

ISSN 0187-5779

TERRA

ENERO - MARZO DE 2002 • VOLUMEN 20 • NUMERO 1



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

TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2001-2002

Presidente	Dr. Francisco Gavi Reyes
Vicepresidente	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Secretario General	Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza
Tesorero	M. Sci. Jesús Gómez Díaz
Secretario Técnico	Dr. Rogelio A. Juárez González
Secretaria de Relaciones Internacionales	Dra. Norma García Calderón
Vocales	M.C. Carlos Tavarez Espinosa Ing. Andrés Espinosa Carmona Dr. Sergio A. Enríquez Reyes M.C. Romel de la Garza Dr. Diego González Eguarte

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

- a) Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos
- b) Física de Suelos
- c) Química de Suelos
- d) Contaminación

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

- a) Nutrición Vegetal
- b) Relación Agua - Suelo - Planta - Atmósfera
- c) Biología del Suelo
- d) Tecnología y Uso de Fertilizantes
- e) Uso y Manejo del Agua

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

- a) Conservación del Suelo
- b) Drenaje y Recuperación
- c) Fertilidad
- d) Productividad de Agrosistemas

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

TERRA registro en trámite.

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Enero - Marzo de 2002 Volumen 20 Número 1

ISSN 0187 - 5779

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta revista, citándola como fuente de información. Las contribuciones a esta revista deben enviarse, en original y dos copias, redactadas conforme a las Normas para Publicación en la Revista TERRA a:
Editor de la Revista TERRA, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México, México.

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

Teléfono: +01(595) 954 60 24 Fax: +01(595) 954 80 76
e-mail: smcs@taurus1.chapingo.mx

EDITOR EDITOR ADJUNTO EDITORES TÉCNICOS

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

EDITORES DE ESTILO

EDITORA DE ESTILO EN INGLÉS

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

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

Diseño de portada

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Jesús Caballero Mellado
Dr. Lenom J. Cajuste
Dr. Ronald Ferrera Cerrato
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Reggie J. Laird
Dr. Angel Martínez Garza
Dr. Roberto Núñez Escobar
Dr. Carlos Ortiz Solorio
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
Dr. Antonio Turrent Fernández
Dr. Jorge D. Etchevers Barra

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

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

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

President	Dr. Francisco Gavi Reyes
Vicepresident	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Secretary	Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza
Treasurer	M. Sci. Jesús D. Gómez Díaz
Technical Adviser	Dr. Rogelio A. Juárez González
International Relations	Dra. Norma García Calderón
Voters	M.C. Carlos Tavarez Espinosa Ing. Andrés Espinosa Carmona Dr. Sergio A. Enríquez Reyes M.C. Romel de la Garza Dr. Diego González Eguiarte

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
January - March, 2002 Volume 20 Num. 1

ISSN 0187 - 5779

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

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

Telephone: +52 (595) 954 60 24 Fax: +52 (595) 954 80 76
e-mail: smcs@taurus1.chapingo.mx

EDITOR ASSOCIATE EDITOR TECHNICAL EDITORS

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

STYLE EDITORS

ENGLISH EDITOR

EDITORIAL STAFF

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

Cover design

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Jesús Caballero Mellado
Dr. Lenom J. Cajuste
Dr. Ronald Ferrera Cerrato
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Reggie J. Laird
Dr. Angel Martínez Garza
Dr. Roberto Núñez Escobar
Dr. Carlos Ortiz Solorio
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
Dr. Antonio Turrent Fernández
Dr. Jorge D. Etchevers Barra

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

TERRA

ENERO - MARZO DE 2002 • VOLUMEN 20 • NUMERO I
JANUARY - MARCH, 2002 • VOLUME 20 • NUMBER I

DIVISION I

PRÓLOGO

- 1 Contribución de las técnicas nucleares al desarrollo de prácticas de manejo integrado del suelo, agua y nutrimentos para el incremento de la producción agrícola.
Contribution of nuclear techniques to the development of integrated soil, water and nutrient management practices for increasing agricultural production.
F. Zapata

- 7 Absorción de nitrógeno en trigo en relación con la disponibilidad hídrica.
Nitrogen uptake of wheat in relation to water availability.
Silvia López, Edgardo Guevara, Marisa Maturano, Mariana Melaj, Juan Pablo Bonetto, Santiago Meira, Olga Martín y Néstor Bárbaro

- 17 Eficiencia de abonos verdes (crotalaria y mucuna) y urea, aplicados solos o juntamente, como fuentes de N para el cultivo de arroz.
Efficiency of green manure (crotalaria and mucuna) and urea as nitrogen source for rice crop.
T. Muraoka, E. J. Ambrosano, F. Zapata, N. Bortoletto, A. L. M. Martins, P. C. O. Trivelin, A. E. Boaretto y W. B. Scivittaro

- 25 Dinâmica do enxofre (^{35}S) proveniente da mucuna-preta em um sistema solo-planta.
Fate of sulfur (^{35}S) from velvet bean green manure in a soil-plant system.
Walkyria Bueno Scivittaro, Takashi Muraoka e Antonio Enedi Boaretto

- 33 Efecto de las condiciones pluviométricas en trigo en sistemas de producción alternativos en un Ultisol de la IX Región, Chile.
Effects of pluviometric conditions in wheat within alternative cropping systems in an Ultisol, IX Region, Chile.
Inés Pino, Juan Luis Rouanet, Ana María Parada y Adriana Nario

