxima densidad de población; después se detectó una drástica caída en la densidad de la población de la cepa G-2, lo cual sugiere que durante el desarrollo del primordio de raíz a raíces verdaderas se incrementó la actividad fisiológica de la planta y se liberaron otra clase de exudados, que fueron utilizados con mayor eficacia y rapidez por poblaciones

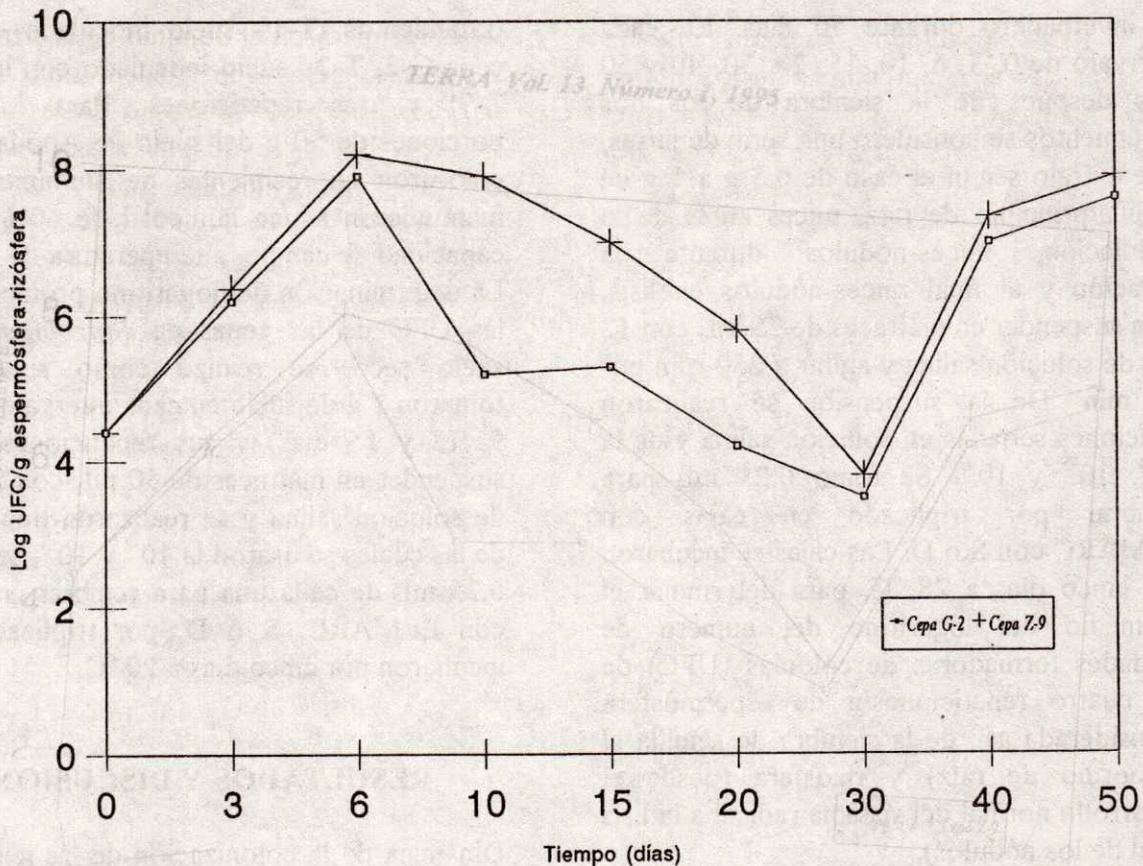


Figura 1. Colonización de la espermosfera-rizósfera de frijol var. Negro Jamapa por dos cepas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* en suelo no esterilizado.

autóctonas del suelo, que por esta cepa de *Rhizobium* (Lowndorf, 1981; Moawad *et al.*, 1994).

Un comportamiento diferente se observó en la población de la cepa Z-9, la cual mostró una mejor capacidad de competencia y utilización del nuevo tipo de exudados de la espermosfera-rizósfera del frijol, esto sugiere una respuesta fisiológica distinta entre las cepas de *Rhizobium* a exudados radicales liberados durante etapas específicas del ciclo del biológico de la planta (Bergman *et al.*, 1988; Brewin, 1991). Sin embargo, en el día 30 ambas cepas presentaron la misma

densidad poblacional, esta disminución parecer ser la adaptación de las cepas a las nuevas señales químicas del sistema radical, las cuales de momento fueron mejor reconocidas por las poblaciones del suelo antagonistas a las cepas de *Rhizobium* (Dénarie *et al.*, 1992; Halverson y Stacey, 1986), para que luego cambios en el tipo de señales químicas de reconocimiento entre la bacteria y la rizósfera de la variedad, les permitió recuperar el dominio de la zona (Hunter y Fahrting, 1980; Long, 1989) y, como consecuencia, alcanzar un alto porcentaje de ocupación en los nódulos examinados, como lo muestra el Cuadro 2.

Estos resultados sugieren que la selección de cepas autóctonas de *Rhizobium* (individualmente o en mezcla), mediante el análisis de su dinámica de colonización puede servir como herramienta para la selección adecuada de cepas que respondan a las expectativas planeadas con una variedad de frijol específica (Abaidoo *et al.*, 1990; Beattie *et al.*, 1989).

La Figura 2 presenta la dinámica de colonización de las cepas autóctonas de *Rhizobium* en la espermósfera-rizósfera del frijol var. Canario. En ella se observa que a diferencia de la var. Negro Jamapa, los exudados de la espermósfera de la var. Canario estimularon selectivamente el incremento en la densidad de la población de la cepa G-2 (Meade *et al.*, 1985; Yao y Vicent, 1969), pues al tercer día el logaritmo de la UFC de la G-2 fue de casi 6.0, inferior al de la Z-9 (4.8). Entre el sexto y vigésimo noveno día, los exudados de la rizósfera permitieron que la densidad de la población de ambas cepas sufrieran pocas fluctuaciones, aunque con una tendencia de la densidad de ambas poblaciones a disminuir a la cantidad originalmente inoculada en las semillas de frijol. Esto sugiere algún mecanismo de regulación sobre la población del microsimbionte, controlado por la planta (Schubert, 1986; Van Brussel *et al.*, 1986). En el día 30 se detectó la densidad más baja de las cepas, lo que, como se señaló, fue causado por el cambio en el patrón de exudados radicales (Imsande, 1981; Long, 1989) que favorecieron más la actividad antagonista de los microorganismos autóctonos del suelo, similares y diferentes de *Rhizobium* (Hunter y Fahrting, 1980; Maede *et al.*, 1985; Moawad *et al.*, 1984). Posteriormente, como se mostró antes, las

cepas recuperaron el dominio de la rizósfera, lo que sugiere que tienen una mayor capacidad de reconocimiento de las señales químicas de los exudados radicales de la variedad, que les permite ser más competitivas en la utilización de los exudados, no sólo de otros rhizobios, sino también de microorganismos totalmente distintos. Lo anterior coincidió con el alto porcentaje (G-2=71% y Z-9=70%) de ocupación en los nódulos de las raíces de esta variedad (Araujo *et al.*, 1994; Beattie *et al.*, 1989; Rossen *et al.*, 1985), lo que se señala en el Cuadro 2. Esto también sugiere una estrecha relación de especificidad de reconocimiento entre las cepas y la variedad (Carlson, 1982; Carlson *et al.*, 1987; Dazzo y Gardiol, 1984) que puede favorecer una respuesta positiva de la leguminosa a la inoculación (Dowling y Broughton, 1986; Ham *et al.*, 1971; Hunter y Fahrting, 1980).

En la Figura 3 se muestra la dinámica de la colonización de las cepas nativas de *Rhizobium* en la espermósfera-rizósfera de la var. Flor de Mayo. La que en principio fue semejante hasta antes de la floración, esto sugiere que durante este período las cepas fueron altamente competitivas, utilizando el tipo de exudados liberados por la espermósfera-rizósfera. Mientras que el cambio de señales químicas de los exudados radicales afectaron negativamente la capacidad infectiva de la G-2 (Caetano-Anollés, 1988; Halverson y Stacy, 1986; Imsande, 1981) y estimularon la competencia autóctona del suelo (Kloepper *et al.*, 1986) contra esta cepa, lo cual se reflejó en el bajo porcentaje (50%) de ocupación en los nódulos de esta variedad, comparado con las otras (Cuadro 2).

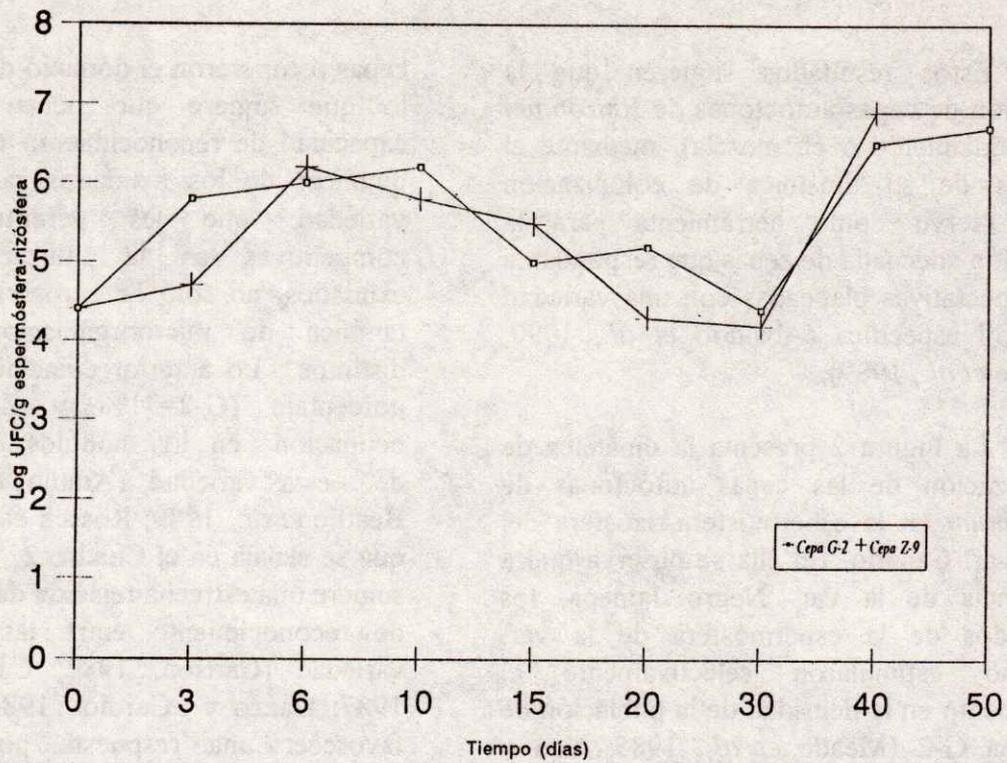


Figura 2. Colonización de la espermosfera-rizósfera de frijol var. Canario por dos cepas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* en suelo no esterilizado.

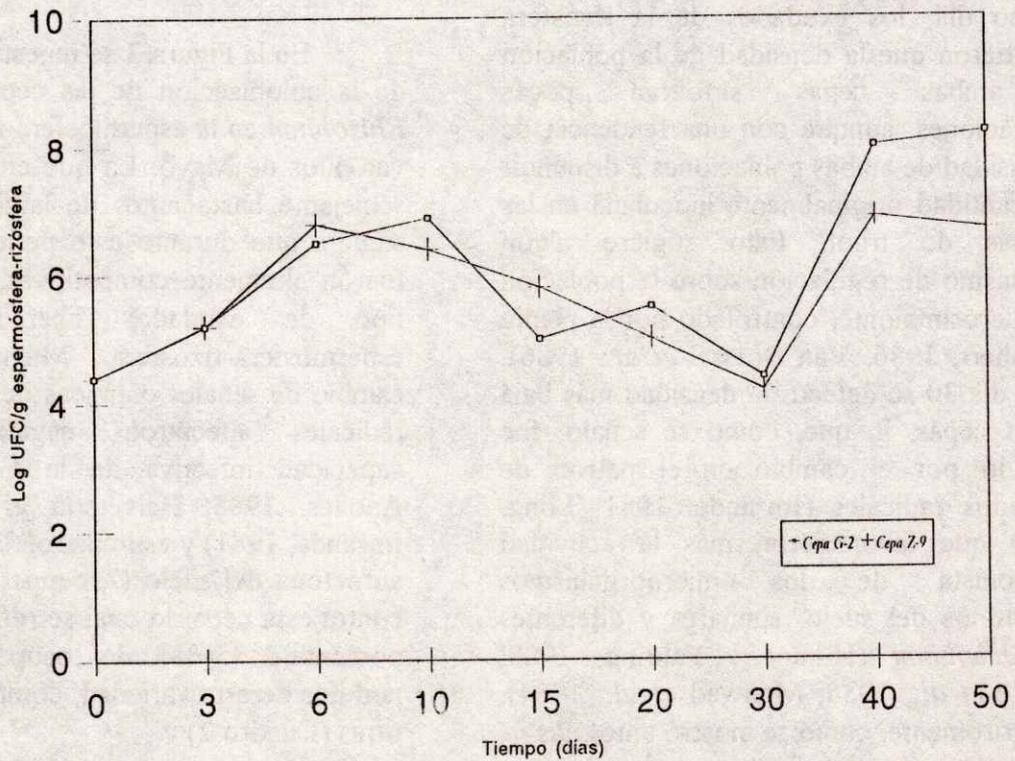


Figura 3. Colonización de la espermosfera-rizósfera de frijo vr. Flor de Mayo por dos cepas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* en suelo no esterilizado.

Cuadro 1. Análisis de varianza de la colonización de dos cepas nativas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* inoculadas en tres variedades de frijol¹.

Causas de la Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P
Bloques	7	76.22	10.888	19.189**	< 0.01
Tratamientos	6	5.17	1.034	1.822 N.S.	>0.05
A	2	2.71	1.356	1.924 N.S.	>0.05
B	1	0.74	0.745	1.312 N.S.	>0.05
IAxB	2	1.70	0.853	1.420 N.S.	
Error	35	19.86	0.567		
Total	47	101.24	2.154		

A = variedades de frijol

B = Cepas

IAxB = Interacción variedad-cepa

¹50 días después de la siembra.

La cepa Z-9 aparentemente no fue afectada, pues alcanzó un alto porcentaje de ocupación en los nódulos (71%), lo que sugiere que durante la floración, a nivel radical, se suceden cambios de señales químicas de reconocimiento con el aumento de la actividad biológica vegetal (Schubert, 1986; Van Brussel *et al.*, 1986) que afectan la dinámica de la colonización del microsimbionte (Batisti *et al.*, 1992; Govers *et al.*, 1986; Yao y Vicent, 1969). Lo cual indica que para alcanzar el máximo porcentaje de nodulación no solo es suficiente la colonización de la espermósfera-rizósfera, también es necesario que la bacteria reconozca las nuevas señales químicas que la variedad genera en la floración (Brewin, 1991; Dénarie *et al.*, 1992; Imsande, 1981, Rossen, *et al.*, 1985) lo que permite al microsimbionte expresar al máximo su capacidad infectiva con una mayor ocupación de los nódulos (Long, 1989) y un probable efecto positivo en el desarrollo de la planta (Singleton y Tavares, 1986).

Sobrevivencia de las cepas en el suelo.

La Figura 4 presenta la sobrevivencia de las cepas de *Rhizobium* nativas en el suelo humedecido no estéril. En ella se observa un comportamiento semejante de las cepas a las condiciones fisico-químicas del suelo, con un incremento inicial en la densidad de ambas poblaciones, lo cual sugiere que durante los primeros días *Rhizobium* utilizó y agotó sus propias reservas. El decremento posterior de las poblaciones de las cepas probablemente fue causado, en parte, por la humedad que estimuló efectos antagónicos y por depredadores de *Rhizobium* tales como: *Bdellovibrio*, protozoarios y bacteriófagos (Lowendorf, 1980; Peña-Cabriales y Alexander, 1979). Además, el suelo careció de fuentes de carbono sencillas para estimular su crecimiento (Peña-Cabriales y Alexander, 1981), ya que por lo general estas sustancias sólo se encuentran en concentraciones suficientes para la bacteria en la espermósfera-rizósfera del frijol (Curl y Truelove, 1986; Long, 1989). Por lo que

Rhizobium, al ser dependiente de estos exudados de la espermósfera-rizósfera, únicamente sobrevivió en el suelo.

El Cuadro 1 presenta el análisis de varianza (ANOVA) de la dinámica de colonización de las dos cepas de *Rhizobium* en las tres variedades de frijol probadas, que apoya la interpretación de los resultados.

El Cuadro 2 muestra que cuando las cepas nativas de *Rhizobium* fueron inoculadas en las tres variedades de frijol, por lo general se observó que fueron más competitivas y dominantes. Al excluirse, el total de nódulos

formados en las plantas control fueron inducidos por otros rhizobios que mostraron una densidad de población por NMP que fluctuó de 1×10^2 a 1×10^5 rhizobios/g de suelo, lo que sugiere que las dos cepas usadas en este experimento de colonización de la espermósfera-rizósfera, fueron competitivas y que los resultados podrían servir como parte de los datos para el modelo propuesto por Thies *et al.* (1991a, b y 1992), para pronosticar el posible efecto de las cepas nativas de *Rhizobium* en la respuesta de la leguminosa en condiciones de campo, lo cual en este caso es motivo de otro estudio en progreso.

Cuadro 2. Por ciento de nódulos formados por dos cepas nativas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* inoculadas en tres variedades de frijol.

Variedad	Tratamientos	Nódulos por planta	Nódulos por cepa inoculada	
			----- % -----	
Canario	G-2	41	71	29
	Z-9	64	70	30
	S.N.	77	0	100
	C.N.	40	0	100
Flor de mayo	G-2	47	50	50
	Z-9	24	73	27
	S.N.	60	0	100
	C.N.	41	0	100
Negro jamapa	G-2	16	71	29
	Z-9	22	75	25
	S.N.	25	0	100
	C.N.	38	0	100

S.N. = Sin nitrógeno

C.N. = Con nitrógeno

Promedio de cuatro repeticiones

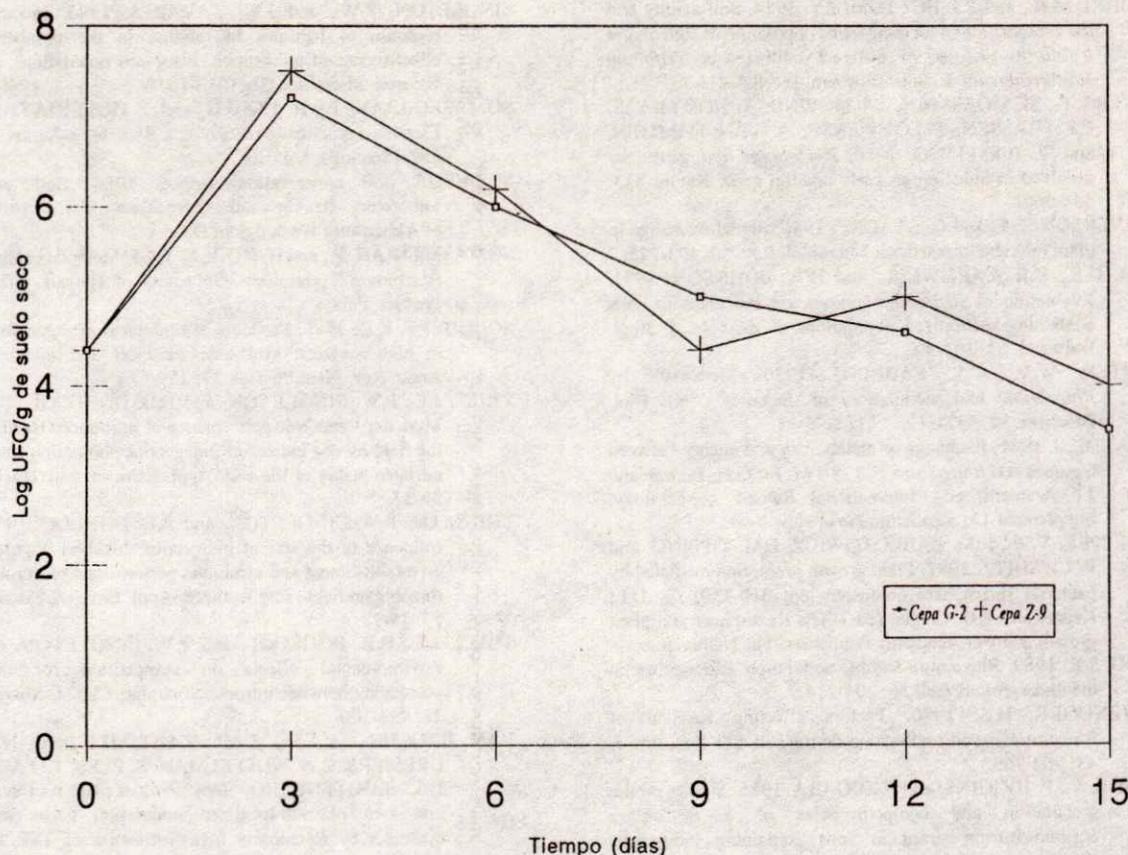


Figura 4. Sobrevivencia de dos cepas de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* en suelo humedo no esterilizado.