- 39 Evaluación de la fijación simbiótica de nitrógeno de *Lupinus albus* y *L. angustifolius* en un Andisol Vilcun del sur de Chile. Evaluation of the symbiotic nitrogen fixation of *Lupinus albus* and *L. angustifolius* in a Vilcun Andisol of southern Chile.
Leticia Barrientos D., Adolfo Montenegro B. e Inés Pino N.
- 45 Reciclaje de nitrógeno en una sucesión frijol-maíz-frijol en suelo ferralítico usando el método isotópico. Nitrogen recycling in a common bean-maize-common bean sequence on a ferralitic soil by means of the isotopic method.
Graciela Dueñas, Olegario Muñiz, Tamara Sánchez, Luis Gómez y Hugo Alvarez
- 51 Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: Uso de las técnicas isotópicas (^{15}N). Nitrogen fertilizer management in Mexico: Use of isotopic techniques (^{15}N).
J. J. Peña Cabriales, O. A. Grageda-Cabrera y J. A. Vera Nuñez
- 57 Absorción de nitrógeno (^{15}N) por el cultivo de cebada en relación con la disponibilidad de agua en "El Bajío", Guanajuato, México. Nitrogen (^{15}N) uptake by barely in relation to water availability in "El Bajío", Guanajuato, Mexico.
J. A. Vera-Nuñez, O. A. Grageda-Cabrera, M. A. Vuelvas-Cisneros y J. J. Peña Cabriales
- 65 Absorción de nitrógeno (^{15}N) y productividad del agua por el cultivo de fresa (*Fragaria x ananasa*) en "El Bajío", México. Nitrogen (^{15}N) uptake and water productivity by strawberry (*Fragaria x amanasa*) in "El Bajío", Mexico.
J. Monroy, J. A. Vera-Nuñez, M. A. Carrera, O. A. Grageda Cabrera y J. J. Peña-Cabriales

- 71 Momento de aplicación de nitrógeno: Efecto en eficiencia de uso del fertilizante, rendimiento y concentración proteica en grano de cebada cervecera en Uruguay.
Effect of timing of nitrogen applicaton on fertilizer use efficiency, yield and grain protein concentration of malting barley in Uruguay.
O. Otegui, J. Zamalvide, C. Perdomo, R. Goyenola y A. Cerveñanasky
- 81 Actividades enzimáticas y contribución de residuos de cosecha de maíz al nitrógeno del suelo en sistemas de labranza, en los llanos centrales, Venezuela.
Enzymatic activities and contribution of corn residues to soil nitrogen under tillage practices in the central plains, Venezuela.
Migrelia España, Belkys Rodriguez, Evelyn Cabrera B. y Brunello Cecanti

PROLOGO

La gran diversidad y complejidad de los sistemas de producción agrícola en América Latina están determinadas no sólo por las enormes diferencias en sus ambientes físicos, como suelos, climas, vegetación, altura, etc., sino también por las diferencias culturales y socio-económicas de los pueblos en los países de la región. Esto significa un gran reto en la formulación de recomendaciones para la gestión adecuada de los recursos de suelo y agua, así como de los insumos externos a ser aplicados para incrementar la productividad agrícola para alimentar una población cada vez más creciente.

El Programa de Co-operación Técnica del Organismo Internacional de Energía Atómica dentro del marco del programa regional ARCAL (Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe), ejecutó el proyecto ARCAL XXII "Gestión de la Nutrición de Plantas, del Suelo y del Agua" durante el período 1996-2001. La presente publicación se refiere a algunos de los resultados generados en este proyecto, en el cual participaron grupos multi-disciplinarios de investigadores pertenecientes a instituciones de Argentina, Brasil, Chile, Cuba, Guatemala, México, Uruguay y Venezuela bajo la coordinación técnica y administrativa del Organismo Internacional de Energía Atómica.

El objetivo fundamental del proyecto fue "mejorar la productividad de las tierras cultivadas mediante la identificación y el desarrollo de prácticas adecuadas de manejo del suelo, agua y fuentes diversas de nutrimentos". Durante el desarrollo de las actividades de este proyecto, además de las técnicas convencionales, se emplearon técnicas nucleares e isotópicas, concretamente ^{15}N , ^{32}P y sonda de neutrones, que permitieron generar, en plazos relativamente cortos, información valiosa sobre el manejo adecuado, tanto desde el punto de vista agrícola como ambiental, del suelo, agua y nutrimentos en los diferentes sistemas de producción agrícola estudiados en los países participantes.

Los logros y resultados obtenidos en el proyecto fueron múltiples desde el reforzamiento de las capacidades nacionales para utilizar eficientemente las técnicas nucleares para generar nuevas tecnologías, el desarrollo de nuevos conocimientos y tecnologías hasta la transferencia de lo aprendido y obtenido a través de diferentes mecanismos de difusión, como parcelas demostrativas, videos y boletines técnicos. Cabe destacar que las experiencias adquiridas en este proyecto están siendo transmitidas a otros proyectos regionales del OIEA en Africa y Asia. Asimismo, los grupos de investigación de América Latina han formulado otro proyecto de continuación para controlar la degradación de las tierras en la región.

Hacemos votos para que la información aquí vertida sea de utilidad a los investigadores y técnicos especializados de América Latina y el Caribe preocupados por un mejor manejo de las tierras para aumentar la producción de alimentos bajo un marco de sostenibilidad.

Felipe Zapata

Oficial Técnico FAO/OIEA

In Memoriam

Este número está dedicado al Dr. Andrés Aguilar Santelises por su apoyo decidido al desarrollo de la Ciencia del Suelo en América Latina.

CONTRIBUCION DE LAS TECNICAS NUCLEARES AL DESARROLLO DE PRACTICAS DE MANEJO INTEGRADO DEL SUELO, AGUA Y NUTRIMENTOS PARA EL INCREMENTO DE LA PRODUCCION AGRICOLA

Contribution of Nuclear Techniques to the Development of Integrated Soil, Water and Nutrient Management Practices for Increasing Agricultural Production

F. Zapata¹

RESUMEN

El análisis a mediano plazo de los retos y necesidades de la agricultura en el mundo y regional indica que para incrementar la productividad agrícola en la mayoría de los países en vías de desarrollo será necesario, por un lado, una intensificación, diversificación y especialización de los sistemas de producción agrícola y, por el otro, el uso sostenible y la conservación de los recursos naturales. En respuesta a dichas necesidades, el Programa Conjunto FAO/OIEA, a través del sub-programa de manejo del suelo y del agua y de la nutrición de cultivos, promueve el desarrollo y la adopción de prácticas de manejo integrado de suelos, agua y nutrientes en sistemas de cultivo y zonas agro-ecológicas bien definidos, mediante el uso de las técnicas nucleares y conexas.

En América Latina, se ejecuta actualmente un proyecto de co-operación técnica del OIEA dentro del Programa Regional ARCAL (Acuerdo Regional Co-operativo para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe). El objetivo del presente es describir las principales características, actividades y logros obtenidos en el marco del proyecto, antes mencionado ARCAL XXII "La Gestión de la Nutrición de las Plantas, del Agua y del Suelo". Los resultados obtenidos en la red regional de ensayos de campo ilustran la aplicación de las técnicas nucleares en la generación de tecnologías sobre el uso integrado y eficiente del agua, fertilizantes y fuentes alternativas de nutrición en sistemas de cultivo y su aporte al incremento de la productividad agrícola. Una continuación lógica del proyecto en marcha sería la formulación de un nuevo proyecto sobre manejo sostenible de sistemas de

producción agrícola y conservación de los recursos de tierras en América Latina.

Palabras clave: Técnicas isotópicas, gestión integrada, fertilizantes, productividad, sostenibilidad.

SUMMARY

A medium-term forecast of the challenges and needs of agriculture at global and regional levels shows that to achieve significant increases in agricultural productivity in the developing countries not only intensification, diversification and specialization of agricultural production systems will be needed but also sustainable use and conservation of the natural resources. In response to this situation, the Joint FAO/IAEA Programme through its Soil and Water Management & Crop Nutrition sub-program, promotes the development and adoption of integrated soil, water and nutrient management practices in well-defined agro-ecosystems and cropping systems through the use of nuclear and related techniques.

In the Latin American region there is an operational IAEA Technical Co-operation Project carried out in the frame of the regional program ARCAL (Regional Co-operative Agreement for the Promotion of Nuclear Science and Technology in Latin America and the Caribbean). The main features, activities and outputs/achievements of the project ARCAL XXII "Plant Nutrition, Soil and Water Management" are described. The results obtained in the regional network of field trials illustrate the use of nuclear techniques to generate technologies of integrated and efficient use of water, fertilizers, and alternative nutrient sources and their contribution to increasing agricultural productivity. A logical continuation of the ongoing project will be the formulation of a new one on sustainable management of agricultural production systems and conservation of land resources in Latin America.

¹ Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). POB 100, Wagramerst. 5. A-1400 Viena, Austria. (F.Zapata@iaea.org)

Index words: Isotopic techniques, integrated management, fertilizers, productivity, sustainability.

INTRODUCCION

Situación Mundial y Regional

Considerando las proyecciones de crecimiento de la población mundial para los próximos 50 años y la disponibilidad global de tierras y aguas, varios países en vías de desarrollo deberán enfrentar un reto enorme para lograr la seguridad alimentaria de manera sostenible, debido a sus recursos limitados de tierras *per capita*, la escasez aguda de recursos hídricos y las condiciones socio-económicas específicas (Doos, 1994; Alexandratos, 1995).

Un incremento sostenible de la producción agrícola requerirá la utilización combinada de las siguientes estrategias: i) intensificación de la producción agrícola en las mejores tierras cultivables, ii) utilización racional de las tierras marginales y iii) control y restauración de las tierras degradadas (Lal, 2000). Para lograr una intensificación sostenible de los sistemas de producción agrícola que permita incrementos de productividad y generación de ganancias económicas, nuevas tecnologías de manejo de los suelos y cultivos deberán ser desarrolladas, probadas y transferidas en plazos de tiempo relativamente cortos. La agenda de investigación incluirá temas como la utilización de genotipos de plantas con mejor eficiencia de uso de nutrientes, así como adaptados a condiciones específicas de suelo y clima; el mejoramiento de la eficiencia de utilización de los fertilizantes y ciclaje de nutrientes, conservación del suelo y del agua, desarrollo de métodos mejorados de riego, captación y reciclaje de aguas, y muchos otros tópicos que deberán ser estudiados (Lal y Pierce, 1991; Biswas, 1994; FAO, 1995).