LITERATURA CITADA

- ABAIDOO, R.C., T. GEORGE, B.B. BOHLOOL, B.B. and P.W. SINGLETON. 1990. Influence of elevation and applied nitrogen on rhizosphere colonization and competition for nodule occupancy by different rhizobial strains on field-grown soybean and common bean. *Can J. Microbiol.* 36: 92-96.
- ARAUJO, R.S., E.A. ROBLETO, and J. HANDELMAN. 1994. A hydrophobic mutant of *Rhizobium etli* altered in nodulation competitiveness and growth in the rhizosphere. *Appl. Environ. Microbiol.* 60: 1430-1436.
- BATISTI, L. J., C. LARA and J.A. LEIGH. 1992. Specific oligosaccharide from *Rhizobium meliloti* exopolysaccharide promotes nodule invasion in alfalfa. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 89: 5625-5629.
- BEATTIE, G.A., M.K. CLAYTON, and J. HANDELSMAN. 1989. Quantitative comparison of the laboratory and field competitiveness of *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*. *Appl. Environ. Microbiol.* 55: 2755-2761.
- BERGMAN, K., M. GLULASH-HOFEE, R.E. HOVESTADT, R.C. LAROSILIERE, P.G. RONCO, and L. SU. 1988. Physiology of behavioral mutants of *Rhizobium meliloti*: evidence for a dual chemotaxis pathway. *J. Bacteriol.* 170: 3249-3259.
- BREWIN, N.J. 1991. Development of the legume root nodule. *Annu. Rev. Cell-Biol.* 7: 191-226.
- CAETANO-ANOLLES G., D.K. CRIST-ESTES, and W.D. BAUER. 1988. Chemotaxis of *Rhizobium meliloti* to the plant flavone luteolin requires functional nodulation genes. *J. Bacteriol.* 170: 3164-3169.
- CARLSON, R.W. 1982. Surface chemistry. p. 189-240. *In: Ecology of Nitrogen Fixation, Vol. 2, Rhizobium* Oxford University Press, Oxford, England.
- CARLSON, R.W., S. KALEMBASA, and F. GARCIA. 1988. The expression of *R. Leguminosarum* 128C53. *In: Nitrogen Fixation: Hundred Years After Gustav Fischer*, Stuttgart.
- CURL, E.A., and B. TRUELOVE. 1986. *The rhizosphere*. Springer Verlag, Berlin.
- DAZZO, F.B., and A. GARDIOL. 1985. Host specificity in *Rhizobium-legume* interactions. *In: Genes Involved in Microbe Plant Interactions*. Springer Publishers, New York.
- DENARIE, J., F. DEBELLE, and C. ROSENBERG. 1992. Signaling and host range variation in nodulation. *Ann. Rev. Microbiol.* 46: 497-531.
- DOWLING, D.N., and W.V. BROUGHTON. 1986. Competition for nodulation in legumes. *Annu. Rev. Microbiol.* 40: 131-157.

- DUGHRI, M.H., and P.J. BOTTOMLEY. 1984. Soil acidity and the composition of an indigenous population of *Rhizobium trifolii* in nodules of different cultivars of *Trifolium subterraneum* L. Soil. Biochem. 16: 405-411.
- GOVERS, E., M. MOERMAN, J.A. DOWNIE, P. HOOYKAAS, F.J. FRASSEN, J. LOUWERSE, A. VAN KAMMEN, and T. BISSELING. 1986. *Rhizobium nod* genes are involved in inducing an early nodulin gene. Nature 323: 564-566.
- HALVERSON, L.J., and G. STACEY. 1986. Signal exchange in plant microbe interactions. Microbiol. Rev. 50: 193-225.
- HAM, G.E., V.B. CARDWELL, and H.W. JOHNSON. 1971. Evaluation of *Rhizobium japonicum* inoculant in soils containing naturalized populations of rhizobia. J. Appl. Bacteriol. 63: 301-303.
- HUNTER, W.V., C.V. FAHRING. 1980. Movement by *Rhizobium* and nodulation of legumes. Soil Biol. Biochem. 12: 537-542.
- IMSANDE, J. 1981. Exchange of metabolism and energy between legumes and *Rhizobium*. p. 178-191. In: G.H. Bourne and J.F. Danielli, eds. International Review of Cytology, Supplement 13, Academic Press, New York.
- KLOPPER, V.W.; R.M. ZABLOTOWICZ, E.M. TIPPING, and R. LIFSHITZ. 1991. Plant growth promotion mediated by bacterial rhizosphere colonizers pp: 310-330. In: D.L. Keister and P.B. Cregan (eds). The rhizosphere and plant growth, Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- LONG, S.R. 1989. Rhizobium-legume nodulation: life together in the underground. Cell 56: 204-214.
- LOWENDORF, H.S. 1980. Factors affecting survival of *Rhizobium* in soil undergoing drying soil. Sci. Soc. Am. J. 43: 962-966.
- MEADE, V., P. HIGGINS, and F. O'GARA. 1985. Studies on the inoculation and competitiveness of a *Rhizobium leguminosarum* strain in soils containing indigenous rhizobium in soils undergoing drying. Soil. Sci. Soc. Am. J. 43: 962-966.
- MOAWAD, H., W.R. ELLIS and E.L. SCHMIDT. 1984. Rhizosphere response as a factor in competition among three serogroups of indigenous *Rhizobium japonicum* for nodulation of field grown soybeans. Appl. Environ. Microbiol. 47: 607-612.
- PEÑA-CABRIALES, J.J., and M. ALEXANDER. 1981. Reservas de carbon: sobrevivencia de *Rhizobium*. Rev. Lat. Am. Microbiol. 23: 50-54.
- ROSSEN, L., C.A. SHEARMAN, A.W.B. JOHNSTON, and J.A. DOWNIE. 1985. The *nodD* gene of *Rhizobium leguminosarum* is autoregulatory and in the presence of plant exudate induces the *nodA,B,C* genes. EMBO J. 4: 3369-3373.
- SINGLETON, P.W., and J.W. TAVARES. 1986. Inoculation response of legumes in relation to the number and effectiveness of indigenous *rhizobium* populations. Appl. Environ. Microbiol. 51: 1013-1018.
- SOMASEGARAN, P., H. HOBEN, and J. HOLLIDAY. 1981. Ejercicios prácticos en tecnología *Rhizobium-leguminosa*. C.P. Chapingo, México.
- SCS-USDA Soil conservation service. 1984. Soil survey. Laboratory data for southeastern Texas. U.S. Department of Agriculture Washington, D.C.
- SOMASEGARAN, P., and H. HOBEN. 1985. Methods in legume-*Rhizobium* Technology. University of Hawaii. NIFTAL Project, Paia.
- SCHUBERT, K.R. 1986. Products of biological nitrogen fixation in higher plants: synthesis, transport and metabolism. Annu. Rev. Plant Physiol. 37: 359-574.
- THIES, J.E., P.W. SINGLETON, and B.B. BOHLOOL. 1991b. Modeling symbiotic performance of introduced rhizobia in the field by use indices of indigenous population size and nitrogen status of the soil. Appl. Environ. Microbiol. 57: 29-37.
- THIES, J.E., P.W. SINGLETON, and B.B. BOHLOOL. 1991a. Influence of the size of indigenous rhizobial populations on establishment and symbiotic performance of introduced rhizobia on field-grow legumes. Appl. Environ. Microbiol. 57: 19-28.
- THIES, J.E., B.B. BOHLOOL, and P.W. SINGLETON. 1992. Environmental effects on competition for nodule occupancy between introduced strains. Can. J. Microbiol. 38: 493-500.
- VAN BRUSSEL, A.A.N., S.A.J. ZAAT, H.C.J. CANTER-CREMERS, C.A. WIJFFELMAN, E. PEES, T. TAK, and B.J.J. LUGTENBERG. 1986. Role of plant root exudate and sym plasmid-localized nodulation genes in the synthesis by *Rhizobium leguminosarum* of TSR factor which causes thick and short roots on common vetch. J. Bacteriol. 165: 517-522.
- VICENT, J.M. 1970. A manual for the practical study of root nodule-bacteria. Blackwell Scientific Publications, Oxford, England.
- WOOMER, P., P.W. SINGLETON, and B.B. BOHLOOL. 1988a. Ecological indicators of native rhizobia in tropical soils. Appl. Environ. Microbiol. 54: 1112-1116.
- WOOMER, P., P.W. SINGLETON, and B.B. BOHLOOL. 1988b. Reliability of the most probable-number technique for enumerating rhizobia in tropical soils. Appl. Environ. Microbiol. 54: 1494-1497.
- YAO, P.Y., and J.M. VICENT. 1969. Host specificity in the root hair "curling factor" of *Rhizobium* spp. Austr. J. Biol. Sci. 22: 413-423.

RESPUESTA DEL MAIZ (*Zea mays* L.) A LA INOCULACION CON BACTERIAS FIJADORAS DE NITROGENO

Response of Maize (*Zea mays* L.) to Inoculation with Nitrogen Fixing Bacteria

García G., M.M., J.M. Sánchez-Yañez, J.J. Peña-Cabriales y
P.E. Moreno-Zacarias

Lab. Microbiología del Suelo, F.C.B.-UANL, Apartado Postal 414,
San Nicolás de los Garza, N.L., México.

Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, UMSNH, Edif. B-1, C.U.
CP 58030, Morelia, Mich., México

Lab. de Ecología Microbiana, CINVESTAV-Irapuato, Apartado Postal 629,
36500 Irapuato, Gto., México.

Palabras clave: Maíz, *Azospirillum*, *Azotobacter*, Materia orgánica, Espermósfera-rizósfera, Sobrevivencia, Colonización.

Index words: Corn, *Azospirillum*, *Azotobacter*, Survival, Organic matter, Colonization, Spermosphere-rhizosphere.

RESUMEN

El efecto de la inoculación de bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN): *Azospirillum lipoferum* y *A. brasilense* se determinó en forma individual y en mezcla sobre el crecimiento de maíz (*Zea mays* L.), var. H-417 en suelo no estéril, rico en materia orgánica. Un tratamiento incluyó un aislado de

Azotobacter beijerinckii en el mismo suelo, previamente esterilizado. En general, los resultados mostraron una diferencia estadística en el crecimiento del maíz a la inoculación bacteriana comparada con el maíz control sin N. La respuesta de la planta a *A. lipoferum* fue: N total, 2.03 %; peso fresco, 39.6 g; y materia seca, 2.4 g, superando al maíz sin inocular (N total, 0.64%; peso fresco, 20.4 g; y materia seca 1.5 g), e inclusive al inculado con *A. beijerinckii* (N total 1.28%; peso fresco, 37.2 g), excepto en la materia seca. Las bacterias colonizaron la espermósfera-rizósfera del maíz paralelamente a su desarrollo. El alto contenido de materia orgánica del suelo tuvo influencia positiva en la respuesta del maíz a la inoculación, pero no en la dinámica de colonización de las bacterias en su espermósfera-rizósfera. En el suelo no esterilizado, en ausencia de la semilla y raíces de la gramínea, *A. beijerinckii* sólo sobrevivió.

Recibido 9-93.

Se observó un efecto positivo del sistema radical sobre la población bacteriana en la proporción rizósfera/suelo de 100:1, lo que sugiere que la sobrevivencia y colonización de las bacterias en el suelo no esterilizado fue limitada por la ausencia de las raíces de maíz, y no por el contenido de la materia orgánica del suelo.

SUMMARY

The effect of the inoculation of nitrogen fixing bacteria (NFB) *Azospirillum*, *lipoferum*, and *A. brasilense* alone and mixed, on corn growth (*Zea mays* L.) var. H-417 in non sterile soil with high organic matter content, was determined. A treatment with *Azotobacter beijerinckii* inoculated on the same sterile soil was also included.

Results showed statistical differences by treatments with NFB as compared to the corn control. *A. lipoferum* gave 2.03% total N; 39.6 g fresh weight, and, 2.4 g, dry matter compared to corn control (0.64% total N, 20.4 g fresh weight, 1.5 g dry matter) including the maize inoculated with *Az. beijerinckii* (1.28%, total N; 37.2 g, fresh weight) except in the dry matter content. The colonization of the spermosphere-rhizosphere by bacteria alone o mixed on the growing corn increased as the plant developed. A positive influence was found by high organic matter in the soil on the response of corn but not on its colonization of spermosphere-rhizosphere by NFB. *Az. beijerinckii* only could survive in the sterile soil, root free. The rhizosphere/soil ratio showed values of 100:1 suggesting a positive effect on the rizosphere by the root system

and that the survival of the bacteria in non sterile soil was limited mostly by the absence of roots, rather than by the organic matter content in the soil.

INTRODUCCION

De la población microbiana del suelo, las bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN) son quizá las más estudiadas, principalmente las que establecen simbiosis con leguminosas, como *Rhizobium* (Stanley y Cervantes, 1991; Vincent, 1975). Aunque existe considerable información sobre la asociación de *Azotobacter* y *Azospirillum* en las raíces de gramíneas (Christiansen-Weniger *et al.*, 1992; De Coninck *et al.*, 1992; Zuberer y Alexander, 1986).

La respuesta de gramíneas a la inoculación con las BFN algunas veces es inconsistente, aunque puede mejorar el crecimiento y rendimiento de ellas, cuando se aplica en suelos ricos en materia orgánica, o se agrega al suelo (De Freitas *et al.*, 1982 Patriquin *et al.*, 1983; Rubenchik, 1960), probablemente por el aporte de fuentes de carbono oxidables y que quizá sirven como sustrato para la síntesis de promotores de crecimiento vegetal (PCV) (Kipe Nolt *et al.*, 1985; Taller y Wong, 1989; Turner y Backman, 1991) por las BFN inoculadas en las semillas. En otros casos, la inoculación no tiene efecto sobre la planta e inclusive puede afectarla negativamente (Malik *et al.*, 1987; Okon, 1985). La inconsistencia puede deberse a factores ambientales, abióticos y bióticos, de los cuales escasa información se relaciona con la sobrevivencia y colonización de las BFN, durante los primeros días en el suelo al

aplicarse en la semilla (Azad *et al.*, 1985; Scher *et al.*, 1993; Turner y Backman, 1991).

En la espermósfera (zona que rodea a la semilla en germinación) se excretan sustancias orgánicas que pueden estimular la proliferación selectiva de microorganismos (Kloepper *et al.*, 1991; Mahaffee y Backman, 1993; Schmidt, 1979); el posterior desarrollo del sistema o rizósfera mantiene una dinámica de colonización de las BFN con el estímulo de los exudados derivados de ese crecimiento, que a su vez pueden inducir su propia conversión a PCV por las rizobacterias, en un proceso ininterrumpido de intercambio de señales químicas entre ambos asociados (Chanway *et al.*, 1988; Kloepper y Schroth, 1981; Krotzky *et al.*, 1988; Liddell y Parke, 1989). Lo anterior se ha observado cuando se inoculan BFN en gramíneas (Bashan y Levanomy, 1988; Murty y Ladha, 1987; Reinhold *et al.*, 1985), en contraste, las BFN muestran una pobre sobrevivencia en el suelo alejado de las raíces (Curl y Truelove, 1986; De Coninck *et al.*, 1988; Henis, 1987; Roszak y Colwell, 1987). Aparentemente las BFN tienen una limitada capacidad competitiva con otros microorganismos nativos en el suelo alejado de las raíces, lo que no es menos drástico en la espermósfera-rizósfera, esto sugiere efectos específicos de quimiotaxis positivos para algunas BFN producidos por la rizósfera que facilitan una rápida colonización con un probable beneficio para la planta (Curl y Truelove, 1986; Zablotowicz *et al.*, 1992).

En algunos reportes se ha asociado la respuesta positiva de las gramíneas a la inoculación en suelos ricos en materia orgánica, sin considerar su efecto sobre la colonización de la espermósfera-rizósfera. El conocer más sobre las interacciones raíz-BFN

puede contribuir a mejorar la respuesta de las plantas a la inoculación en condiciones específicas. Con base en lo señalado, este trabajo tuvo como objetivos: determinar la influencia de la materia orgánica del suelo en la respuesta del maíz inoculado con BFN y su dinámica de colonización espermósfera-rizósfera.

MATERIALES Y METODOS

A. Bacterias y Semillas.

Las bacterias utilizadas: *Azospirillum lipoferum* y *Azotobacter beijerinckii* se aislaron de raíces de maíz (*Zea mays* L.) variedad H-417 del INIFAP Río Bravo, Tams. e indentificaron de acuerdo con Krieg y Dobereiner (1984); Tarrand *et al.* (1979) y Tchan (1984). El aislado de *Azospirillum brasilense* fue proporcionado por el laboratorio de Microbiología y Bioquímica de Suelos del Colegio de Postgraduados, Montecillo, estado de México. La semilla, variedad H-417, fue donada por el INIFAP, Zaragoza, Coah.

B. Inoculación y Colonización de la Espermósfera-Rizósfera.

a) Inoculación de las semillas.

Se usó el sistema jarras de Leonard, con 3.0 kg de un suelo virgen forestal del sur del estado de Nuevo León (materia orgánica, 5.3%; pH, 7.4; y N total, 0.28%). Se empleó el medio mineral para plantas de White con la siguiente composición: K_2HPO_4 1M, 1.0 mL; KH_2PO_4 1M, 1.0 mL; $MgSO_4$ 1M, 1.0mL; $CaCl_2$ 1M, 1.0 mL; $FeSO_4$, trazas; solución de elementos menores (ácido bórico, 2.68 g,

ZnSO₄·7H₂O, 0.22 g; KCl, 0.09 g; NaMoO₄, trazas; y agua destilada, 100 mL, pH 7.0); agua destilada, 1000 mL, pH 7.0. Cada semilla se inoculó individualmente o con una mezcla de las BFN, usando 1.0 mL, equivalente a 3.0×10^3 bacterias/mL de las suspensiones de cada BFN. Al germinar las semillas, se dejaron dos plantas por jarra y se cubrió la superficie con aserrín esterilizado. La humedad se ajustó permanentemente a 60% y se agregó la solución mineral cuando fue necesario. Las jarras se mantuvieron en invernadero por 30 días después de la siembra. Se evaluaron los siguientes parámetros: Por ciento de nitrógeno total; peso fresco y materia seca (60 °C/24 h) de las plantas completas a los 30 días después de la siembra; longitud de la raíz; altura; longitud y ancho de las hojas; y diámetro del tallo a los 15 y 30 días después de la siembra.

b) Recuperación de las bacterias inoculadas en las semillas de maíz.

Los muestreos se realizaron a los 0, 3, 6, 10 y 15 dds; al inicio del experimento se tomó el equivalente a 0.5 g de semilla y luego 1.0 g de raíz fresca con suelo. La semilla y la raíz se suspendieron en solución salina y, por dilución seriada, (10^2 , 10^3 , 10^4) se sembró 0.2 mL de cada dilución en agar nutritivo con 50 µg de cloranfenicol (Park-Davis) y 50 µg de eritromicina (Abbot, Lab), para recuperar a *A. lipoferum*; 200 µg de cloranfenicol y 50 µg de cefalosporina (Glaxo, Lab) se agregaron para reaislar a *A. brasilense*. La ciclohexamida 0.1 g/L se usó como fungicida en todos los casos. Para recuperar *Az. beijerinckii* se empleó sólo agar nutritivo sin antibióticos, pues el experimento se realizó en suelo esterilizado. Todos los ensayos se realizaron por duplicado.

C. Aislamiento de *A. brasilense* del Interior de las Raíces de Maíz.

A los 27 dds, las raíces de la planta se secaron, lavaron y desinfectaron con alcohol a 96% durante 5 min, se lavaron siete veces con agua destilada esterilizada y se trituraron trozos de 5.0 cm de longitud en un mortero con solución salina, después se tomó 1.0 mL para diluir (10^{-2} y 10^{-3}) y sembrar 0.2/mL en agar nutritivo, con los antibióticos indicados para las BFN.

D. Supervivencia de las Bacterias en el Suelo.

Proporciones de 50.0 g de suelo no esterilizado, colocadas en jarras, se inocularon con 1.0 mL de una suspensión (3.0×10^4 bacterias/mL), se ajustó la humedad del suelo a 60%, se incubaron a temperatura ambiente y a intervalos de 0, 3, 6, 10 y 15 días se tomaron muestras de 1.0 g para cuantificar los sobrevivientes en agar nutritivo con los antibióticos señalados para las BFN. El mismo suelo esterilizado en autoclave ($121\text{ }^\circ\text{C } 24\text{h}^{-1} 3\text{ dds}^{-1}$), se inoculó con una cantidad de *Az. beijerinckii* semejante a la usada con las otras BFN.

E. Análisis estadístico y Diseño Experimental.

El experimento se realizó con maíz bajo un diseño completamente al azar, con cuatro repeticiones y seis tratamientos: T1 (inoculado con *A. lipoferum*), T2 (inoculado con *A. brasilense*), T3 (inoculado con *Az. beijerinckii*), T4 (inoculado con una mezcla, relación 1:1, de *A. lipoferum*-*A. brasilense*), T5 (fertilizado con NH₄NO₂ 1.0 M, T6 (sin BFN, ni N). Se evaluaron las siguientes

variables: altura; longitud y ancho de las hojas; diámetro del tallo, a los 15 y 30 dds; longitud de la raíz a los 30 dds. Se incluyeron cinco tratamientos (excepto T4) y cuatro repeticiones para evaluar las siguientes variables: por ciento de nitrógeno total, peso fresco y materia seca; las diferencias entre tratamientos se obtuvieron mediante una comparación de medias de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSION

El Cuadro 1 muestra los resultados del efecto de la inoculación de las BFN sobre el crecimiento del maíz sembrado en un suelo rico en materia orgánica; en general, el análisis estadístico señala diferencias significativas entre los tratamientos con BFN y el control sin N ni bacterias.

Cuadro 1. Respuesta del maíz var. H-417 a la inoculación con especies de *Azospirillum* y *Azotobacter* en suelo rico en materia orgánica.

Tratamiento	Altura pl. nta		Longitud de hoja		Ancho de hoja		Diámetro de tallo		Longitud de raíz	N Total	Peso fresco	Materia seca
	15 ^z	30 ^z	15	30	15	30	15	30				
1. Maíz + A.1	6.0a**	8.3d	25.2b	30.6	1.6b	2.5c	1.5c	1.7c	71.4b	2.03a	39.6a	2.4a
2. Maíz + A.b	5.0c	9.5c	26.6b	d	2.0a	3.0c	1.5a	1.9c	70.3c	1.26b	33.0c	2.4a
3. Maíz + Az.	4.8c	15.0a	21.0b	36.6c	1.8b	3.9a	1.6a	3.2b	72.ab	1.28b	37.2b	2.1a
4. Maíz + A1-Ab	6.5c	15.0a	28.0a	45.3a	1.6b	3.7a	1.5a	3.0b	59.8b			
5. Maíz + N	5.3a	9.2b	24.6c	41.4	1.7b	3.0c	1.5a	3.0b	57.7b	1.73a	36.4b	2.0a
6. Maíz - N	3.9a	30.3d	15.5d	b	1.1c	2.1c	1.2a	1.7c	71.5a	0.64d	20.4d	1.5b
				33.8c								
				30.3								
				d								

y) Días después de la siembra.

z) Valores seguidos por la misma letra son estadísticamente iguales, $P < 0.01$.

A.1 = *Azospirillum lipoferum*, A.b = *Azospirillum brasilense*, Az. = *Azotobacter beijerinckii*.

La respuesta del maíz inoculado con *Az. beijerinckii* no fue estadísticamente diferente en N total (1.28%), peso fresco (37.2 g) y contenido de materia seca (2.1 g) a las otras BFN, a pesar de que el experimento se realizó en el suelo esterilizado en autoclave, lo sugiere que este tipo de esterilización por calor húmedo simplificó parte de la materia orgánica (Wu *et al.*, 1986) para facilitar su utilización (De Freitas *et al.*, 1982; Patriquin *et al.*, 1983; Rubenchik, 1960) y, en parte conversión de estos y algunos exudados de la espermósfera en PCV (Mahafee y Bachman, 1993) por la bacteria y posteriormente los producidos por la rizósfera (Kipe-Nolt *et al.*, 1985; Taller y Wong, 1989) y, en consecuencia, causar una respuesta positiva en la planta en comparación con la control sin N. Este resultado sugiere que el incremento en el diámetro del tallo de

3.2 cm por *Az. beijerinckii* y de 3.0 cm por la mezcla de los dos azospirilos, se debió a que la variedad H-417 es un híbrido con un alto grado de heterocigosis y a la condición favorable del invernadero (Moffat, 1986; Tauer, 1989).

La respuesta del maíz a la inoculación con *A. lipoferum* en suelo esterilizado fue: N total, 2.03%; peso fresco, 39.6 g; y materia seca, 2.4 g, lo que señala una diferencia estadística significativa comparada con la del maíz control sin N (N total, % 0.64; peso fresco, 20.4 g; y materia seca, 1.5 g) y variable con relación al resto de los tratamientos con las otras BFN. Este resultado sugiere un reconocimiento y estimulación de los exudados producidos en la espermósfera-rizósfera por la bacteria (Kipe-Nolt *et al.*, 1985; Schmidt,

1979; Turner y Backman, 1991) lo cual le permitió competir eficazmente por la colonización de la zona para causar un efecto positivo en el crecimiento del maíz (Zuberer y Alexander, 1986). Aparentemente la materia orgánica solo facilitó en principio, la sobrevivencia de *A. lipoferum*, pero no la respuesta de la planta, ya que el maíz control sin N no lo mostró. En cambio, la planta inoculada con la bacteria presentó características semejantes a las del control con N, lo cual sugiere que *A. lipoferum* suplió la demanda de nitrógeno que la planta exigió en esa etapa fenológica (Klopper y Schrot, 1981; Klopper *et al.*, 1991).

El maíz inoculado con *A. brasilense* registró las siguientes respuestas: N, 1.26%; peso fresco, 33.0 g; y materia seca, 2.4 g, estadísticamente distintas a las del maíz con y sin N (excepto en el contenido de materia seca), y variables en relación con las demás BFN. Lo anterior sugiere un efecto positivo de PCV (Klopper *et al.*, 1991) como resultado de la integración de *A. brasilense* al tejido radical (Bashan y Levanony, 1988), pues se le recuperó del interior de las raíces del maíz.

Los resultados muestran la trascendencia de los exudados excretados por la espermósfera en la sobrevivencia y más tarde en la colonización de la rizósfera por las BFN, para influir positivamente en el crecimiento de la planta, en especial en el incremento de la materia seca del maíz (Christiansen-Weniger *et al.*, 1992; Mahaffee y Bachman, 1993; Okoon, 1985).

La Figura 1 muestra el comportamiento individual de *A. lipoferum*, *A. brasilense* y *Az. Beijerinckii*, en la espermósfera-rizósfera del

maíz. Las curvas de crecimiento sugieren que los productos de excreción (azúcares, ácidos orgánicos aminoácidos, etc.) pueden ser asimilados por las BFN (Kipe-Nolt *et al.*, 1985; Reinhold *et al.*, 1985; Zablotowicz *et al.*, 1992), en lugar de los compuestos derivados de la materia orgánica. Lo anterior se comprobó con los resultados observados durante la colonización de la espermósfera-rizósfera del maíz por *Az. beijerinckii* en el suelo esterilizado, (Curl y Truelove, 1986; Klopper *et al.*, 1991). El comportamiento individual de *A. lipoferum* y *A. brasilense* en la espermósfera-rizósfera del maíz en el suelo no esterilizado indica que las bacterias fueron más competitivas que la flora nativa, lo cual sugiere que los exudados de la espermósfera-rizósfera les favorecieron selectivamente (Krotzky *et al.*, 1986; Krotzky *et al.*, 1988; Scher *et al.*, 1993).

Los resultados señalan que el elevado contenido de materia orgánica, en combinación con las BFN en el suelo, mejoró la respuesta de la planta a la inoculación (Patriquin *et al.*, 1983). El tipo de semilla empleada también favoreció la colonización (Turner y Backman, 1991) así como el mantenimiento de la humedad, lo que también parece ser un factor crítico en el funcionamiento de esta asociación (Lindell y Parke, 1989).

La Figura 2 muestra que *A. lipoferum* y *A. brasilense* fueron compatibles para colonizar la espermósfera-rizósfera del maíz en suelo no esterilizado, ambas especies mostraron una mejor capacidad competitiva que la flora nativa, a pesar de que en general la materia orgánica del suelo parece estimular más la actividad de los organismos autóctonos (Henis, 1987; Roszak, 1987) que la de los

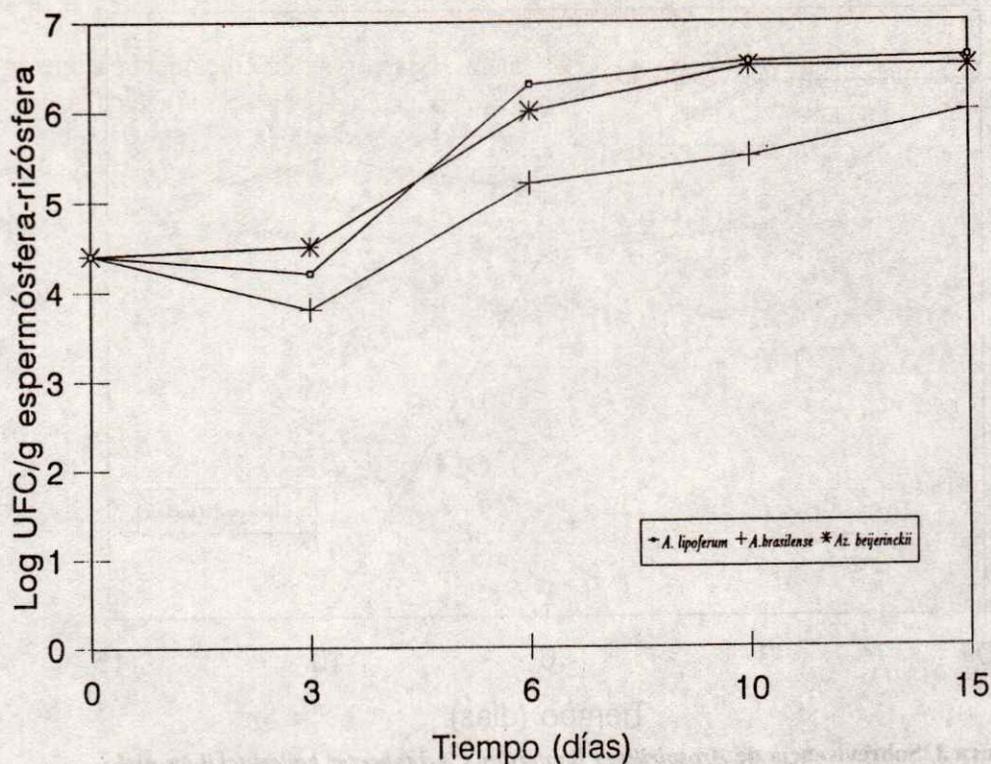


Figura 1. Colonización de la espermósfera/rizósfera de maíz var. H-417 en suelo por especies de *Azospirillum*: *lipoferum* y *brasilense* (no esterilizado) y *Azotobacter beijerinckii* (esterilizado).

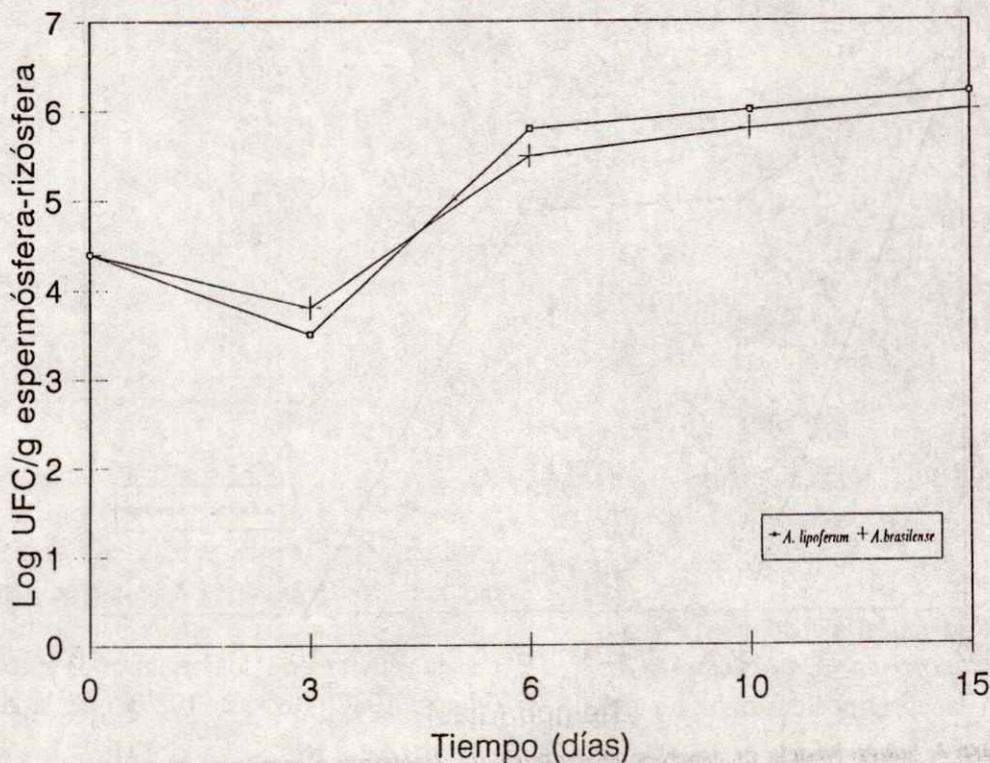


Figura 2. Colonización de la espermósfera/rizósfera de maíz var. H-417 por la mezcla de especies de *Azospirillum*: *lipoferum* y *brasilense*, en suelo no esterilizado.

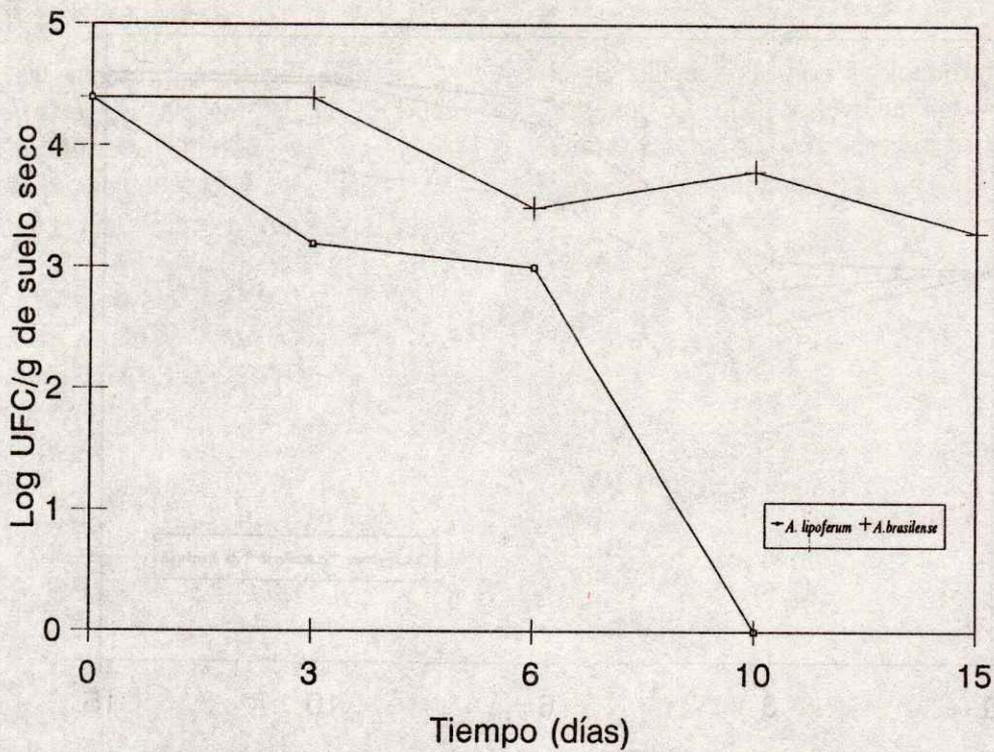


Figura 3. Sobrevivencia de *Azospirillum lipoferum* y *Azotobacter beijerinckii* en suelo no esterilizado y esterilizado, respectivamente.

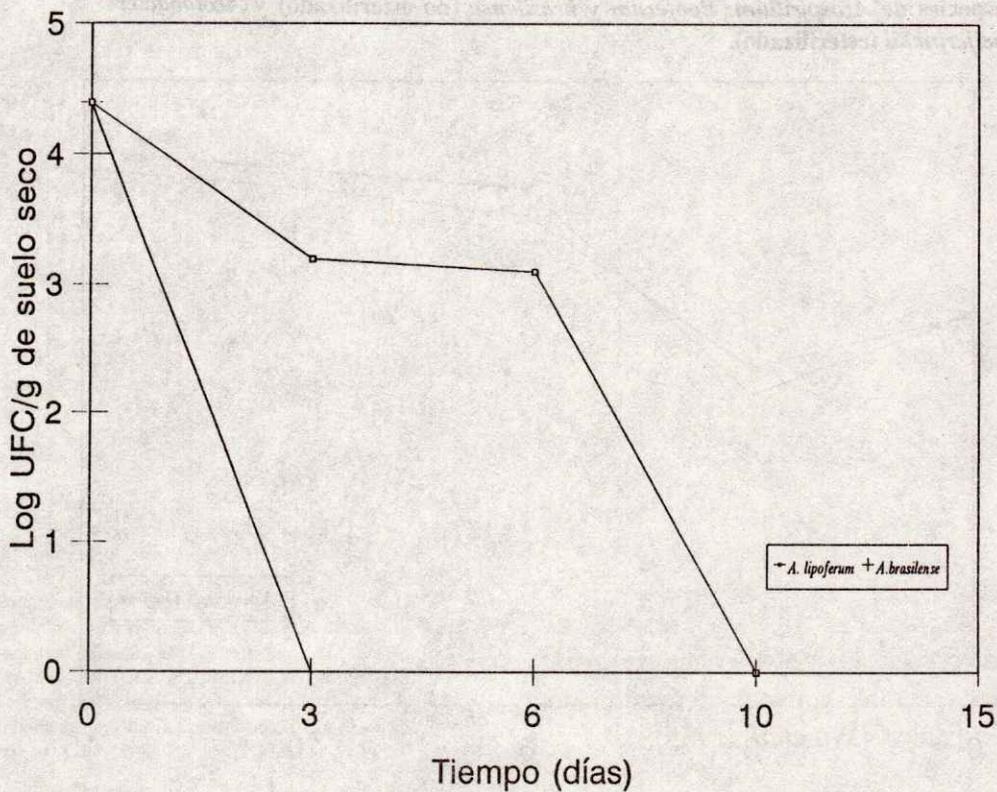


Figura 4. Sobrevivencia de especies de *Azospirillum*: *lipoferum* y *brasilense* en suelo no esterilizado.

alóctonos introducidos con las semillas en el suelo (Curl y Truelove, 1986). Lo anterior sugiere que las especies de *Azospirillum* pueden ser inoculadas simultáneamente o en mezcla y competir exclusivamente bajo la influencia de exudados de la espermósfera-rizósfera (Mahaffee y Bachman, 1995; Kloepper *et al.*, 1991). Los resultados muestran un efecto de la rizósfera (Mahaffee y Bachman, 1995; Kloepper *et al.*, 1991). Los resultados muestran un efecto rizósfera positivo sobre la relación R/S de 100:1, en favor de las BFN, lo que señala la importancia del tipo exudados de la espermósfera-rizósfera para que la actividad biológica se concentre en esa zona (Kloepper *et al.*, 1991).