América Latina no escapa de las consideraciones descritas para la situación mundial, ya que nueve países están considerados como de bajas entradas económicas y deficitarios en alimentos, y una gran parte (55%) de las poblaciones rurales vive en condiciones de pobreza. En algunos países, la fuerte expansión de las exportaciones agrícolas ha creado una situación de conflicto con la producción y auto-abastecimiento de alimentos. Existe una preocupación creciente por la protección del medio ambiente así como la conservación de los productos cosechados (Alexandratos, 1995). En consecuencia,

ambos escenarios exigen, por un lado, una intensificación de la producción agrícola y, por el otro, una mayor demanda del uso sostenible y conservación de los recursos naturales.

Programa FAO/OIEA de Aplicaciones de las Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, con Referencia Especial al Subprograma de Manejo del Suelo y del Agua y la Nutrición de los Cultivos

En 1964, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) establecieron la División Conjunta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura con sede en Viena. Esta División ejecuta el Programa FAO/OIEA de Aplicaciones de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, cuya misión es ayudar a los países miembros de la FAO y del OIEA en la aplicación de las técnicas nucleares y biotecnologías conexas para la intensificación y diversificación de los sistemas de producción agrícola y el mejoramiento de la calidad y seguridad alimentarias, lo cual asegura un manejo eficiente y racional de los recursos naturales e insumos externos (IAEA, 1996).

Para cumplir con dicha misión, el programa cuenta con cinco sub-programas, cada uno con un objetivo bien definido, a saber, manejo del suelo y del agua y la nutrición de los cultivos, mejoramiento genético de plantas, salud y producción animal, y protección de los alimentos y del medio ambiente (IAEA, 1996).

El objetivo estratégico del subprograma de Manejo del Suelo y del Agua y de la Nutrición de los Cultivos es desarrollar, evaluar y promover la adopción de prácticas de manejo integrado del suelo, agua y nutrientes mediante el uso de técnicas nucleares y conexas en sistemas de cultivo y zonas agro-ecológicas bien definidas, a fin de permitir una intensificación de la producción agrícola y la conservación de los recursos naturales (Zapata y Chalk, 1999).

El principio fundamental del sub-programa de suelos para desarrollar estas prácticas de manejo integrado es el de atacar problemas de mayor relevancia sobre la fertilidad del suelo, que tengan incidencia en la producción agrícola sostenible. Hay que intensificar la producción de los cultivos pero al mismo tiempo conservar los recursos naturales.

A continuación se enumeran los problemas de mayor impacto que se han identificado. Uno o más problemas pueden presentarse simultáneamente en una situación dada:

- Escasez de agua para la agricultura (competencia por un recurso finito) y uso inadecuado del agua disponible.
- Deterioro de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (salinidad, eutroficación).
- Deficiencia generalizada de N en los suelos continuamente cultivados (bajo contenido de materia orgánica).
- Deficiencia y seria reducción de la materia orgánica del suelo (monocultivo, cultivo continuo de cereales, labranza intensa con maquinaria, remoción de los residuos de cosecha y estiércol, etc.).
- Deficiencia generalizada de P, especialmente en los suelos ácidos tropicales y subtropicales.
- Tasas aceleradas de degradación del suelo y de las tierras (erosión, acidificación, compactación, salinización y desertificación).

Las investigaciones se realizan en zonas agroecológicas y sistemas de cultivo bien definidos adoptando un enfoque integrado del manejo del suelo, agua y nutrientes para lograr incrementos sostenibles de la producción agrícola. Las técnicas nucleares aportan información cuantitativa y precisa sobre la dinámica de los nutrientes y del agua en un sistema particular. Esto permite definir de mejor manera los factores limitativos de la producción así como evaluar la eficiencia de las prácticas de manejo planteadas para aliviarlos y para poder así formular aquellas prácticas de manejo sostenible. Todo este proceso implica un manejo del sistema basado en el conocimiento de sus componentes.

De esta manera, se ha desarrollado el plan estratégico del subprograma a mediano plazo (1999-2005) en términos de problemas a atacarse, estrategias específicas a seguirse y técnicas nucleares a emplearse en zonas agroecológicas y sistemas de cultivo seleccionados (Zapata y Chalk, 1999).

El subprograma desarrolla y valida nuevas técnicas nucleares y conexas para generar tecnologías de manejo integrado del suelo, agua y nutrientes en sistemas de cultivo, a fin de lograr una intensificación sostenible de la producción agrícola en los países miembros. Esto se ejecuta mediante el Programa de Investigación bajo Contrato, promoviendo la formación de redes de investigación temática y de desarrollo, llamadas Proyectos Coordinados de Investigación. Por otro lado, mediante el Programa de

Co-operación Técnica, el OIEA asiste a los países miembros a establecer capacidades (físicas y humanas) para la aplicación de las tecnologías nucleares y conexas en el desarrollo agrícola sostenible. La asistencia se presta en la identificación, formulación y ejecución de proyectos nacionales, regionales e inter-regionales de cooperación técnica. Se trata de incrementar la eficiencia y el impacto de estas actividades mediante efectos sinérgicos relacionando ambos programas en un mismo país o en la misma subregión/región.

Dado que este número especial está dedicado a la presentación de los resultados obtenidos en la Red Regional de los Ensayos de Campo, realizados en el marco del proyecto ARCAL XXII, el propósito del presente trabajo es describir brevemente el marco general de este proyecto regional de Co-operación Técnica del OIEA, que se ha ejecutado durante el período 1996-2000 en la región de América Latina.

Proyecto de Co-operación Técnica ARCAL XXII "La Gestión de la Nutrición de las Plantas, del Agua y del Suelo"

Programa ARCAL

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) es responsable, dentro de la Organización de las Naciones Unidas, de promover la utilización de la energía nuclear con fines pacíficos en el marco de los esfuerzos nacionales y regionales de sus estados miembros para favorecer un desarrollo económico y social sostenible.

En la región de América Latina y el Caribe, las tecnologías nucleares se aplican ya en numerosas esferas y han ayudado a mejorar la calidad de vida de los habitantes de la región en diversos ámbitos. En los últimos años, los proyectos regionales de cooperación técnica, promovidos por el OIEA, han adquirido considerable importancia en la Región; en particular, en aquellas esferas de interés común como información nuclear, protección radiológica, salud humana, agricultura, hidrología, industria y mantenimiento y reparación de instrumentos nucleares utilizados con fines de investigación y estudios conexos. Debido a ello, un grupo de 10 países de América Latina (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela) decidió sumar esfuerzos con el objetivo de ejecutar proyectos de cooperación técnica específicos en que las aplicaciones nucleares podrían alcanzar

niveles más altos en la región. Es así que bajo los auspicios del OIEA se decidió establecer, en 1984, un Programa de Co-operación Regional que se le denominó ARCAL, "Acuerdo Regional de Co-operación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe". Este Programa se concibió como un mecanismo para la promoción de la cooperación técnica entre los países de la región en el uso pacífico de la energía nuclear, en particular de las aplicaciones nucleares, con el fin de resolver problemas tecnológicos comunes. En la actualidad un total de 19 países latinoamericanos y caribeños participan en las actividades del ARCAL. Estos países son: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana, Uruguay y Venezuela (ARCAL, 1998).

Proyecto ARCAL XXII

La gran diversidad y complejidad de los sistemas de producción agrícola en América Latina y el Caribe están determinadas por las grandes diferencias no sólo en sus ambientes físicos, como suelo, clima, topografía, latitud y altitud, sino también en las características culturales y condiciones socio-económicas de los países en la región. Esto determina un desafío enorme en el desarrollo de tecnologías y la formulación de recomendaciones para la utilización racional de los insumos externos y el manejo adecuado de los recursos naturales a fin de mejorar la productividad agrícola.

En vista de estas realidades, el OIEA decidió la planificación de un proyecto regional de cooperación técnica sobre esta temática. El perfil de este proyecto regional se elaboró en 1993 y sufrió una serie de modificaciones a través del tiempo. El documento final de proyecto se elaboró en 1996, dentro del marco del Programa ARCAL. El proyecto se diseñó para desarrollar tecnologías de manejo integrado de suelo, agua y nutrientes para incrementar la producción agrícola. Las técnicas nucleares (sonda de neutrones y técnicas isotópicas) son utilizadas para monitorear la humedad en el perfil del suelo y establecer balances de agua, así como para determinar el aporte de nutrientes de diversas fuentes inorgánicas y orgánicas y la eficiencia de recuperación de los fertilizantes aplicados.

Si bien, muchos países de la región mostraron interés en participar, sólo ocho países reunieron los

requisitos establecidos para participar; a saber, Argentina, Brasil, Chile, Cuba, Guatemala, México, Uruguay y Venezuela.

El proyecto comenzó a ejecutarse en el último trimestre de 1996 con los siguientes objetivos generales:

- a) Mejorar la productividad de las tierras cultivadas mediante la identificación y el desarrollo de prácticas adecuadas de manejo del suelo, agua y fuentes diversas de nutrientes.
- b) Identificar las técnicas nucleares apropiadas para mejorar la fertilidad y manejo del suelo. Asimismo, mejorar la calidad de los servicios analíticos prestados por los laboratorios de la región.
- c) Contribuir a la transferencia de tecnologías de probada eficiencia a los productores mediante los sistemas de extensión agrícola.

Los objetivos específicos y esenciales del proyecto son:

- i) Desarrollar estrategias para el uso integrado y eficiente de los fertilizantes químicos y fuentes alternativas de nutrientes con diferentes sistemas de cultivos.
- ii) Determinar las prácticas mejoradas de manejo del agua y del suelo, a fin de mantener la productividad de los recursos de la tierra y controlar la degradación de los suelos.

El proyecto se planificó para una duración de cinco años, comprendiendo además de parte del año 1996, dos fases principales: la primera a ser ejecutada en el bienio 1997-1998 y la segunda durante el bienio 1999-2000.