La Figura 3 muestra el comportamiento de *A. lipoferum* en suelo no esterilizado y de *Az. beijerinckii* en el esterilizado. En donde la población de *A. lipoferum* fue incapaz de sobrevivir, posiblemente por que la materia orgánica del suelo no contiene el total de nutrimentos que la bacteria requiere, con una marcada incapacidad competitiva con la flora autóctona del suelo alejado de las raíces. En tales condiciones la bacteria tendió a morir con lentitud durante los seis días al agotar sus reservas internas y con rapidez en el séptimo día, cuando no se detectaron sobrevivientes. Lo anterior apoya el concepto de que al menos estas BFN no pertenecen al suelo, sino a la zona de la espermósfera-rizósfera (Alexander y Zuberer, 1988; De Coninck *et al.*, 1988; Mahaffee y Bachman, 1993). Ya que en el caso de *Az. beijerinckii* en el suelo esterilizado, la materia orgánica sólo fue suficiente para facilitar su sobrevivencia, mediante la capacidad de la bacteria para oxidar algunos ácidos húmicos derivados de esa materia orgánica (Wu *et al.*, 1985).

La Figura 4 presenta las curvas de muerte de la mezcla *A. brasilense* y *A. lipoferum* en suelo no esterilizado alejado de las raíces, las cuales indican que entre ellas existe diferencia en su capacidad de sobrevivencia, probablemente porque a cambio de una mayor habilidad de interacción de *A. brasilense* con las raíces de maíz, tiene una extrema susceptibilidad a factores antagonistas del suelo alejado de las raíces, por lo que no sobrevivió más de dos días; por el contrario, *A. lipoferum*, que no invade el interior del sistema radical del maíz, logró sobrevivir por un período mayor, lo cual muestra lo vital de la interacción entre las BFN-espermósfera-rizósfera para su establecimiento en ella y su probable efecto positivo sobre el crecimiento del maíz (Curl y Truelove, 1986; Okoon, 1985). Un trabajo de campo evalúa estos resultados para su reafirmación o rechazo.

LITERATURA CITADA

- ALEXANDER, D.B., D.A. ZUBERER, and D.M. VIETOR. 1987. Nitrogen fixation (acetylene reduction) associated roots of intact *Zea mays* in fritted clay at oxygen tensions. *Soil Biol. Biochem.* 19: 1-6.
- ALEXANDER D.B., and D.A. ZUBERER. 1988. Impact of soil environmental factors on rates of N₂-fixation associated with roots of intact maize and sorghum plants. *Plant Soil* 110: 303-315.
- AZAD, H.R., J.D. DAVIS, W.C. SCHANTHORST, and I. KADO. 1985. Relationship between rhizoplane and rhizosphere bacteria and *Verticillium* wilt resistance in potato. *Arch. Microbiol.* 140: 347-351.
- BASHAN Y., and H. LEVANONY. 1988. Interaction between *Azospirillum brasilense* and wheat root cells during early stages of root colonization. pp. 166-173. *In:* W. Klingmuller (ed.). *Azospirillum* IV. Springer-Verlag, Berlin.
- CURL, E.A., and B. TRUELOVE. 1986. *The rhizosphere*. Springer-Verlag, Berlin.
- CHANWAY, C.P., L.M. NELSON, and F.B. HOLL. 1988. Cultivar specific growth promotion of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) by coexistent *Bacillus* species. *Can. J. Microbiol.* 34: 925-929.
- CRISTENSEN-WENIGER, C., R.M. BODDEY, and J. DÖBEREINER. 1985. Evaluation of nitrogen fixation in sorghum cultivars inoculated with different strains of *Azospirillum* spp. Pp. 180-188. *In:* W. Klingmuller (ed.). *Azospirillum* II. Springer-Verlag, Berlin.
- CHRISTIANSEN-WENIGER, C., A.F. GRONEMAN, and J.A. VAN VEEN. 1992. Associative N₂ fixation and root exudation of organic acids from wheat cultivars of different aluminum tolerance. *Plant Soil* 139: 167-174.

- DE CONINCK, K., S. HOREMANS, S. RANDBAGE, and K. VLASSAK. 1988. Occurrence and survival of *Azospirillum* sp. temperate regions. *Plant Soil* 110: 213-218.
- DE FREITAS, J.L.M., R.E.M. Da ROCHA, P.A.A. PEREIRA, J. DÓBEREINER. 1982. Materia orgánica e inocula con *Azospirillum* na incorpora de N pelo milho. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 17: 1432-1432.
- HENIS, Y. 1987. Survival and dormancy of microorganisms. John Wiley and Sons. New York.
- KIPE-NOLT, J.A., U.K. AVALAKII, and P.J. DART. 1985. Root exudation of sorghum and utilization of exudates by nitrogen fixing bacteria. *Soil Biol. Biochem.* 17: 859-863.
- KLOEPPER, J.W., and M.N. SCHROTH. 1981. Plant growth-promoting rhizobacteria and plant growth and the displacement of root microflora. *Phytopathol.* 70: 1020-1024.
- KLOEPPER, J.W., R.M. ZAPLOTOWICZ, E.M. TIPPING, and R. LIFSHITZ. 1991. Plant growth promotion mediated by bacterial rhizosphere colonizers. pp. 315-326. In: D.L. Keister and P.B. Cregan, (eds.). *The rhizosphere and plant growth*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- KREIG, N.L., and J. DÓBEREINER. 1984. Genus *Azospirillum*. pp. 94-104. In: R.E. Buchanan and N.E. Gibbons (eds.). *Bergey's Manual Determinative Bacteriology*. 9 Ed., Williams and Wilkins, Baltimore.
- KROTZKY, A.R. BERGGOLD, and D. WERNER. 1986. Analysis of factors limiting associative N_2 fixation with two cultivars of sorghum mutants. *Soil Biol. Biochem.* 18: 201-207.
- KROTZKY, A., R. BERGGOLD, and D. WERNER. 1988. Plant characteristic limiting associative N_2 fixation (C_2H_4 -reduction) with two cultivars of sorghum mutants. *Soil Biol. Biochem.* 20: 157-162.
- LINDELL, C.M., and J.L. PARKE. 1989. Enhanced colonization of pea taproots by a fluorescent pseudomonad biocontrol agent by water infiltration into soil. *Phytopathol.* 79: 1327-1332.
- MAHAFEE W.F., and P.A. BACHMAN. 1993. Effects of seed factors on spermosphere and rhizosphere colonization of cotton by *Bacillus subtilis* GbO3. *Phytopathol.* 83: 120-123.
- MALIK, K.A., Y. ZAFAR, R. BILAL, and F. AZAM. 1987. Use of ^{15}N isotope dilution for quantification of N_2 fixation associated with roots of kallar grass. *Biol. Fertil. Soil* 4: 103-108.
- MOFFAT, A.S. 1986. Toward a biotechnological revolution. *Mosaic*. 17: 26-39.
- MURTY, M.G., and J.K. LADHA. 1987. Differential colonization of *Azospirillum lipoferum* on roots of two varieties of rice. *Biol. Fertil. Soil* 4: 3-7.
- OKOON, Y. 1985. *Azospirillum* as a potential inoculant for agriculture. *Trends Biotechnol.* 3: 223-228.
- PATRIQUIN, D.G., J. DÓBEREINER, and D.K. JAIN. 1983. Sites and processes of association between diazotrophs and grasses. *Can. J. Microbiol.* 29: 900-915.
- REINHOLD, B., T. HUREK, and I. FENDRIK. 1985. Strain-specific chemotaxis of *Azospirillum* spp. *J. Bacteriol.* 162: 190-195.
- ROSZAK, D.B., and R.R. COLWELL. 1987. Survival strategies of bacteria in the natural environment. *Microbiol. Rev.* 51: 356-379.
- RUBENCHIK, L.I. 1960. *Azotobacter* and its use in agriculture. Published for the National Science Foundation, Washington, D.C. Translated from Russian (1963).
- SCHER, F.M., J.S. ZIEGLE, and J.W. KLOEPPER. 1993. A method for assessing the root-colonizing capacity of bacteria of maize. *Can. J. Microbiol.* 30: 151-157.
- SCHMIDT, E.L. 1979. Initiation of plant root-microbe interactions. *Ann. Rev. Microbiol.* 33: 335-376.
- STANLEY, J., E. CERVANTES. 1991. Biology and genetics of the broad host range *Rhizobium* spp. NGR234: a review. *J. Appl. Bacteriol.* 70: 9-19.
- TALLER, B.J., and T.Y. WONG. 1989. Cytokinins in *Azotobacter vinelandii* culture medium. *Appl. Environ. Microbiol.* 52: 266-267.
- TARRANT, J.J., N.R. KRIEG, and J. DÓBEREINER. 1978. A taxonomy study of the *Spirillum lipoferum* group, with descriptions of a new genus, *Azospirillum* gen. nov., and two species *Azospirillum lipoferum* (Beijerinck).
- TAUER, L.W. 1989. Economic impact of future biological nitrogen fixation technologies on United States agriculture. *Plant Soil* 119: 261-270.
- TCHAN, T. 1984. Family II, *Azotobacteraceae*. *Primer* 1993. pp. 219-234. In: Buchanan and N.E. Gibbons (eds.). *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. 9 Ed., Williams and Wilkins, Baltimore.
- TURNER, J.T., and P.A. BACKMAN. 1991. Factors relating to peanut yield increases after seed treatment with *Bacillus subtilis*. *Plant Dis.* 75: 73-75.
- WU, F.J., J. MORENO, and G.R. VELA. 1985. Growth of *Azotobacter vinelandii* on soil nutrients. *Appl. Environ. Microbiol.* 53: 489-494.
- VICENT, J.M. 1979. A manual for the practical study of root-bacteria. IBP Handbook No. 15. Blackwell Scientific Publications, Oxford, England.
- ZAPLOTOWICZ, R.M., C.M. PRESS, N. LYNG, G.L. BROWN, and J.M. KLOPPER. 1992. Compatibility of plant growth promoting rhizobacterial strains with agrichemical applied to seed. *Can. J. Microbiol.* 38: 45-50.
- ZUBERER, D.A., D.B. ALEXANDER. 1986. Effect of oxygen partial pressure and combined nitrogen on N_2 -fixation (C_2H_4) associated with *Zea mays* and other gramineous species. *Plant Soil*. 90: 47-5.

FERTILIZACION DEL AGAVE TEQUILERO (*Agave tequilana* Weber) EN LA REGION DE TEQUILA, JALISCO, MEXICO¹

ENSAYO DE UNA METODOLOGIA PARA ANALIZAR CRECIMIENTO EN CULTIVOS MULTIANUALES MEDIANTE UNA TECNICA NO DESTRUCTIVA

Fertilization of *Agave tequilana* Weber of Tequila, Jalisco, Mexico

Ana G. Valenzuela Zapata¹ y Diego R. González Eguiarte²

¹Departamento de Botánica y Zoología del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara

²INIFAP, Facultad de Agronomía, Universidad de Guadalajara

Palabras clave: Cultivos multianuales.

Index words: Multiannual crops.

RESUMEN

El "agave tequilero" (*Agave tequilana* Weber), cultivo que genera importantes divisas al país al ser industrializado para el tequila, es fertilizado por muchos de los productores, aún sin disponer de tecnología al respecto. La investigación en el agave tequilero se ha obstaculizado, por la falta de metodologías para evaluar el crecimiento y rendimiento sin destruir plantas y en corto plazo. En este trabajo se evaluaron

tratamientos de fertilización NPK haciendo uso de técnicas no destructivas. Las variables consideradas fueron la longitud de planta (LP), la longitud de "cogollo" o meristemo apical (LC), las hojas que produce una planta (Hp y el número de hojas presentes en la roseta (Nh). Las plantas utilizadas en el experimento fueron de 1 año de cultivo y se midieron por dos años consecutivos: 1987 y 1988. Los mayores incrementos en el peso de cabeza se presentaron durante el período posterior a los 6 meses después de la fertilización. El tratamiento 120-80-60 a largo plazo (18 meses), duplicó el rendimiento del testigo sin fertilizar. Los pesos mayores de "cabeza" (parte cosechable) por planta, a los 2.5 años de edad del cultivo, correspondieron a los tratamientos 120-80-60 con 5.90 kg y el 80-00-30 con 5.12 kg, mientras que el testigo sin fertilizar alcanzó casi la mitad de éstos: 2.36 kg.

Recibido 3-93.

SUMMARY

The "agave tequilero" (*Agave tequilana* Weber) is an important economic resource to Mexico; this plant is used to make tequila, an export product. Many farmers apply fertilizers to this crop without any technological basis. To evaluate plant growth and yield in a short term, with non-destructive techniques is a problem in agronomic research. In this study, NPK fertilizer treatments were evaluated with non-destructive techniques. For this purpose, total plant height; number of leaves per plant and number of leaves in the rosette were used as growth indicators. The plants used in the experiment had been under cultivation for one year and were evaluated for two years, 1987 and 1988. The highest weights of "cabeza" (harvested part of the plant) were obtained with plants cultivated for 2.5 years in the 120-80-60 treatment with 5.90 kg/plant and in the 80-00-30 treatment with 5.22 kg/plant. The control without fertilization yielded 2.36 kg/plant.

INTRODUCCION

El agave tequilero es la planta que se utiliza para la elaboración del tequila y se cultiva en más de 50 000 ha de tierras de temporal en Jalisco. De esta actividad económica dependen alrededor de 20 000 personas en el área rural. De acuerdo con las nuevas relaciones comerciales de nuestro país, se tienen mayores expectativas de producción de esta bebida, por lo tanto se preve una demanda mayor de materia prima (Valenzuela, 1994). La fertilización es una práctica casi generalizada entre los productores de agave de Jalisco, la cual se ha fundamentado en evaluaciones visuales debido, principalmente, a la dificultad de

conocer los efectos en el corto plazo, ya que el cultivo tiene un ciclo que varía entre 6 y 12 años. La fertilización se complementa con la incorporación de estiércoles de bovino, cerdo y gallina. La aplicación se realiza en forma manual y 80% de los productores lo depositan por encima de la planta. Actualmente, se reconoce un efecto positivo de los fertilizantes químicos, principalmente de nitrógeno; sin embargo, se supone que estos no se están aplicando en los niveles adecuados. Este estudio tuvo como objetivo generar una metodología básica no destructiva para conocer la respuesta a la fertilización; se espera que, en ausencia de técnicas de evaluación probadas en este cultivo, los resultados aquí obtenidos contribuyan a la realización de otras investigaciones.

REVISION DE LITERATURA

Técnicas de evaluación.

Con respecto a técnicas de evaluación de producción y productividad en el género *Agave* destacan los trabajos de Nobel (1976, 1977) iniciados con *A. deserti* donde se estudian aspectos ecofisiológicos como son las relaciones hídricas, la floración y la fotosíntesis. Nobel introduce el parámetro "leaf unfolding", haciendo referencia a las hojas que se desenvuelven del cono central de la roseta, conocido como "cogollo". Esta es una técnica no destructiva que permite la evaluación continua del material vegetativo de experimentación, mediante el corte de espinas en las hojas evaluadas. Como técnica destructiva, el mismo autor ha utilizado la determinación del peso seco de

plantas especificando detalladamente sus partes. La determinación de la acidez titulable de los tejidos es una técnica sumamente valiosa que Nobel (1988) ha utilizado para evaluar la respuesta al estímulo nutrimental. Martínez (1985) en un estudio sobre demografía en poblaciones silvestres de maguey mezcalero (*A. Salmiana* spp. *crassispina*) en el altiplano potosino, define varios parámetros para evaluar en forma indirecta la biomasa total de plantas sin destruirlas. Este autor refiere una alta correlación entre el producto de la altura y el diámetro de la roseta y los pesos fresco y seco de la planta. Reyes (1987), al evaluar plantaciones de esta misma especie en Zacatecas, utiliza las ecuaciones generadas por Martínez (1985) y desarrolla su estudio a partir de métodos no destructivos, y estima la biomasa de plantaciones en diferentes condiciones de suelos.

Fertilización en el género *Agave*.

Nose *et al.* (citados por Nobel, 1988), consignan que en las plantas con metabolismo ácido crassuláceo (plantas MAC) se incrementan los rendimientos cuando son fertilizadas con nitrógeno. Nobel (1988) también cita a Jewer *et al.*, quienes establecen que el potasio es un nutrimento importante debido a la influencia que ejerce sobre el potencial osmótico y la apertura estomática de estas plantas. La nutrición y fertilización en el género *Agave* han sido escasamente estudiadas. Destacan los trabajos en sisal (*A. sisalana*) cultivado en Tanzania principalmente. Nobel (1988), cita a Lock, quien al cosechar una tonelada de fibra en peso seco de *A. sisalana*, define que se extraen del suelo 30 kg de N, 5 kg de

P y 80 kg de K. Este mismo autor recomienda para *A. sisalana*, en plantaciones de Tanzania, aplicaciones de 100 kg de N ha⁻¹ del primero al tercer año de cultivo, con incrementos de 20 kg ha⁻¹ en la dosis cada año durante los primeros cinco años de producción. También menciona que no existe respuesta a la fertilización fosfatada, aunque insiste en que una aplicación de 20 a 40 kg de P₂O₅ ha⁻¹ puede beneficiar el crecimiento de raíces durante el transplante. En cuanto al potasio, afirma que su influencia no se aprecia en la producción del cultivo, pero el daño del "bandeado de hojas" se atribuye a la deficiencia de este elemento. Otros autores (Jacob y Von Uexkull, 1958) señalan que para el cultivo de *A. sisalana* es recomendable aplicar de 45 a 90 kg de nitrógeno, 60 a 80 kg de P₂O₅ y de 65 a 100 kg de K₂O por hectárea. En otra especie fibreira (*A. lechuguilla*), y de acuerdo con Quero y Nobel (citados por Nobel, 1988), las aplicaciones de 20 y 100 kg de N/ha producen incrementos de 16 y 39% de fibra, respectivamente. Para el henequén (*A. fourcroydes*), la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1984) recomienda no fertilizar las plantaciones pues no se ha encontrado el beneficio de esta práctica; en cambio, investigaciones realizadas en Cuba para esta misma especie indican que con la aplicación de 100 kg de N/ha se incrementa el rendimiento de fibra en 60 a 70% (Carión, citado por Nobel, 1988). Al trabajar con *A. deserti* en condiciones silvestres, Nobel y Berry (1985) consignan que la máxima acidez nocturna acumulada en el parénquima de esta especie se relaciona positivamente con el nitrógeno y el boro presentes en el suelo. Para *A. deserti* fertilizado en condiciones silvestres en Sonora, Nobel (1988) establece que la

aplicación de nitrógeno condujo a una producción doble de hojas en un año, el fósforo causó un leve incremento sobre éstas y el potasio y calcio ejercieron muy poco efecto. Por su parte, Nobel y Berry (1985) señalan que para *A. utahensis*, en comunidades silvestres, se presentó una mayor correlación entre el nivel de nitrógeno en el suelo y la acidez nocturna acumulada en el clorénquima, lo que corrobora una mayor actividad fotosintética propiciada por este nutrimento. José (1993) evaluó las hojas producidas de plantas de *A. salmiana* y *A. mapisaga* con diferentes daños en la cutícula y con la aplicación de N, P y estiércol. Este autor no detectó diferencias significativas entre los niveles de fertilización y abonos orgánicos probados en un mismo año.

De acuerdo con la información anterior se concluye que en la escasa experimentación realizada en el género *Agave* se han identificado los siguientes intervalos de respuesta: en N de 45 a 110 kg ha⁻¹, en P₂O₅ de 20 a 80 kg ha⁻¹ y en K₂O de 65 a 100 kg ha⁻¹. Las necesidades nutrimentales de las especies de agaves difieren con respecto a las condiciones ambientales específicas donde se desarrollen.