A fin de lograr los objetivos trazados para este proyecto, se han desarrollado las siguientes actividades fundamentales:

- 1) Establecimiento y desarrollo de una Red Regional de Ensayos de Campo a fin de generar tecnologías sobre el uso integrado y eficiente del agua, fertilizantes y fuentes alternativas de nutrición en sistemas de cultivo.
- 2) Organización de talleres regionales y cursos nacionales para los investigadores especialistas en el uso de las técnicas nucleares en estudios agronómicos. Además, mediante el otorgamiento de becas de capacitación individual principalmente en institutos de la región.
- 3) Preparación y publicación de manuales técnicos en los tópicos más relevantes vinculados al proyecto.
- 4) Diversas actividades de difusión y transferencia de las tecnologías y conocimientos adquiridos en el

sector agrícola para llegar a los agricultores y productores, que son los usuarios finales.

En la primera reunión de coordinación, llevada a cabo del 30 septiembre al 4 de octubre de 1996 en Irapuato, Guanajuato, México, se preparó el Plan de Actividades para la primera fase, o sea el bienio 1997-1998. Además, se analizaron los principales problemas de fertilidad del suelo y manejo del agua que afectan la producción agrícola en la región, así como el estado de la utilización de las técnicas nucleares en los estudios de las relaciones suelo/agua/planta en los países participantes. Se estableció una red regional de ensayos de campo para generar tecnologías de gran impacto en la producción agrícola.

Durante la segunda reunión de coordinación, efectuada en Santiago, Chile, del 23 al 27 de marzo de 1998, se evaluó la ejecución del Plan de Actividades y se preparó el nuevo Plan correspondiente a la segunda fase (1999-2000). Además, se recomendó concentrar los esfuerzos en la ejecución de los ensayos de campo y una mejor integración de los componentes en estudio en dichos ensayos de productividad y medio ambiente. También se recomendó ajustar algunos objetivos y metodologías específicas de los ensayos de campo, a fin de asegurar la obtención de los objetivos del proyecto.

La tercera reunión de coordinación se llevó a cabo del 20 al 24 de marzo del año 2000 en Oaxaca, México. Se ha evaluado el avance realizado hasta el momento en la ejecución del Plan de Actividades y la obtención de los objetivos del proyecto, se han identificado las principales limitaciones y recomendado las soluciones pertinentes. El Plan de Actividades para este año se revisó y se ajustó. La reunión final de evaluación del proyecto se desarrolló del 26 al 30 de marzo del año 2001, en Irapuato, Guanajuato, México.

Los logros/resultados principales, obtenidos en el proyecto hasta el momento, son los siguientes:

- Fortalecimiento de la formación de los recursos humanos especializados en el uso de las técnicas nucleares para mejorar la fertilidad y el manejo del suelo a fin de incrementar la productividad agrícola.
- Mejoramiento de las instalaciones y desempeño de los laboratorios de análisis isotópico en la región. Se estableció una red regional de laboratorios y se han introducido sistemas de control de calidad para los análisis de ^{15}N con resultados excelentes. Cuatro laboratorios se han acreditado como centros

regionales por el OIEA y tres de ellos han solicitado ser considerados como centros regionales ARCAL.

- Los grupos "nucleares", de profesionales especializados en estas técnicas han logrado una integración con los grupos de investigación agrícola nacionales mediante la utilización estratégica y racional de las técnicas nucleares en proyectos nacionales actualmente en marcha. En algunos casos, dicha integración ha sido completa y la colaboración ha incluido el personal de extensión y los productores.

- El enfoque principal de las actividades, actualmente en marcha, es identificar y fortalecer aquellos mecanismos que faciliten la difusión y transferencia de los resultados obtenidos hacia los agricultores, ya que uno de los objetivos generales del proyecto es contribuir a la transferencia de las tecnologías de probada eficiencia a los productores, a fin de obtener el máximo impacto en los usuarios finales y beneficiarios, que son los agricultores. Para ello, se deben desarrollar recomendaciones prácticas a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de campo. Esta tarea se ve facilitada cuando los ensayos han estado localizados en predios de agricultores o en campos de fácil acceso y manejo similar a los agricultores. Para ello, cada coordinador de proyecto ha preparado un plan de difusión que incluye los mejores mecanismos y actividades a realizarse en este sentido, según la realidad de los sistemas de investigación y extensión de cada país. Entre las actividades de difusión se han considerado ensayos de demostración, talleres para personal del servicio de investigación/extensión, días de campo para los agricultores, preparación de boletines de divulgación técnica, notas de prensa en los diarios y otros medios audiovisuales de comunicación.

El proyecto será evaluado no sólo por su eficiencia (logros obtenidos en relación con los objetivos específicos del proyecto), sino también por su relevancia (grado en que los objetivos y logros del proyecto permanecen apropiados y de importancia a los usuarios y al país) e impacto (cambios resultantes de los logros obtenidos) en los usuarios finales y beneficiarios.