MATERIALES Y METODOS

Material vegetativo y características del sitio experimental.

Para desarrollar el presente estudio en el año de 1987, se utilizó una plantación comercial de 1 año de cultivo, con condiciones aparentemente homogéneas de dimensiones y vigorosidad. El sitio experimental se ubicó en un predio

localizado a 1 km al sur de la población de Tequila, Jalisco. Con una altitud de 1160 m y una latitud de 20° 54' norte y 103° 50' oeste. El lugar es representativo de los suelos y clima de la región, además de que en el se hace un manejo tradicional del cultivo. Según la clasificación de FAO, los suelos son Cambisoles crómicos (CETENAL, 1981), desarrollados a partir de la formación de arcillas y óxidos de hierro y aluminio, en una topografía plana a ligeramente ondulada. Son suelos de color café oscuro y café rojizo que presentan, la mayoría, una reacción ácida en la superficie y un drenaje eficiente (SARH, 1985). El sitio presentó un pH muy ácido, con textura franco arcilloarenosa y con una fertilidad relativamente adecuada. Las características físicas y químicas del suelo se muestran en el Cuadro 1. El clima se clasifica como Awo (según Koppen, modificado por García, 1981); el más seco del grupo de los cálidos subhúmedos, con lluvias en verano. La cantidad de lluvia anual con probabilidad a 80% es de 800 mm (Figura 1).

METODOLOGIA

Se estudiaron los siguientes tratamientos, en kilogramos por hectárea: nitrógeno (40, 80, 120 y 160), fósforo (0, 40, 80 y 120) y potasio (0, 30, 60 y 90), se utilizó como fuente la urea, el superfosfato de calcio triple y el cloruro de potasio, respectivamente. Los niveles de cada nutrimento fueron definidos de acuerdo con los antecedentes de fertilización por parte de los productores y su posible respuesta. Los tratamientos resultantes fueron 14 y se adicionó un testigo sin fertilizar (15); la relación de tratamientos se presenta en el

Cuadro 2. La unidad experimental estuvo compuesta por cinco plantas con una distancia entre ellas de 1.3 m y entre surcos de 3.2 m, con un total de 300 plantas como parcela útil. Se marcó una planta de orilla entre cada unidad experimental, se abarcó un total de 360 plantas en una superficie de 1500 m². Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar y un diseño de tratamientos Matriz Plan Puebla I (MPP), descrita por Turrent (1985). Se utilizó esta matriz por considerarla como una herramienta útil para interpretar con un criterio estadístico las respuestas que se presentan a los diferentes tratamientos y con el propósito de observar el comportamiento de esta metodología en un cultivo multianual. Además, se analizaron los efectos desarrollando un factorial incompleto y pruebas de medias Duncan para los tratamientos de fertilización. En la primera fertilización se aplicaron niveles completos de fósforo y potasio y sólo un tercio del de nitrógeno (julio de 1987). En la segunda fertilización se aplicaron los dos tercios restantes del nitrógeno (agosto de 1987). Todos los fertilizantes fueron enterrados en el suelo. Para conocer los efectos a corto y mediano plazo de la fertilización, se evaluaron las variables analizadas en un espacio de tiempo que abarcó dos temporales de lluvia (1987 y 1988). En el primer temporal (1987) se efectuó la fertilización, no así en el segundo, para conocer el efecto residual de los fertilizantes anteriormente aplicados.

Mediciones.

Una vez seleccionadas las plantas, la primera evaluación consistió en la medición de sus dimensiones iniciales en junio de

Cuadro 1. Algunas características físicas y químicas del suelo del sitio experimental.

Parámetro	
pH 1:1	4.79
pH 2:1	4.89
Arena %	
Arcilla %	33.28
Limo %	17.95
Textura	Franco arcillo arenoso
Densidad aparente	1.47
Materia orgánica	2.32
Nutrientes	
N Nitratos	47.83
N Amoniacal	22
Fósforo	26
Potasio	560
Calcio	784
Magnesio	59.67
Hierro	8.43
Manganeso	48.33
Aluminio	31.2

Cuadro 2. Tratamiento de fertilización NPK.

Trat.	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
----- kg ha ⁻¹ -----			
1	80	40	30
2	80	40	60
3	80	80	30
4	80	80	60
5	120	40	30
6	120	40	60
7	120	80	30
8	120	80	60
9	40	40	30
10	160	80	60
11	80	0	30
12	120	120	60
13	80	40	0
14	120	80	90
15	0	0	0

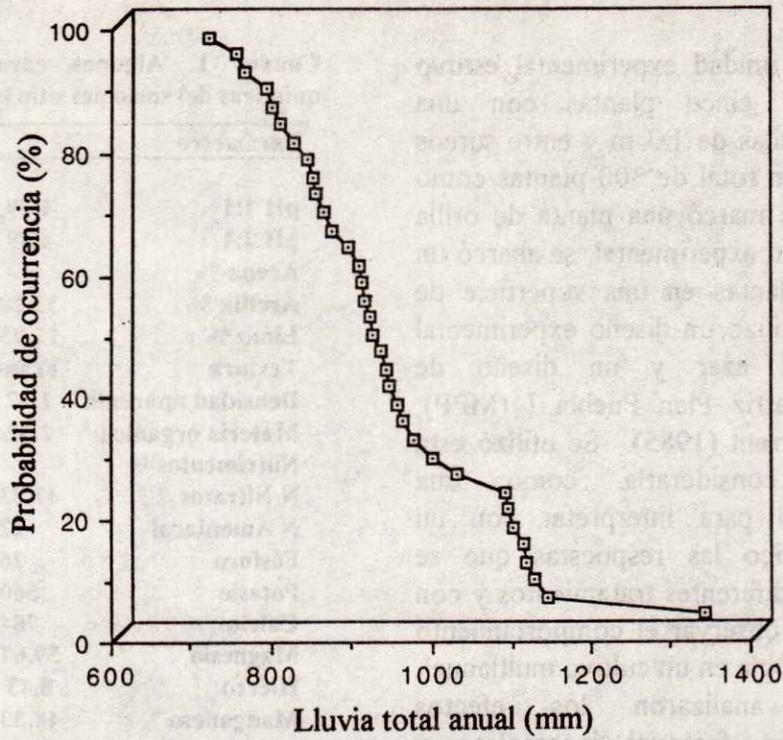


Figura 1. Distribución acumulativa de lluvia total anual. Estación Sta. Rosa, Ametitán, Jal. (1985-1988).

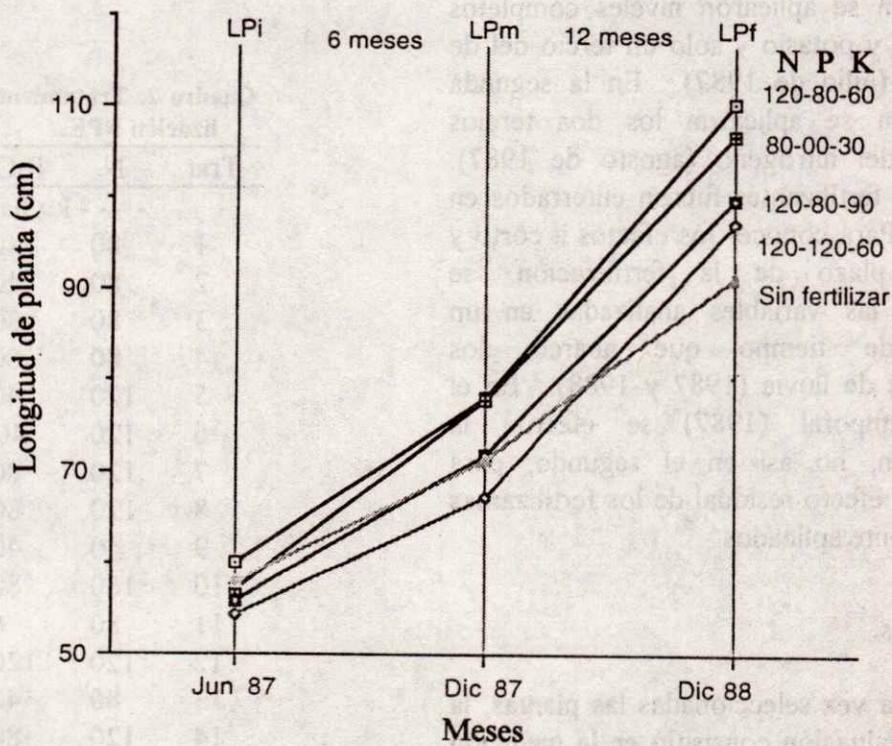


Figura 2. Longitud de planta de los tratamientos sobresalientes y un testigo sin fertilizar (15) en las tres evaluaciones (junio de 1987 a diciembre de 1988).

1987; las variables generadas fueron: la longitud de planta (LP), la longitud del cogollo (LC) y el número de hojas presentes en la planta (NH). Estas mismas variables se midieron a los cuatro meses posteriores a la fertilización, en diciembre de 1987, y a los 16 meses, en diciembre de 1988. Después de medir las condiciones iniciales de desarrollo se prepararon las plantas para las evaluaciones siguientes. La preparación consistió en cortar todas las espinas de las hojas cercanas al cogollo, para entonces contar como hojas producidas (HP) sólo aquellas hojas desprendidas con espinas completas. Este método de medición ya ha sido utilizado para evaluar la productividad de otras especies de agaves (Nobel y Valenzuela, 1987). Las hojas desenvueltas del "cogollo" (HP o "leaf unfolding"), se contaron sin destruir al cortar sus espinas en dos períodos posteriores a la fertilización. El primero, de junio de 1987 a marzo de 1988 (HP1) y el segundo, de marzo a diciembre de 1988 (HP2); la suma de ambos constituye el total (HPT). Se usaron métodos no destructivos principalmente, aunque también se extrajeron plantas para estimar el rendimiento de manera indirecta. Se extrajeron 40 plantas durante el tiempo de experimentación para determinar las relaciones entre parámetros no destructivos y el rendimiento de "cabeza". Con estas ecuaciones se estimaron los rendimientos de cabeza para los tratamientos probados.

RESULTADOS Y DISCUSION

Variabilidad de las plantaciones de agave.

La selección del material vegetativo requirió de un recorrido minucioso por la

región, ya que la variabilidad de las plantaciones era evidentemente grande. La variabilidad de las plantas se debe principalmente a una deficiente selección por tamaño, a la diferencia de edad fisiológica de los hijuelos, a la heterogeneidad de los surcos por el manejo y a los hormigueros. Además, era necesario que las características del suelo fueran representativas de la zona y presentaran cierta homogeneidad dentro del sitio experimental. Bajo estas premisas se seleccionó la plantación utilizada. Las dimensiones de las plantas con menor variación fueron la longitud de planta (LP) y la longitud del cogollo (LC); mientras que la variable número de hojas presentes en la planta (NH) tuvo el doble de variabilidad que las anteriores. El número de hijuelos por planta fue muy variable y no se consideró para este estudio como un parámetro de medición (Cuadro 3). Esto indica que aun con una observación a detalle, las condiciones de variabilidad en las plantaciones de agave representan cierta dificultad para el investigador.

Efectos de la fertilización.

La fertilización ejerció efectos de diferente magnitud en las variables, según el período evaluado y los efectos nutrimentales estudiados. Las diferencias entre bloques en todos los períodos fueron notables; resultó conveniente separar su efecto mediante el diseño experimental empleado (Cuadro 4).

Longitud de planta (LP), longitud de cogollo (LC) y número de hojas presentes en la planta (NH).

En términos generales, a largo plazo (18 meses), los efectos de la fertilización

Cuadro 3. Características promedio, desviación estándar (\pm) y significancia de los parámetros evaluados antes de la fertilización. Datos provenientes de 300 plantas el 18 de junio de 1987.

Parámetro	Promedio	Coefficiente de variación	D.E. \pm	Significancia
		%		
Longitud de planta inicial (Lpi) cm	60.73	7.89	4.79	0.0612
Longitud de cogollo inicial (Lci) cm	70.22	7.99	5.77	0.087
Números de hojas presentes en la planta inicialmente (Nhi)	21.28	14.98	3.19	0.0192
Número de hijuelos o vástagos	0.466	79.15	0.37	

Cuadro 4. Efectos significativos de la fertilización sobre las variables estudiadas en un diseño factorial incompleto de tres factores (NPK), cuatro niveles y 15 tratamientos en cuatro bloques. Los efectos factoriales se determinaron con el método.

Fuentes de variación	Diciembre 1987			Diciembre 1988			Jun. 1987 a Dic. 1988			1o.	2o.	Total
	Lpm	Lcm	Nhm	Lpf	Lcf	Nhf	ITLP	ITLC	ITNH	HP1	HP2	HPT
Bloque	0.1214	0.2611	0.007	0.1446	0.0006	0.1408	0.1666	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
N	0.2603	0.0933	0.3104	0.2555	0.1484	0.2557	0.0243	0.0092	0.0309	0.0021	0.0932	0.0309
K	0.0003	0.0011	0.0144	0.0014	0.0003	0.0011	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
NP	0.3577	0.7164	0.6492	0.4992	0.2494	0.5154	0.1508	0.1145	0.002	0.007	0.001	0.002
NPK	0.0474	0.0586	0.0229	0.0074	0.0151	0.005	0.0302	0.0559	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Efectos factoriales*	NPK	NP	NP	NPK	NPK	NPK	Incrementos totales (18 m)			NPK	P(O)	NPK

Lpm = Longitud de planta media; Lcm = Longitud de cogollo media; Nhm = Número de hojas media; Lpf = Longitud final; Lcf = Longitud de cogollo final; Nhf = Número de hojas final, ITLP = Incremento total en longitud de planta; ITLC = Incremento total en longitud de cogollo; ITNH = Incremento total de número de hojas; HP1 = Hojas desvenutas en el primer muestreo; HP2 = Hojas desvenutas en el segundo muestreo; HPT = Hojas desvenutas en total.

fueron los más notables y esto se demuestra a través de la alta significancia de los incrementos totales (ITLP, ITLC, ITNH; Cuadro 4). Esto sugiere la residualidad de los fertilizantes en el suelo, los cuales son aún disponibles después de un temporal de lluvias. Además, se comprueba que los cambios evaluados en la planta tienen un ritmo relativamente lento. Los efectos a corto y mediano plazo son similares, aunque se observan marcados efectos del potasio y de la interacción nitrógeno-fósforo-potasio (con un intervalo de significancias de 0.0586

a 0.0001) en ambos periodos (Cuadro 4). El efecto del N fue de menor importancia (0.3104 a 0.0933); así mismo, fue de escasa magnitud la interacción NP (0.7164 a 0.2494), esto probablemente se deba a la cantidad existente de estos nutrientes en el suelo (Cuadro 4). Por el método de Yates, se observó, a mediano y largo plazo, el efecto de interacción NPK relacionado con el tratamiento 120-80-60 (8) que contiene a los niveles medios altos; solamente para los parámetros LCM y NHM aparecieron efectos negativos en la interacción NP, lo

cual significa que el crecimiento de tejidos foliares descendió con el tratamiento 120-80-30. La diferencia entre uno de los mejores tratamientos (120-80-60) y el de efectos nocivos (120-80-30) es el aumento de 30 unidades de potasio que establece una relación NPK adecuada (Cuadro 4).

Hojas desmenuadas (hojas producidas).

Las hojas desmenuadas del collogo fueron muy sensibles a la fertilización desde el primer período de evaluaciones. Puede advertirse que esta variable tiene un ritmo más rápido que las variables de desarrollo. Para las hojas producidas, las diferencias entre los efectos de los nutrimentos no son tan drásticas como en las variables de desarrollo; aunque se observa que para K y NPK hay efectos ligeramente mayores que en los demás (Cuadro 4). Con respecto a los resultados de estas variables, encontrados por el método de Yates, el efecto más frecuente es la interacción NPK (120-80-60) a corto plazo, con la excepción del segundo período, en el que se muestra un efecto positivo, es decir un aumento en el desmenuamiento de hojas relacionadas con el tratamiento 80-00-30.

Tratamientos de fertilización sobresalientes.

En las Figuras 2 a 4, se observa un patrón de respuesta de los tratamientos (8, 11, 14, 12) comparado con un testigo sin fertilizar (15) muy similar para todas las variables evaluadas. Las tendencias de respuesta entre los Tratamientos 8 (120-80-60) y 11(80-00-30) son muy cercanas entre sí, mientras que los tratamientos 14(120-80-90) y 12(120-120-60) tienen menores aumentos que los anteriores (8 y 11); pero con un estrecho

comportamiento (Figuras 2 a 4). El testigo sin fertilizar con el tiempo se separa en mayor grado de las tendencias de estos dos grupos y se mantiene con incrementos menores que los tratamientos seleccionados (8, 11, 14 y 12). La diferencia estadística entre el testigo sin fertilizar (15) y los tratamientos restantes (1,2,3,4,5,6,7,9,10 y 13) es nula, por lo tanto resultan sobresalientes sólo los Tratamientos 8, 11, 14 y 12; estos a su vez coinciden con la significancia de la interacción NPK, del K y el de la ausencia del fósforo, esto es en su nivel cero (0) observada en el Cuadro 4. En la prueba de medias (Duncan) efectuada para las variables LP, LC y NH a corto y mediano plazo, se consideran cuatro tratamientos diferentes al testigo sin fertilizar, estos son: 120-80-60 (8); 80-00-30 (11); 120-80-90 (14) y el 120-120-60 (12) (Cuadro 5). En los primeros seis meses después de la fertilización, el tratamiento 80-00-30 propició los mayores incrementos en las tres variables de desarrollo y en las HP en el primer período de nueve meses. Este aspecto se observa en el Cuadro 5 donde el Tratamiento 11 encabeza, principalmente, los parámetros de desarrollo (LPM, LMC y NHM) y en segundo lugar se muestra el tratamiento de la interacción NPK 120-880-60 (8). En el segundo período de evaluaciones, que duró un año, el tratamiento 120-80-60 obtuvo los mayores incrementos, superando al 80-00-30 y manteniéndose entonces hasta el largo plazo como el de los mas altos incrementos, aunque las diferencias entre estos tratamientos (8 y 11) no son muy grandes (Cuadro 6). Con las HP no sucede lo anterior, ya que el 80-00-30 (11) permanece ligeramente mayor al 120-80-60 (8) en el período general de observaciones y que

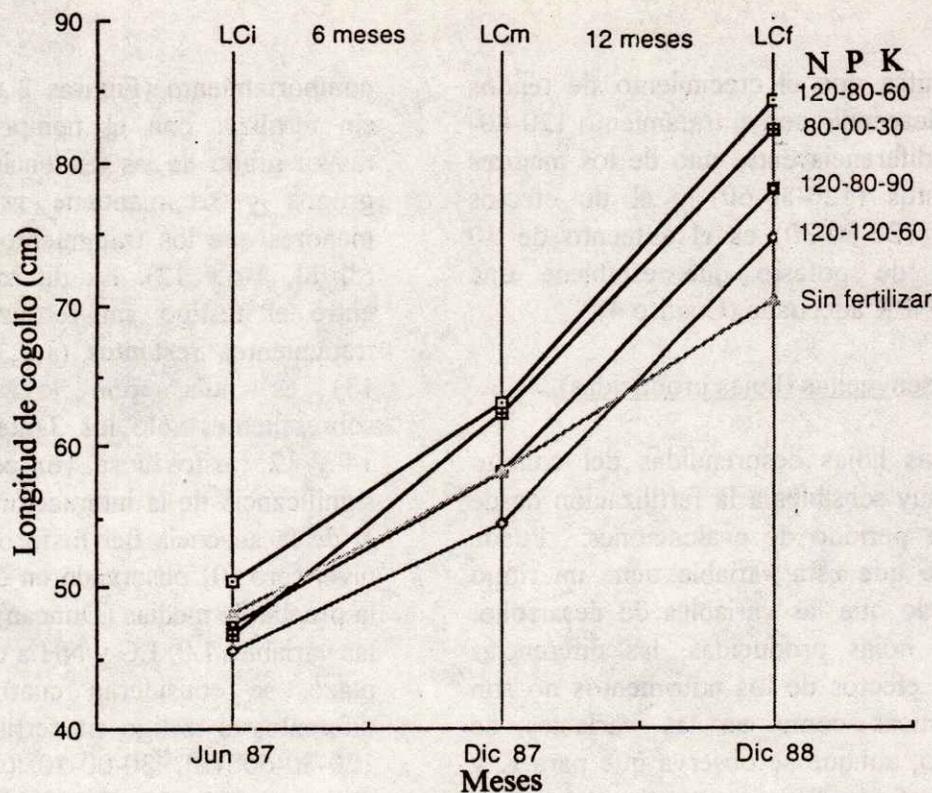


Figura 3. Longitud de cogollo de los tratamientos sobresalientes y un testigo sin fertilizar (15), en las tres evaluaciones (junio de 1987 a diciembre de 1988).

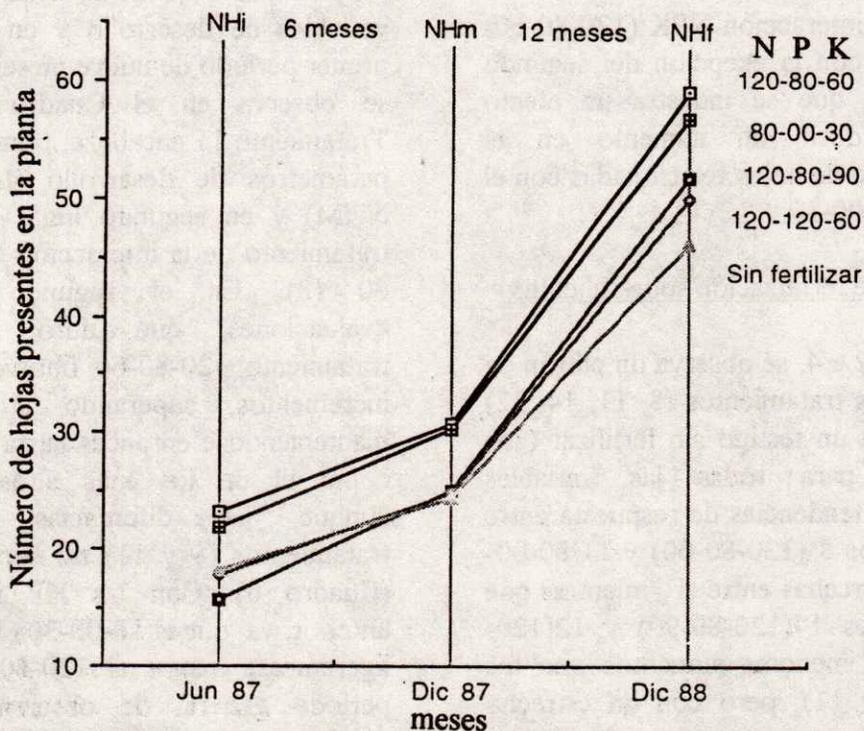


Figura 4. Número de hojas presentes en la planta (NH) de los tratamientos sobresalientes y un testigo (15) sin fertilizar, en las tres evaluaciones (junio de 1987 a diciembre de 1988).

coincide con el efecto significativo del nivel menor de fósforo P(0) ya observado para esta variable anteriormente (HPM; Cuadro4). El tratamiento 120-120-60 (12) se manifiesta inferior para los cuatro parámetros (LP, LC, NH y HP) en todo momento, con respecto a los tratamientos anteriores (8 y 11). Además el Tratamiento (12) presenta un efecto negativo en los primeros seis meses sobre la

altura de la planta y los tejidos foliares (LP y la LC) para después seguir una tendencia positiva de incrementos, muy cercana al tratamiento 120-80-90 (14) pero menor (Figuras 2 a 4. Las hojas producidas del Tratamiento 14 no reflejan ningún efecto negativo, solamente una tendencia de aumentos menores que el resto de los tratamientos probados (Figura 5 y Cuadro 6).

Cuadro 5. Prueba de medias Duncan ($\alpha = 0.05$) de las variables estudiadas para los 14 tratamientos de fertilización NPK y un testigo sin fertilizar (Trat. 15). Las medias con la misma letra no tienen diferencias significativas estadísticamente.

Lpm	Lcm	Nhm	Lpf	Lcf	Nhf	HP1	HP2	HPT
-----Tratamientos-----								
11a	11a	11a	14a	14a	14a	14a	14a	14a
8b	8b	8b	12a	12b	8a	8a	12b	12a
14b	2b	3c	8b	8b	11a	11a	11c	11a
3b	1b	2d	11c	11c	12a	12a	8d	8a
1b	3b	12d	3d	2c	2a	2a	10e	2b
12b	14b	1d	2d	3c	13b	13b	6f	10c
2b	15b	4d	6d	6c	3b	3b	15f	3c
13b	12b	14d	1d	1c	10c	10c	3f	6d
15b	4b	13d	4d	4c	1c	1c	1f	13d
9c	6b	9d	10d	13c	4c	4c	7f	1d
4c	7b	10d	7d	9c	7c	6c	13f	9d
7c	13b	6d	13d	10c	13c	9c	2f	15d
6c	9b	7d	9d	7d	9d	15c	9f	4d
10c	10c	15d	15d	5d	5d	7c	4f	7d
5c	5c	5d	5d	15d	15d	5c	5f	5d

Lpm = Longitud de planta media; Lcm = Longitud de cogollo media; Nhm = Número de hojas media; Lpf = Longitud final; Lcf = Longitud de cogollo final; Nhf = Número de hojas final; HP1 = Hojas desenvueltas en el primer muestreo; HP2 = Hojas desenvueltas en el segundo muestreo; HPT = Hojas desenvueltas en total.

Tratamientos 1 a 15 ver Cuadro 2.

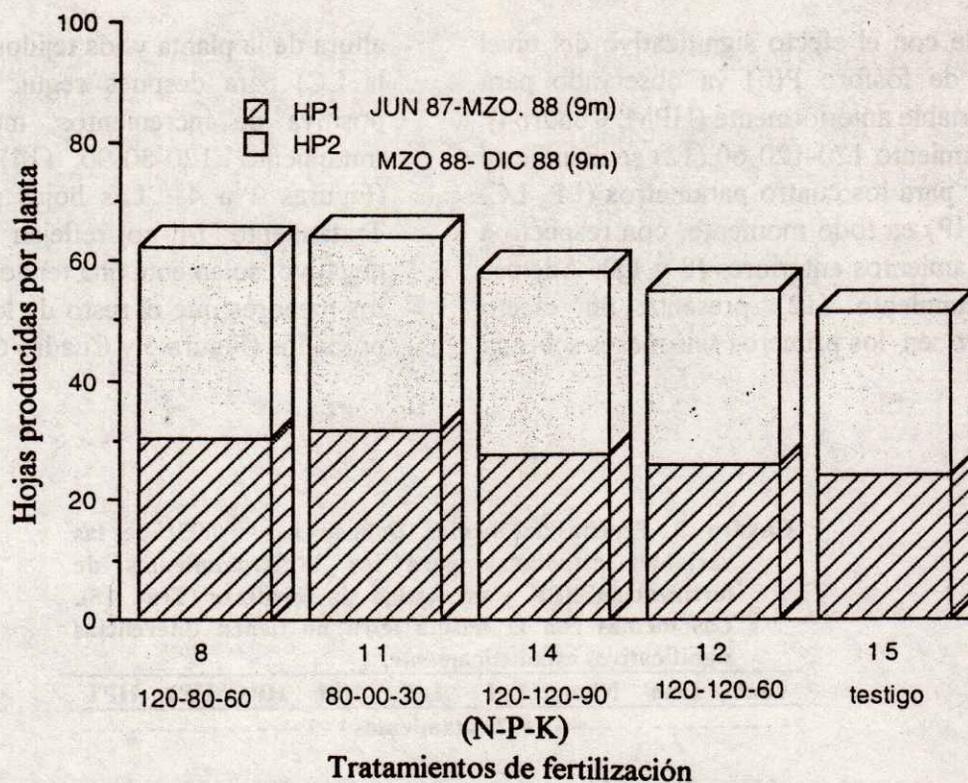


Figura 5. Producción de hojas en los dos períodos de evaluación para los tratamientos sobresalientes y un testigo sin fertilizar (15).

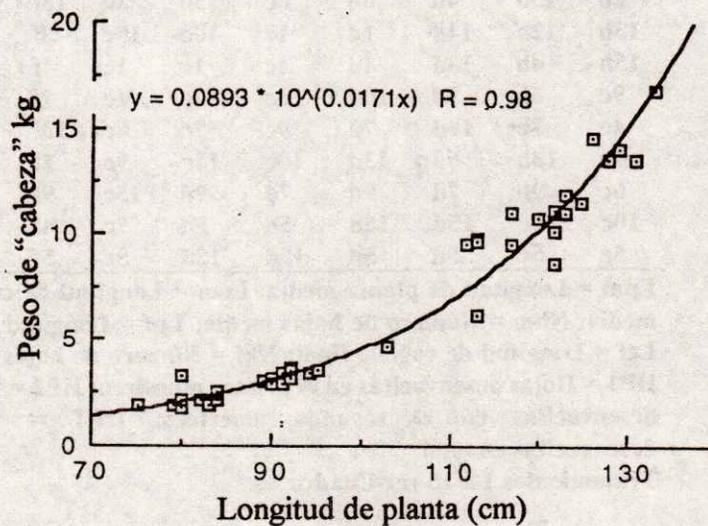


Figura 6. Relación entre la longitud de planta y el rendimiento de "cabeza" (n=40).

Rendimientos estimados de cabeza o piña.

La relación del rendimiento fue más estrecha con la variable LP ($R=0.98$; Figura 5) que con el NH ($R=0.90$; Figura 6), por lo tanto se utilizó la ecuación generada en la primera para estimar el rendimiento de los tratamientos seleccionados (8, 11, 14, 12) y para el testigo sin fertilizar (15). El parámetro NH quedó eliminado, además, por que es una variable más heterogénea que la LP, lo cual le confiere menor confiabilidad. La ecuación es exponencial tal y como se presenta para las primeras etapas de cualquier crecimiento vegetal. Debido a la estimación del rendimiento a partir de la LP, la tendencia de los incrementos del peso ($t\ ha^{-1}$) de cabeza es similar a la de los de la LP (Figura 7). El 120-80-60 (8) mostró un aumento en los primeros seis meses de $2.5\ t\ ha^{-1}$, mientras que el 80-00-30 (11) lo rebasó con $200\ kg\ ha^{-1}$ ($2.764\ ton\ ha^{-1}$). Al largo

plazo (18 meses) el 120-80-60 produjo $15.5\ t\ ha^{-1}$, mientras que al 80-00-30 correspondieron $2\ t\ ha^{-1}$ menos que éste ($13.52\ t\ ha^{-1}$). Los Tratamientos 14 y 12 en promedio, propiciaron un incremento inicial de $1.5\ t\ ha^{-1}$, muy cercanos al testigo sin fertilizar; al mediano plazo se presentó un incremento de $7.66\ t\ ha^{-1}$ con tres $t\ ha^{-1}$ de diferencia con el testigo (Cuadro 7). Los mayores incrementos en el peso de cabeza se presentan en el mediano plazo, es decir, durante el período posterior a los seis meses. Es importante señalar que el tratamiento 120-80-60 a largo plazo (18 meses) duplicó el rendimiento del testigo sin fertilizar. Los pesos finales mayores (a los 2.5 años de cultivo) de cabeza por planta correspondieron a los tratamientos 120-80-60 con $5.90\ kg$ y el 80-00-30 con $5.12\ kg$, mientras que el testigo sin fertilizar alcanzó casi la mitad de éstos ($2.36\ kg$; Figura 8).

Cuadro 6. Incrementos de los parámetros de desarrollo para los tratamientos sobresalientes y un testigo sin fertilizar en los tres períodos de evaluación.

Tratamiento N P Ks	Longitud de planta ^z			Longitud de cogollo ^z			Número de hojas presentes en la planta ^z		
	6	12	18	6	12	18	6	12	18
	kg ha ⁻¹			cm					
120- 80-60	17.8	32.35	50.15	12.65	21.65	34.3	7.45	28.3	35.75
80- 00-30	20.55	29.2	49.75	15.7	19.85	35.55	8.4	26.45	34.85
120- 80-90	12.65	29.8	42.45	9.2	20.15	29.35	7.05	25.15	32.2
120-120-60	16.05	27.75	43.8	10.8	19.9	30.7	9.3	26.55	35.85
Testigo	13.1	20.15	33.25	10.1	12.15	22.25	6.25	21.7	27.95

z) 6, 12 y 18 = meses después de la fertilización.

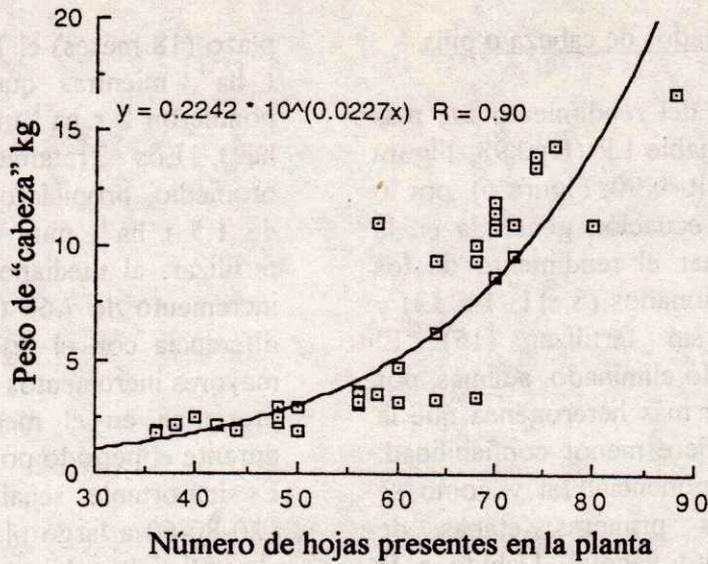


Figura 7. Relación entre el número de hojas presentes en la planta (NH) y el rendimiento de "cabeza" (n=40).

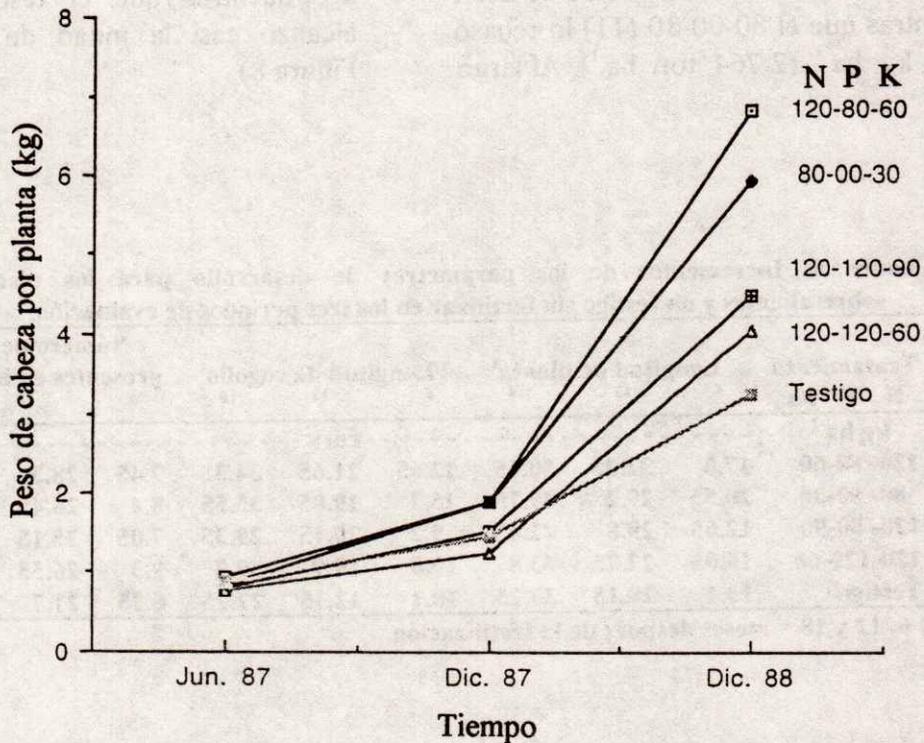


Figura 8. Peso de "cabeza" estimado por planta de tratamientos sobresalientes y un testigo sin fertilizar (15).

Cuadro 7. Rendimientos e incrementos de "cabeza" o "piña" para los tratamientos sobresalientes y un testigo sin fertilizar en los tres períodos de evaluación.

Tratamientos	Rendimiento de "cabeza"			Incrementos de "cabeza"			Incrementos con respecto al testigo		
	N	P	K	jun-87	dic. 87	dic. 88	6	12	18
	-----ton ha ⁻¹ -----						-----%-----		
120- 80-60	2.508	5.056	18.065	2.548	13.009	15.557	8.6	30.7	111.3
80- 00-30	2.22	4.984	15.74	2.764	10.756	13.52	-3.9	28.9	84.1
120- 80-90	2.123	3.992	11.901	1.869	7.909	9.778	-8.1	3.2	39.3
120-120-60	2.02	3.324	10.745	1.304	7.421	8.725	-12.6	-14.1	25.7
Testigo	2.31	3.868	8.551	1.558	4.683	6.241	-	-	-

Z) 6, 12 y 18 = meses después de la fertilización.

LITERATURA CITADA

- CETENA. 1981. Cartas geológicas y de suelo para Tequila, Jalisco.
- CONZATTI, C. 1981. Flora taxonómica mexicana. 2: 93-118.
- JACOB, A. Y H. VON UEXKULL. 1958. Fertilización. 4a. edición.
- LOPEZ U., P. 1990. Evaluación de distintas dosis de fertilización en el agave tequilero (*Agave tequilana* Weber). Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara. Facultad de Agronomía.
- NOBEL, P. S. 1988. Environmental biology of agaves and cacti. Cambridge University Press.
- NOBEL, P. S. Y W.L. WADE. 1985. Element responses of agaves. American Journal Bot. 72: 686-694.
- NOBEL, P. S. Y A.G. VALENZUELA Z. 1987. Environmental responses and productivity of the CAM plant, *Agave tequilana*. W. Agricultural Forest Meteorology 39: 319-334.
- OSAWA, T. 1979. El Mezcal. Ideas sobre su mejoramiento y técnicas de control. Sin publicación, sólo de distribución regional.
- REYES A., J. 1987. Evaluación de plantaciones de magüey mezcalero (*Agave salmiana crassispina*) en el municipio de Pinos, Zacatecas. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciencias Biológicas. Morelia, Michoacán.
- SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS. 1984. Normas técnicas para incrementar la productividad de fibra del henequén. Centro de Investigaciones de la Península de Yucatán. (INIA).
- TURRENT F., A. 1985. El método gráfico-estadístico para la interpretación económica de experimentos conducidos con la matriz Plan Puebla I. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- VALENZUELA Z., A.G. 1985. The tequila industry in Jalisco, México. Desert Plants. 7(2): 65-70.
- VALENZUELA Z., A.G. 1994. El agave tequilero: su cultivo e industrialización. Monsanto. De. Agatha. Guadalajara, Jalisco.
- VALENZUELA, B. R. 1990. Uso de fertilizantes en el mezcal tequilero (*Agave tequilana* Weber) para el estado de Jalisco. Taller de Muestreo Estadístico. Curso de Maestría: Manejo de Areas de Temporal. Universidad de Guadalajara. Facultad de Agronomía.

FERTILIZACION FOSFATADA EN DOS GRAMINEAS FORRAJERAS DE LAS SABANAS DE HUIMANGUILLO, TABASCO, MEXICO

Phosphorus Fertilization in Two Gramineae Forage Crops from Huimanguillo, Tabasco, Mexico

Camerino Guzmán Estrada y Fidencio Puente Flores

CESSI, CIRNO, INIFAP, SARH, México

Palabras clave: Forraje, Gramíneas, Sabanas, Trópico húmedo, Luvisol, Fertilización, Fuente de fósforo.

Index words: Forage, Gramineae, Savanna, Humid tropic, Luvisols, Fertilization, Sources of phosphorus.