CONCLUSIONES

En respuesta a la intensificación de la producción agrícola que ocurre en la región de América Latina y el Caribe, es necesario adoptar un enfoque de tipo holístico, desarrollando y probando prácticas de

manejo integrado del suelo, del agua y de los nutrimentos en los principales sistemas agro-ecológicos y de cultivo. En este trabajo, las técnicas nucleares son valiosas porque proporcionan, en plazos relativamente cortos, información cuantitativa y precisa, lo que permite identificar, de mejor manera, los factores limitativos de la producción agrícola y evaluar las prácticas de manejo más adecuadas y eficientes para incrementar la producción agrícola. El Proyecto Regional de Co-operación Técnica ARCAL XXII que está operacional en ocho países de la región de América Latina y el Caribe utiliza estas técnicas y otras conexas con esta finalidad. Hasta el momento se han obtenido diversos logros en relación con los objetivos del proyecto, en particular, con relación al mejoramiento de la formación de los recursos humanos y de las instalaciones de laboratorio para los servicios analíticos isotópicos, que son esenciales para el desarrollo de prácticas de manejo integrado. A partir de los resultados obtenidos en la Red Regional de Ensayos de Campo, deben desarrollarse recomendaciones prácticas para los agricultores y productores. Todos estos esfuerzos deben culminarse con una amplia difusión y transferencia de los

resultados y recomendaciones en el sector agrícola de los países participantes.

LITERATURA CITADA

- Alexandratos, N. 1995. World agriculture: Towards 2010. A FAO study. Rome, Italy.
- ARCAL. 1998. Un mecanismo para la promoción de la Co-operación Técnica entre los países Latinoamericanos y Caribeños en el campo del uso pacífico de la energía nuclear. Boletín OIEA. Viena, Austria.
- Biswas, M.R. 1994. Agriculture and environment. A review, 1972-1992. *Ambio* 23(3): 192-197.
- Doos, R. 1994. Environmental degradation, global food production, and risk for large-scale migrations. *Ambio* 23(2): 124-130.
- FAO. 1995. Planning for sustainable use of land resources: towards a new approach. FAO Land and Water Bulletin 2. Rome, Italy.
- IAEA. 1996. The joint FAO/IAEA programme in food and agriculture. Research for development. IAEA, Viena, Austria.
- Lal, R. y R.J. Pierce. 1991. Soil management for sustainability. Soil and Water Conservation Soc. Ankeny, Iowa.
- Lal, R. 2000. Soil management in the developing countries. *Soil Sci.* 165: 57-72.
- Zapata, F. y P.M. Chalk. 1999. Desarrollo de prácticas de manejo integrado del suelo, del agua y la nutrición de plantas en sistemas de cultivo en América Latina mediante el uso de técnicas nucleares y conexas. CD Rom 14. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Comisión V. CLACS-99. Temuco, Chile.

ABSORCION DE NITROGENO EN TRIGO EN RELACION CON LA DISPONIBILIDAD HIDRICA

Nitrogen Uptake of Wheat in Relation to Water Availability

Silvia López¹, Edgardo Guevara², Marisa Maturano², Mariana Melaj¹, Juan Pablo Bonetto¹
Santiago Meira², Olga Martín¹ y Néstor Bárbaro¹

RESUMEN

En algunas zonas de la Región Pampeana en la República Argentina, la incorporación relativamente reciente de la fertilización y el riego suplementario han hecho necesarios nuevos estudios sobre algunos aspectos relacionados con estas prácticas. Los objetivos de este trabajo fueron estimar la recuperación en trigo del N aportado por la fertilización con urea y estudiar la dinámica del N en un sistema agrícola de secuencia trigo-soja comparando situaciones de distinta disponibilidad hídrica. Los ensayos se realizaron entre 1997 y 1998 en un suelo Argiudol típico de la localidad de Pergamino (Pampa Ondulada) y se utilizó riego suplementario cuando correspondió. En 1997, la urea enriquecida con ¹⁵N se aplicó al comienzo del cultivo de trigo en dosis de 0 y 50 kg N ha⁻¹ y, en 1998, de 0, 60 y 120 kg N ha⁻¹. En 1997, el exceso de lluvias durante el llenado de grano no permitió evaluar los efectos del riego y provocó pérdidas de biomasa aérea y rendimiento. En 1998, la eficiencia de uso del fertilizante, calculada por el método de la diferencia entre plantas fertilizadas y no fertilizadas, fue mayor en las plantas fertilizadas con riego. La aplicación de N en condiciones de humedad favorables estimuló la mineralización en un suelo bien provisto de N potencialmente mineralizable. Como consecuencia de esta situación, las plantas irrigadas y fertilizadas absorbieron más N del suelo que las plantas cultivadas no fertilizadas con y sin irrigación. La recuperación efectiva del ¹⁵N proveniente de la urea marcada en el cultivo fue baja (entre 18 y 23% del fertilizante aplicado), independientemente del año y la

disponibilidad de agua. La recuperación de ¹⁵N en la soja sembrada luego del trigo mostró que el fertilizante no recuperado en el cultivo inmediatamente después de su aplicación se acumuló para estar disponible a más largo plazo. Los resultados muestran que, en estos suelos, los procesos de inmovilización y remineralización del N aplicado con la urea son muy importantes y que deben ser considerados para establecer estrategias de fertilización adecuadas, especialmente cuando se utiliza riego.

Palabras clave: Fertilización nitrogenada, ¹⁵N, riego.