RESUMEN

Praderas de estrella Africana común (*Cynodon plectostachyus* Pilger) y de Pangola (*Digitaria decumbens* Stent), en condiciones de temporal y explotadas comercialmente, fueron fertilizadas con nitrógeno, fósforo y potasio para evaluar en forma comparativa el efecto en la producción de forraje seco, de dos fuentes de fósforo aplicadas al suelo. Se observó que los rendimientos del pasto estrella fueron del doble al triple de los obtenidos en pasto pangola con los mismos tratamientos de fertilización. El *Cynodon* requirió de 120 kg de N ha⁻¹, 200 kg de P₂O₅ ha⁻¹ como roca fósforica calcinada ó 160 kg de P₂O₅ como superfosfato triple

de calcio, mientras que en el pasto *Digitaria* el requerimiento fue de 120 kg de N ha⁻¹, 400 kg de P₂O₅ ha⁻¹ como roca fosfórica y 160 kg de P₂O₅ ha⁻¹ como superfosfato. Finalmente, el *Cynodon* no respondió en rendimiento de forraje seco a la aplicación de K, debido al alto nivel de K asimilable en el suelo, en cambio el pangola establecido en un suelo de condiciones bastante similares, excepto el nivel de K asimilable, el cual era medianamente bajo, sí respondió marcadamente a la aplicación de 60 kg de K₂O por hectárea.

SUMMARY

A grassland of common african star pasture and another of pangola, under rainfed conditions and commercial exploitation, were fertilized with nitrogen, phosphorus and potassium, in order to comparatively evaluate two sources of phosphorus applied to the soil. It was observed that star pasture yielded twice and three times as much as the pangola pasture with the same fertilization treatment. *Cynodon* required 120 kg N ha⁻¹, 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ as calcined phosphate rock or 160 kg P₂O₅ ha⁻¹

Recibido 10-94.

as triple superphosphate, while *Digitaria* pasture requirement was 120 kg N ha⁻¹, 400 kg P₂O₅ ha⁻¹ as phosphate rock, and 160 kg P₂O₅ ha⁻¹ as superphosphate. Finally *Cynodon* responded in dry forage yield to K application in a soil with high level of available K, but pangola in similar soil conditions, (except for its available K level which was medium low), showed a high yield increment with the application of 60 kg of K₂O per hectare.

INTRODUCCION

El estado de Tabasco ocupa un lugar muy importante en la ganadería nacional, respaldado en parte por las 140 mil hectáreas de suelos ácidos de las sabanas de Huimanguillo, 29% de la superficie de este tipo de suelos en el estado, las cuales están ocupadas en su mayoría con pastizales nativos e introducidos, que presentan bajo rendimiento de forraje y pobre calidad del mismo cuando no se fertilizan adecuadamente. Los suelos de las sabanas de Huimanguillo se caracterizan por su extrema acidez, bajo contenido de nutrimentos, y en especial de fósforo asimilable, para los cultivos en general. La causa de los bajos niveles de P aprovechable es la alta capacidad de fijación de fósforo de estos suelos, asociada con el contenido y tipo de arcilla y con los óxidos de Fe y Al. Como consecuencia de lo anterior, el P es un factor que limita el establecimiento y producción de forraje de los pastos y se requieren dosis altas de P para obtener buenos rendimientos (Pastrana, 1985).

Para resolver el problema de P se recomienda el uso de fuentes de P con

efecto residual o de baja reactividad como la fosforita. En México se ha iniciado la explotación de algunos yacimientos de fosforita en Saltillo, Coah., Zimapán, Hgo. y península de Baja California. La fosforita de la última entidad es la más apropiada para aplicarse directamente al suelo, debido a su menor grado de cristalización (Adán, 1979), su alta reactividad (10.8 a 15.9% de solubilidad en citrato (Núñez, 1987)), experimentalmente ha mostrado una eficiencia relativa media de 60% en comparación con el superfosfato triple (Gavi *et al.*, 1988) y su precio equivalente es de 30% del correspondiente al superfosfato triple (Núñez y Gavi, 1991).

El uso de fosforita en la producción de pastos en los suelos ácidos de América del Sur, ha manifestado resultados atractivos por su eficiencia agronómica y valor económico (North Carolina State University, 1975). En México se ha evaluado la respuesta de pastos, maíz y yuca, entre otros, a la aplicación directa al suelo de fosforita y los resultados indican que al principio la fosforita es menos eficiente que el superfosfato triple, pero con el tiempo puede llegar a igualar e incluso superar, a los superfosfatos (Pérez, 1986). Sin embargo, es necesario aplicar de dos a siete veces más P como fosforita para que muestre un abastecimiento de P similar al del superfosfato (Murdock y Seay, 1955). En nuestro país es una práctica poco usual aplicar fosforita directamente al suelo, a pesar de las amplias posibilidades que ofrecen los suelos ácidos de las regiones cálidas húmedas, cuya superficie es considerable (Guzmán *et al.*, 1980).

Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo fue evaluar el efecto en la producción de forraje seco, de dos fuentes de fósforo en presencia de nitrógeno y adicionalmente de potasio, en dos gramíneas forrajeras.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en una pradera comercial con estrella africana común y en otra con pangola de 18 meses de establecida, localizadas en las sabanas de Huimanguillo, Tabasco, a una altitud de 25 m, a 17°51' de latitud norte y 93° 24' de longitud oeste.

El clima es cálido-húmedo y, de acuerdo con las modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (García, 1973), es Am(f)w"(i')g, con lluvias durante el verano y precipitación total anual de 2290 mm; los meses donde se registra la menor precipitación son marzo, abril y mayo. La temperatura media anual es de 26.2 °C.

Los suelos de los dos sitios experimentales mostraron un perfil de Luvisol típico y característico de las sabanas, de color café oscuro en el horizonte superficial, medianamente profundos, relativamente permeables y situados en una fisiografía ligerament ondulada con pendiente suave de 1 a 8%. Los primeros horizontes son de textura migajón arcillo-arenosa y los más profundos son de textura arcillosa. Los suelos son extremadamente ácidos (pH de 4.8 a 5.1, relación 1:2 en H₂O), con contenido alto de materia orgánica (2.5 a 3.4%) y nitrógeno total (0.13 a 0.18%) y extremadamente pobres en

fósforo asimilable (2 a 3 ppm, Bray P-1). En el lote experimental con estrella africana común, el suelo mostró un alto nivel de potasio asimilable (112 ppm, Peech-Morgan); en contraste con lo anterior, el suelo en el lote de pangola se caracterizó por contener un nivel medianamente bajo de potasio (67 ppm, Peech-Morgan). Ambos sitios presentaron niveles bajos de calcio (193 ppm, Peech-Morgan) y magnesio (14 ppm, Peech-Morgan). Se consideraron los valores generados por Moreno (1978) para clasificar el nivel de abastecimiento nutricional del suelo bajo estudio.

Las condiciones del clima y suelo antes descritas son favorables a la obtención de respuesta a la aplicación de roca fosfórica finamente molida como fuente de fósforo, especialmente en cultivos perennes como los pastos.

Los niveles y fuentes de fertilizante estudiados fueron: 0, 60, 120 y 180 kg de N ha⁻¹ como urea; 0, 200, 400 y 600 kg de P₂O₅ ha⁻¹ como roca fosfórica calcinada de San Luis Potosí (se usó esta roca debido a que únicamente se disponía de este yacimiento y se desconocía que hubiese sido calcinada), con 27% de P₂O₅ total y 2.6% de P₂O₅ soluble en citrato de amonio a 2%; 0, 80, 160 y 240 kg de P₂O₅ ha⁻¹ como superfosfato triple de calcio; 60 kg de K₂O ha⁻¹ como cloruro de potasio. El fertilizante se aplicó al voleo, en la primera se aplicó el 33% de N, 100% de P₂O₅ y 100% de K₂O, en la segunda y tercera se aplicó el 33% de N correspondiente, estas últimas separadas por un intervalo de 90 días respecto a la anterior aplicación.

El diseño experimental fue en bloques al azar con cuatro repeticiones; se evaluaron los pastos estrella africana común y pangola, en parcelas totales de 5 x 5 m y parcelas útiles de 4 x 4 m. El diseño de tratamiento fue un cuadrado simple de 2 x 2 con aristas prolongadas. En cada gramínea se realizó un acomodo de tratamientos para cada fuente de fósforo en presencia de nitrógeno. Se consideró un tratamiento adicional con potasio lo que generó nueve tratamientos por acomodo.

Los cortes de evaluación en ambas gramíneas se efectuaron en promedio cada dos meses; sin embargo, fue variable en cada pasto, ya que dependió de la recuperación del pasto durante las épocas del año. El efecto de los tratamientos se evaluó con base en el rendimiento de materia o forraje seco; estos resultados se sometieron a un análisis de varianza y separación de rendimientos acumulados obtenidos con los tratamientos, a través de la prueba de la diferencia significativa honesta (DSH) con 5% de probabilidad (Steel y Torrie, 1980). Este procedimiento se realizó en cada gramínea, cada acomodo de tratamientos con la fuente de fósforo correspondiente y con ambas fuentes de fósforo. Los cortes de cada pasto se consideraron como repeticiones para efectuar el ANDEVA, siete en *Cynodon* y cuatro en *Digitaria*, y con la producción acumulada de forraje seco se procedió a la separación de tratamientos.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados se presentarán y discutirán con base en el rendimiento de

materia vegetal o forraje seco acumulado de siete cortes en pasto estrella africana común y de cuatro cortes en pasto pangola.

En los Cuadros 1 y 2 se presentan los rendimientos acumulados unitarios de materia seca obtenidos en los pastos estrella africana común y pangola, fertilizados con roca fosfórica calcinada y superfosfato de calcio triple como fuentes de fósforo. Al aplicar los tratamientos descritos, someter los resultados al análisis de varianza para determinar la desviación de los datos respecto al acumulado y aplicar la prueba de selección de tratamientos o técnica de comparaciones múltiples DSH a 5% de probabilidad, se observó una diferencia altamente significativa entre tratamientos con la misma fuente de P y entre fuentes de fósforo. El coeficiente de variación o dispersión relativa del conjunto de datos en ambas gramíneas forrajeras fue de 11.0 a 21.9%. Los valores de r o coeficiente de determinación variaron de 0.84 a 0.94, lo que indica que las variables independientes o nutrimentos aplicados en diferentes dosis, contribuyeron significativamente en la diferencia de los rendimientos de forraje seco en ambos pastos.

Efecto de fuentes y niveles de fósforo en *Cynodon*

Los datos del Cuadro 1 indican que el pasto estrella africana común, al fertilizarse con fosforita, presentó rendimientos de 10.6 a 18.2 toneladas de forraje seco por hectárea. Al comparar los niveles de P_2O_5 y usar como fuente a la fosforita, se observó que las dosis de 0, 200 y 400 kg de P_2O_5 ha⁻¹ en presencia de 60 kg de N ha⁻¹, fueron estadísticamente iguales; los testigos

relativos a P (60-0-0) y N (0-200-0) registraron rendimientos de 12 t ha⁻¹ de forraje seco, respectivamente, mientras que al combinar al N y P (60-200-0), se manifestó un decremento de 1.4 t ha⁻¹, debido a que el P aplicado posiblemente fue fijado y precipitado en el suelo, y en parte lixiviado. Se manifestó un ligero incremento (a 13.5 t ha⁻¹) al aplicar el tratamiento 60-400-0, es decir 200 kg ha⁻¹ más de P₂O₅ respecto al 60-200-0, que explica una posible saturación y disponibilidad de P en el suelo. Al comparar las dosis de 200, 400 y 600 kg⁻¹ de P₂O₅, en presencia de 120 kg ha⁻¹ de N, resultaron ser estadísticamente iguales; incluso se observó que al aumentar las dosis de 200 y de 400 a 600 kg ha⁻¹ de P₂O₅ se manifestó un decremento de 3.2 y 3.8 t ha⁻¹ de forraje seco, respectivamente. Por lo tanto, no hubo respuesta a la aplicación de fósforo y la diferencia estadística se debió al efecto del nitrógeno, ya que al comparar a los niveles de 60 y 120 kg ha⁻¹ de N, este último fue estadísticamente diferente y superior en rendimiento. El nivel de 60 kg ha⁻¹ de N, en presencia de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅, registró 10.6 t ha⁻¹ de forraje seco, mientras que en el tratamiento 120-200-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O el rendimiento fue de 18.2 t ha⁻¹, con una diferencia significativa positiva de 7.6 t ha⁻¹ de forraje, lo que representa 41.7% de incremento en el rendimiento.

Por otra parte, al analizar el efecto de 60 kg ha⁻¹ de K₂O en presencia de 120 y 400 kg ha⁻¹ de N y P₂O₅, este último en forma de fosforita, se observó un efecto

del K ligeramente depresivo, pero no significativo, debido a que el tratamiento adicional de 120-400-60 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O presentó un rendimiento de 14.3 t ha⁻¹ de forraje seco, mientras que en el tratamiento comparativo de 120-400-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O el rendimiento fue de 15 t ha⁻¹ de forraje seco, esto significó una diferencia positiva 0.7 t ha⁻¹ de forraje como efecto de no aplicar potasio. El pasto estrella africana común, fertilizado con superfosfato triple de calcio, registró rendimientos acumulados de 12.1 a 19.7 toneladas de forraje seco por hectárea. Al comparar los niveles de P₂O₅ y usar como fuente al superfosfato (Cuadro 1), los tratamientos en ausencia (60-0-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O) y en presencia de P (0-80-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O) fueron estadísticamente iguales al presentar rendimientos de 13.2 y 12.1 t ha⁻¹ de forraje seco, respectivamente, y se incrementaron a 15.8 t ha⁻¹ al aplicar 60-80-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O; por lo tanto, se manifestó una diferencia significativa de 3.7 t ha⁻¹ de forraje por efecto de la mezcla de ambos nutrientes y como tal, dicho incremento significativo se atribuye al efecto del N. La falta de efecto del P se confirmó al comparar los niveles de 80 y 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en presencia de 60 kg ha⁻¹ de N, los cuales con 15.8 y 16.3 t ha⁻¹ de forraje fueron estadísticamente iguales. Al comparar las dosis de 80, 160 y 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en presencia de 120 kg ha⁻¹ de N, se observó que fueron estadísticamente iguales, con 17.2, 19.7 y 18.2 t ha⁻¹ de forraje seco, respectivamente lo que reafirma la falta de efecto positivo del P como superfosfato.

Cuadro 1. Rendimiento acumulado de materia seca de *Cynodon plectostachyus* fertilizado con fosforita y superfosfato en las sabanas de Huimanguillo, Tabasco, México

Roca fosfórica calcinada			Ambas fuentes de P ¹⁾		Superfosfato triple de calcio			Ambas fuentes de P ¹⁾	
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Materia seca		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Materia seca	
	kg ha ⁻¹		t ha ⁻¹			kg ha ⁻¹		t ha ⁻¹	
60	0	0	11.6 bc	efg	60	0	0	13.2 de	defg
0	200	0	12.0 bc	fg	0	80	0	12.1 e	efg
60	200	0	10.6 c	g	60	80	0	15.8 cd	abcdef
60	400	0	13.5 bc	defg	60	160	0	16.3 bcd	abcde
120	200	0	18.2a	abc	120	80	0	17.2abc	abcd
120	400	0	15.0ab	bcdef	120	160	0	19.7a	a
120	600	0	14.4abc	cdefg	120	240	0	18.2abc	abc
180	400	0	14.9ab	bcdef	180	160	0	18.9abc	ab
120	400	60	14.3abc	cdefg	120	160	60	19.1ab	ab
C.V. (%)			17.0	14.6				11.0	
Valor de F			8.4**	17.9**				25.4**	
r			0.84	0.89				0.94	
Rend. medio			13.9	15.3				16.7	
DSH 5%			4.1	4.3				3.2	

*Cifras con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey 5%).

1) Separación de rendimientos acumulados al considerar ambas fuentes de fósforo.

En el rendimiento acumulado de forraje seco por efecto del N, al aplicar 60 y 120 kg ha⁻¹ de N en presencia de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ como superfosfato se obtuvieron 15.8 y 17.2 t ha⁻¹ de forraje, con un incremento no significativo de 1.4 t ha⁻¹ de forraje como respuesta al aumento sucesivo de 60 kg ha⁻¹ de N; mientras que al aplicar 60 y 120 kg ha⁻¹ de N en presencia de 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅, se produjeron 16.3 y 19.7 t ha⁻¹ de forraje seco, manifestándose un incremento significativo de 3.7 t ha⁻¹ de forraje al aumentar la dosis de 60 a 120 kg ha⁻¹ de N. Al analizar el aumento de 120 a 180 kg ha⁻¹ de N con 19.7 y 18.9 t ha⁻¹ de forraje, respectivamente, se observa que tal diferencia de N causó un decremento de 0.8 t ha⁻¹ de forraje.

Por otro lado, la aplicación de 60 kg ha⁻¹ de K₂O en presencia de superfosfato como fuente de P₂O₅, manifestó una respuesta semejante a la que se encontró cuando el K se mezcló con fosforita como fuente de P. Al aplicar 60 kg ha⁻¹ de K₂O en presencia de 120 y 160 kg ha⁻¹ de N y P₂O₅, se obtuvo un rendimiento de 19.1 t ha⁻¹ de forraje seco, mientras que con el mismo tratamiento en ausencia de K se produjeron 19.7 t ha⁻¹ de forraje, con un decremento de 0.6 t ha⁻¹ de forraje ocasionado, posiblemente, por una mayor absorción de K y de P que antagonizaron con el N.

De la información del Cuadro 1 sobresale el hecho de que al aplicar fosforita, el rendimiento fisiológico (18.2 t

ha⁻¹) se obtuvo con 120-200-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O; mientras que al aplicar superfosfato, el rendimiento fisiológico (19.7 t ha⁻¹) se registró con 120-160-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O. Lo anterior establece una diferencia no significativa en rendimiento, entre ambas fuentes de P, de 1.5 t ha⁻¹ de forraje seco y por lo tanto, la relación es de 1:1.25 kilogramos de P₂O₅ como superfosfato de calcio triple y roca fosfórica calcinada respectivamente; esto significa que cada kilogramo de P₂O₅ como fosforita y superfosfato produjo 91 y 123 kg de forraje seco, respectivamente. En la medida que aumentó la dosis de 200 hasta 600 kg ha⁻¹ de P₂O₅ como fosforita, en presencia de 120 kg ha⁻¹ de N, se manifestó un efecto depresivo o antagónico entre ambos nutrimentos, lo cual no se presentó con el superfosfato. La aplicación de K causó un efecto depresivo de 0.7 y 0.6 t ha⁻¹ de forraje seco en presencia de fosforita y superfosfato, respectivamente, debido al alto nivel de potasio asimilable presente en el suelo. Asimismo, el pasto *Cynodon* no respondió a la aplicación de fosforita y superfosfato como fuentes de P, a pesar de que el suelo fue extremadamente pobre en este nutrimento, debido a una posible fijación, precipitación y lixiviación del P en el suelo; por el contrario, la respuesta al N fue muy clara y eso que el suelo era rico en N total, esto explica porque este nutrimento posiblemente estaba mineralizado en la materia orgánica y en parte fijado en forma de NH₄⁺ en el suelo.

Efecto de fuentes y niveles de fósforo en *Digitaria*

En el Cuadro 2 se observa que el pasto pangola fertilizado con roca fosfórica, mostró rendimientos acumulados de 4.5 a 7.3 toneladas de forraje seco por hectárea. Al usarse la fosforita como fuente de P₂O₅, se observó que la adición al suelo de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ causó un aumento de 0.9 t ha⁻¹ en el rendimiento de forraje respecto a la aplicación de 60 kg ha⁻¹ de N; pero no así con incrementos sucesivos de 200 hasta 600 kg ha⁻¹ de P₂O₅, en presencia de 60 y 120 kg ha⁻¹ de N, con los cuales se lograron aumentos de 0.1 a 0.7 t ha⁻¹ de forraje, respectivamente. Los resultados indican que la respuesta del P se mejora al mezclarse con N; sin embargo, en la medida que aumentó la dosis de P se manifestó una pequeña disminución en el rendimiento de forraje seco, debido a un posible consumo de lujo de P o efecto antagónico entre el P y N, como indica el aumento de 60 a 120 kg ha⁻¹ de N en presencia de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅, con los cuales el rendimiento disminuyó de 6.0 a 5.8 t ha⁻¹ de forraje.

Los rendimientos acumulados de forraje seco no se incrementaron substancialmente y menos significativamente con la aplicación de N. Se observó que al aplicar 60, 120 ó 180 kg ha⁻¹ de N en presencia de 200 ó 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅ como fosforita, se manifestaron aumentos de 0.1 y 0.5, incluso un decremento de 0.2 t ha⁻¹ en el rendimiento de forraje. Por lo tanto, la aplicación de N no causó un efecto significativo, pero es necesaria para hacer

eficiente la aplicación del P sobre el rendimiento fisiológico de forraje; lo cual se explica al aplicar 60 kg ha⁻¹ de N que produjeron 4.5 t ha⁻¹ de forraje, con 200 kg

ha⁻¹ de P₂O₅ el rendimiento fue de 5.4 t ha⁻¹ de forraje y al mezclar a dichas dosis de N y P₂O₅, el rendimiento aumentó a 6 t ha⁻¹ de forraje seco.

Cuadro 2. Rendimiento acumulado de materia seca de *Digitaria decumbens* fertilizado con fosforita y superfosfato en las sabanas de Huimanguillo, Tabasco, México.

Roca fosfórica calcinada			Ambas		Superfosfato triple de calcio			Ambas			
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	fuentes de P		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Materia	fuentes de		
Materia			seca		Materia			seca			
kg ha ⁻¹			t ha ⁻¹		kg ha ⁻¹			t ha ⁻¹			
60	0	0	4.5	b	c	60	0	0	5.2	b	bc
0	200	0	5.4	ab	bc	0	80	0	5.6	ab	bc
60	200	0	6.0	ab	abc	60	80	0	7.7	ab	abc
60	400	0	6.4	ab	abc	60	160	0	6.8	ab	abc
120	200	0	5.8	ab	bc	120	80	0	7.6	ab	abc
120	400	0	6.6	ab	abc	120	160	0	7.3	ab	abc
120	600	0	6.6	ab	abc	120	240	0	7.7	ab	abc
180	400	0	7.0	a	abc	180	160	0	8.7	ab	ab
120	400	60	7.3	a	abc	120	160	60	9.5	a	a
C.V. (%)			16.1		20.6				21.9		
Valor de F			19.5**		13.8**				10.8**		
r			0.95		0.92				0.91		
Rend. medio			6.1		6.8				7.4		
DSH 5%			2.4		3.6				3.9		

(Cifras con la misma letra en cada columna, son estadísticamente iguales (Tukey 5%).

1) Separación de rendimientos acumulados al considerar a ambas fuentes de fósforo.

Por otra parte, el rendimiento acumulado de forraje seco se incrementó de manera substancial, más no significativamente, con la aplicación al suelo de fertilizante potásico. Se observó que con el tratamiento adicional de K, 120-400-60 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, se obtuvieron 7.3 t ha⁻¹ de forraje seco, mientras que con el mismo tratamiento pero sin los 60 kg ha⁻¹ de K₂O, el rendimiento fue de 6.5 t ha⁻¹ de forraje.

En el Cuadro 2 se observa que los rendimientos acumulados de forraje seco de

pangola fertilizado con superfosfato de calcio triple fueron de 5.2 a 9.5 toneladas por hectárea. Los datos indican que se presentó una respuesta significativa a la aplicación de P en forma de superfosfato. Al fertilizar con 60 kg ha⁻¹ de N, el rendimiento de forraje fue de 5.2 t ha⁻¹, mientras que al mezclar dicha dosis de N con 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, el rendimiento aumentó a 8.0 t ha⁻¹; tal diferencia positiva de 2.8 t ha⁻¹ de forraje seco se debió al efecto del P. Sin embargo, el aumento de 80 a 160, e incluso a 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en presencia de 60 y 120 kg ha⁻¹ de N, causó

decrementos en el rendimiento de 0.3 a 0.4 t ha⁻¹ de forraje, debido posiblemente al consumo de lujo o efecto tóxico del P.

En cuanto a la respuesta del N, se observó que al aplicar 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ como superfosfato, el rendimiento fue de 5.6 t ha⁻¹ de forraje seco y al mezclar dicha dosis con 60 kg ha⁻¹ de N, el rendimiento aumentó a 8.0 t ha⁻¹ de forraje y como tal, dicha diferencia de 2.4 t ha⁻¹ de N en presencia de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅; el rendimiento disminuyó de 8.0 a 7.6 t ha⁻¹ de forraje; pero no así al aplicar los mismos niveles de N, pero en presencia de 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅, ya que en este caso el rendimiento aumentó de 6.8 a 7.3 t ha⁻¹ de forraje. La respuesta a la aplicación de N se manifestó mucho mejor al aumentar de 120 a 180 kg ha⁻¹ de N en presencia de 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅, al pasar de 7.3 a 8.3 t ha⁻¹ de forraje; debido a que quizás la mayor dosis de N tuvo mayor capacidad de satisfacer la demanda mineralógica y al proceso de pérdidas por desnitrificación y lixiviación, entre otros.

En lo que corresponde a la aplicación adicional de fertilizante potásico, se observó que al aplicar 60 kg ha⁻¹ de K₂O en presencia de 120 y 160 kg ha⁻¹ de N y P₂O₅, este último en forma de superfosfato, se obtuvo un rendimiento acumulado de 9.5 t ha⁻¹ de forraje seco; mientras que con el mismo tratamiento de N y P, pero sin K, el rendimiento fue de 7.3 t ha⁻¹ de forraje seco. Por lo tanto, dicho incremento de 2.2 t ha⁻¹ de forraje se debió a la clara respuesta del fertilizante potásico aplicado y el nivel mediano de K asimilable en el suelo.

De la información del Cuadro 2 destaca que el pasto pangola fertilizado con

fosforita, manifestó un rendimiento fisiológico de 7.3 t ha⁻¹ de forraje seco al aplicar 120-400-60 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, mientras que al fertilizar con superfosfato, el rendimiento fisiológico (9.5 t ha⁻¹) de forraje se obtuvo con 120-160-16 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-H₂O, lo cual significa que cada kg de P₂O₅ como fosforita y superfosfato produjo 18 y 59 kg de forraje, respectivamente; por lo tanto, la relación es de 1:2.5 kilogramos de P₂O₅ en forma de superfosfato y fosforita. Al considerar conjuntamente a dichas fuentes de P (Cuadro 2) se observa que el rendimiento fisiológico (9.5 t ha⁻¹) de forraje seco se obtuvo al aplicar 120-160-60 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O y cuya fuente de P fue el superfosfato, lo que manifestó una diferencia no significativa de 2.2 t ha⁻¹ de forraje seco respecto al rendimiento fisiológico (7.3 t ha⁻¹) obtenido al fertilizar con fosforita. En la medida que aumentó la dosis de 80 a 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ como superfosfato en presencia de menor o mayor dosis de N, se manifestó un efecto depresivo en el rendimiento de forraje, lo cual no se presentó con la fosforita. La aplicación de K manifestó una clara respuesta positiva sobre el rendimiento de forraje, debido a nivel medianamente bajo de K asimilable en el suelo; pero tal respuesta fue en mayor grado en presencia de superfosfato.

De los resultados mostrados en los Cuadros 1 y 2 del rendimiento acumulado de forraje seco de *Cynodon* y *Digitaria* obtenido con la aplicación de diferentes cantidades de fósforo en forma de fosforita y superfosfato en presencia de diferentes dosis de N y un nivel adicional de K₂O, sobresale que los rendimientos del pasto *Cynodon* son casi del doble al triple de los respectivos rendimientos obtenidos con el pasto *Digitaria*, con los mismos

tratamientos de fertilización, debido al diferencial productivo entre ambas especies, ya que el *Cynodon* produce alrededor de 14 t ha⁻¹ de forraje seco y el *Digitaria* 8 t ha⁻¹ de forraje seco, en condiciones de suelo y clima similares a las de la zona donde se realizó el estudio; además el pasto pangola requiere de suelos más fértiles con respecto al *Cynodon*. El rendimiento acumulado medio de forraje seco de *Cynodon* fertilizado con fosforita fue de 1.9 t ha⁻¹ y con superfosfato fue de 16.7 t ha⁻¹; mientras que en *Digitaria* fertilizado con fosforita, el rendimiento fue de 16.7 t ha⁻¹, mientras que en *Digitaria* fertilizado con fosforita, el rendimiento fue de 6.1 t ha⁻¹ y con superfosfato fue de 7.4 t ha⁻¹. Por lo tanto, al fertilizar con superfosfato se obtuvieron 2.8 y 1.3 t ha⁻¹ de forraje más con respecto al obtenido con fosforita. Esta diferencia en el primer año de evaluación posiblemente se debe a que la fosforita se calcinó y tal proceso estructura de intercambio entre el carbonato y el fosfato, lo cual conllevó una disminución en la reactividad y liberación de P; cuyo proceso de calcinación y uso de dicha fosforita es justificable en la alimentación de ganado. Además, debe considerarse que el superfosfato es una fuente de P altamente soluble y como tal fue más eficiente; sin embargo y a pesar de la calcinación de la fosforita, esta respondió en el límite inferior necesario (dos a siete veces más) de P como fosforita respecto al superfosfato, indicado por Murdock y Seay (1955). Asimismo, destaca que el *Cynodon* no respondió en desarrollo vegetativo y rendimiento de materia seca a la aplicación de K, debido al alto nivel de K asimilable presente en el suelo; mientras que el pasto pangola establecido en un suelo de condiciones físicas y químicas bastante

similares, según los resultados analíticos, excepto en el aspecto del nivel de potasio asimilable, el cual era medianamente bajo, aun cuando estaba ubicado a escasos 700 metros del sitio con pasto *Cynodon*, si respondió marcadamente a la aplicación de fertilizante potásico; lo cual refleja la distribución heterogénea que presentan los suelos con respecto a este nutrimento. En ambos pastos se manifestó respuesta a la aplicación de fertilizante nitrogenado, a pesar de que el suelo era rico en materia orgánica y N total; lo cual posiblemente se debió a que el N total del suelo, considerando su dinámica, participó activamente en los procesos de mineralización, lixiviación y desnitrificación. Finalmente, los mayores rendimientos acumulados de forraje seco de *Cynodon*, obtenidos al fertilizar con fosforita y superfosfato, fueron 18.2 y 19.7 t ha⁻¹ con los tratamientos 120-200-0 y 120-160-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, respectivamente; mientras que en *Digitaria* fue de 7.3 t ha⁻¹ con 120-400-60 kg ha⁻¹ de N- P₂O₅-K₂O, usando fosforita, y de 9.5 t ha⁻¹ de forraje con 120-160-60 kg ha⁻¹ de N- P₂O₅-K₂O, usando superfosfato como fuente de P; se estableció una relación en *Cynodon* de 1:1.25 y en *Digitaria* de 1:2.25 kilogramos de P₂O₅ como superfosfato y fosforita, respectivamente.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se concluye que:

1. Los suelos donde se establecieron los pastos *Cynodon plectostachyus* y

Digitaria decumbens, eran diferentes en riqueza nutrimental, debido a la respuesta diferencial obtenida en los factores nutricionales N, P y K estudiados.

2. El pasto estrella africana común manifestó una fuerte respuesta a la aplicación de fertilizante nitrogenado, pero no así al fosfatado; en cambio, el pasto pangola presentó una clara respuesta a los fertilizantes nitrogenado y fosfatado.
3. El superfosfato triple de calcio (STC) superó ligeramente (en 1.5 t ha^{-1}) a la roca fosfórica calcinada (RFC) en cuanto a rendimiento fisiológico de forraje seco en *Cynodon*, aunque tal diferencia fue mayor (en 2.2 t ha^{-1}) en *Digitaria*.
4. El pasto *Cynodon* requirió de 0.25 veces más de P_2O_5 como RFC, para casi igualar al rendimiento fisiológico de materia seca obtenido al aplicar STC; mientras que en el pasto *Digitaria* fue de 1.25 veces más de P_2O_5 como RFC respecto al aplicado como STC.
5. El pasto estrella africana común no respondió en rendimiento de materia seca a la aplicación de fertilizante potásico, pero no así el pasto pangola que manifestó una fuerte respuesta, porque estaba en un suelo más pobre en potasio.

LITERATURA CITADA

- ADAN G., J.H. 1979. Caracterización química, mineralógica y evaluación agronómica de roca fosfórica de diferentes depósitos. Tesis de M.C. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- GARCIA, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- GAVI R., F., R. NUÑEZ E., J.D. ETCHEVERS B. Y A. MARTINEZ G. 1988. Incremento de la eficiencia agronómica de la roca fosfórica mediante su mezcla con estiércol, azufre, y/o fertilizantes químicos; Agrociencia Serie Agua-Suelo-Clima 1(2): 113-132.
- GUZMAN E., C., R. NUÑEZ E., y A. MARTINEZ G. 1980. Solubilización de dos rocas fosfóricas nacionales mediante mezclado con azufre, fertilizante nitrogenado y estiércol de bovino, bajo fermentación aeróbica y anaeróbica. Agrociencia 41: 145-162.
- MORENO D., R. 1978. Clasificación tentativa para suelos y aguas agrícolas. INIA, SARH. México.
- MURDOCK J., T., and W.A. SEAY. 1955. The availability to greenhouse crops of rock phosphate phosphorus and calcium in superphosphate rock phosphate mixtures. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19: 199-203.
- NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. 1975. Annual report. Agronomic-Economic Research on Tropical Soils. Soil Science Department. North Carolina State University. Raleigh, N.C., U.S.A.
- NUÑEZ E., R. 1987. Aplicación directa de roca fosfórica en suelos de México. In: Alternativas sobre el uso como fertilizantes de fosfatos nativos en América Tropical y Subtropical. CIID, IFDC, CIAT, Documento de trabajo 46: 73-98. Cali, Colombia.
- NUÑEZ E., R. Y GAVI R., F. 1991. Avances de las investigaciones sobre aplicación directa de roca fosfórica en México. Rev. Fac. Agron. 17: 197-216.
- PASTRANA A., L. 1985. Evaluación de roca fosfórica Baja California con pasto estrella de Africa (*Cynodon plectostachyus*) en un suelo Ultisol de la sabana de Huimanguillo, Tabasco. Tesis de M.C. Colegio Superior de Agricultura Tropical, H. Cárdenas, Tabasco, México.
- PEREZ H., N. 1986. Evaluación de roca fosfórica Baja California con pasto *Andropogon gayanus* Kunth en un suelo Ultisol de la sabana de Huimanguillo, Tabasco. Tesis de Licenciatura. Colegio Superior de Agricultura Tropical, H. Cárdenas, Tabasco, México.
- STEEL, R.G.D., and J.H. TORRIE. 1980. Principles and procedures of statistics. Second edition. Editorial McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo, Japan.

COMENTARIOS Y CARTAS AL EDITOR

Comentario sobre uso correcto de palabras

Deseo comentar en esta ocasión acerca del uso correcto de algunas palabras en los artículos científicos en español, particularmente de los llamados barbarismos.

Un error que comúnmente se comete al escribir un artículo científico, es el utilizar palabras que no significan exactamente lo que quiere expresarse. Entre las causas que generan esta situación están: desconocimiento del significado de algunos vocablos; uso incorrecto, de acuerdo con la función gramatical; o uso de palabras en forma castellanizada o no, de otros idiomas (barbarismos).

El problema con las palabras de origen extranjero tiene dos facetas; a) no existen en el español y presentan una forma "castellanizada" o b) existen en el español pero tienen un significado diferente. Algunas de estas palabras son: checar, buffer, tópico, stress, nutriente, reportar, etc.

Checar: esta palabra no existe en español, proviene del vocablo inglés "check" que significa examinar, en español debe utilizarse chequear, revisar, examinar.

Buffer: en inglés significa "cosa que reduce el efecto de algo". En español, por ejemplo, se recomienda emplear la palabra solución amortiguadora.

Reportar: este vocablo proviene del inglés (report = informar). Anteriormente existía en la lengua española, pero no con la acepción de informar; sin embargo, en la última edición del Diccionario de la Real

Academia Española (1992) ya se reconoce con este significado. No obstante, se aconseja no abusar en su empleo y utilizar palabras como informar, señalar, etc.

Nutriente: en español es el participio activo de nutrir; en inglés es adjetivo y sustantivo. Así, cuando se quiere manejar como sustantivo debe emplearse la palabra nutrimento, no nutriente.

Rango: uno de los significados de esta palabra es el que tiene en estadística, el cual es: "amplitud de la variación de un fenómeno entre un límite menor y uno mayor claramente especificados", en este sentido es lo mismo que "range" (en inglés). Sin embargo, se recomienda no abusar de esta palabra; opciones para sustituirla son las palabras intervalo, espacio, etc.

Tabla: existe controversia en cuanto al uso del término tabla, algunos aconsejan el vocablo cuadro; ambos términos existen en español y su significado es similar. En inglés, cuando se presenta un arreglo de datos (por ejemplo, resultados), se identifican con el término "Table X", tal vez por esta razón muchos se inclinan por el término "tabla", cuando se agrupan datos en un artículo científico. Cornejo y Henríquez (1984) señalan que se denomina como "cuadro" al arreglo de números, de palabras o de ambos, cuyo empleo no va más allá del análisis de un problema específico; por otra parte, "tabla" tiene una utilización más amplia, incluso perdurable en el tiempo, no restringida a mostrar un fenómeno aislado, por ejemplo: tabla de logaritmos; tablas estadísticas de z y t; tabla de números aleatorios, etc. De acuerdo con estas definiciones, es claro que la agrupación de datos que se hace en un artículo científico corresponde más a lo que es un cuadro.

Tópico: es común encontrar escritos científicos en los que se maneja la palabra tópico como sinónimo de tema, asunto, etc. Esta acepción corresponde a la palabra inglesa "topic"; en español, el significado de tópico es totalmente diferente; por esta razón es incorrecto usar "tópico" como sustituto de "tema".

Suplir: en un artículo científico se señala: "es importante suplir con N, P y K a las plantas", en esta oración se quiso decir: "es importante abastecer con...". En inglés, "supply" significa abastecer, sin embargo, en español "suplir" significa reemplazar.

Asumir: esta palabra se utiliza frecuentemente en sentido de suponer (en inglés, "assume" significa tomar como cierto algo, sin ninguna prueba); sin embargo, asumir significa: tomar para sí, responsabilizarse de algo, adquirir una forma mayor. Por tal razón, es incorrecto usar asumir en sentido de suponer.

Rol: en ocasiones se utiliza esta palabra como sinónimo de función, papel, etc. (en inglés, "role" significa función de una persona o cosa). Por ejemplo, en la oración: "El rol de la materia orgánica en la capacidad amortiguadora del suelo" es claro que lo que quiso decirse era: "El papel (la función) de...".

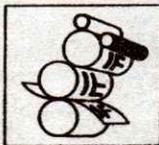
Standard: ya existe el vocablo castellanizado, el cual es estándar.

Stress: la Real Academia Española ya incorporó este vocablo, en forma castellanizada, al español (estrés).

BIBLIOGRAFIA

- CORNEJO P., R. Y R. HENRIQUEZ Q. 1984. Redacción y presentación de escritos científicos y técnicos. Serimpres Publicaciones, Santiago, Chile.
- HAWKINS, J.M. (compilador). 1994. The Oxford English minidictionary. Third edition. Clarendon Press, Oxford, England.
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. 1992. Diccionario de la lengua española. 21a. edición. Espasa-Calpe, Madrid, España.

Jorge Alvarado López



ESTE TRABAJO SE IMPRIMIO EN:
IMPRESIONES FUTURA
AV. JUAREZ No. 104
SAN VICENTE CHICOLAPAN,
EDO. DE MEXICO
TEL. (91-592) 1-58-24

DIVISION III

**COMENTARIOS
Y CARTAS
AL EDITOR**

Fertilización del agave tequilero (*Agave tequilana* Weber) en la región de Tequila, Jalisco, México.

**A.G. VALENZUELA Z. y
D.R. GONZALEZ E.**

81

Fertilización fosfatada en dos gramíneas forrajeras de las sabanas de Huimanguillo Tabasco, México.

**C. GUZMAN E. y
F. PUENTE F.**

96

Comentario sobre uso correcto de palabras.

107