SUMMARY

In the Pampa Region in Argentina, fertilization and supplementary irrigation have recently been introduced. New studies are needed to know the effect of these practices. The objectives of this study were to determine the real recovery of N provided by the ¹⁵N-urea and to estimate the N evolution in a wheat-soybean rotation system with different water availability. ¹⁵N-labeled urea was applied at different rates (0 and 50 kg N ha⁻¹ in 1997, and 0, 60, and 120 kg N ha⁻¹, in 1998) to wheat grown in a Typic Argiudol in Pergamino (Rolling Pampa). The experimental design included supplementary irrigation. The irrigation was evaluated only during 1998 because excessive rains occurred during the wheat growth season in 1997. Losses of biomass and yield were observed during the rainy year (1997). During 1998, the urea use efficiency was determined by the method of the difference between N content in fertilized and non-fertilized plants. The real or "effective" recovery of N from ¹⁵N-urea was measured by the isotopic method. A strong relationship between climatic conditions and the fertilizer use efficiency was observed. Mineralization of native N was enhanced by fertilization under adequate water availability. The effective recovery of ¹⁵N in the crop was low (18 to 23% of applied N), but there was little variation with different water availability. The

¹Unidad de Actividad Aplicaciones Tecnológicas y Agropecuarias-Comisión Nacional de Energía Atómica. Avda. del Libertador 8250-1429, Buenos Aires, Argentina. (siclopez@cae.cnea.gov.ar)

²Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-Estación Experimental Pergamino, Argentina.

recovery of ^{15}N in soybean cropped after wheat showed that N from the fertilizer was recovered in the following crop. In these cases, N from fertilizer can be temporarily immobilized in organic pools, which are mineralized in subsequent seasons. Fertilization strategies, in soils where immobilization and remineralization processes are so important, must be elaborated taking into account these processes, specially when irrigation is used.

Index words: Nitrogen fertilization, ^{15}N , irrigation.

INTRODUCCION

La República Argentina posee aproximadamente 35 000 000 ha de tierras cultivables, de las cuales 20% se dedica al cultivo de trigo. La producción de trigo se concentra en el sur de la Región Pampeana y en el norte, en la Pampa Ondulada, en Molisoles formados sobre sedimentos loésicos, con buen contenido original de materia orgánica y nutrientes (Burkart *et al.*, 1999). La intensificación agrícola ha provocado la disminución de la materia orgánica (MO) en 47% y una apreciable pérdida del nitrógeno y fósforo (Michelena *et al.*, 1989). Hasta 1990, el uso de fertilizantes era muy bajo, con un consumo promedio de 4 kg ha⁻¹.

En los últimos años, se usan dosis de fertilizantes más elevadas y se extendió el área fertilizada, se introdujo la siembra directa o labranza cero y se incorporó el riego. En la Pampa Ondulada, todo el trigo es seguido por algún cultivo de verano, siendo el más frecuente la soja, generalmente con siembra directa y sembrada inmediatamente después de la cosecha de trigo (Satorre y Slafer, 1999).

La influencia del clima sobre la producción triguera en toda la Región Pampeana es muy importante. Estudios recientes han mostrado la relación entre El Niño Southern Oscillation (ENSO), los patrones de lluvia y la producción de trigo en la región (Spescha *et al.*, 1997).

Las lluvias se distribuyen durante todo el año, pero julio y agosto, cuando el cultivo de trigo se encuentra en sus estadios iniciales, son menos lluviosos. En Pergamino, en la Pampa Ondulada, la ocurrencia de sequías estacionales coincide con los momentos de mayor sensibilidad a la falta de agua de los cultivos (De Zeljkovich y Pérez, 1992). El exceso de lluvias en anthesis y comienzo de llenado de grano afecta también a la producción de trigo (Rebella y De Zeljkovich, 1980), lo cual favorece el desarrollo de

hongos, como *Fusarium*, por la humedad relativa alta y limita el número de granos formados por la baja radiación solar. Las diferencias en la disponibilidad hídrica, registrada en septiembre y octubre, explican 42% de las variaciones en el rendimiento de trigo, cultivado en la Pampa Ondulada (Hall *et al.*, 1992).

El manejo de la fertilización en la zona se ve afectado por la variabilidad interanual de lluvias, lo cual agrega un factor de riesgo para el productor, en cuanto a los beneficios económicos que le puede redituarse esta práctica.

El riego suplementario se ha incorporado recientemente y representa una posibilidad de solución al déficit hídrico en momentos críticos del cultivo. Es muy importante elaborar estrategias de irrigación y fertilización compatibles con la preservación de la calidad de los suelos.

Debido a que las condiciones climáticas y de humedad del suelo modifican la disponibilidad de N y los patrones de distribución del N en la planta, los objetivos de este trabajo fueron determinar la recuperación efectiva de la urea- ^{15}N aplicada, en distintas condiciones de humedad del cultivo de trigo y conocer la dinámica del nutriente en el sistema de cultivo. Además, se estimaron los efectos del riego y de la fertilización sobre la mineralización del N.

MATERIALES Y METODOS

Los ensayos se realizaron durante 1997 y 1998 en la estación experimental INTA Pergamino sobre un suelo Argiudol Típico, con un diseño de bloques al azar en 1997. En 1998, se usó un arreglo de parcelas divididas. En 1997 (26 de junio), se sembró trigo (*Triticum aestivum*) con labranza convencional con dos dosis de urea (0 y 50 kg N ha⁻¹). El lote sobre el que se instaló el ensayo se había cultivado previamente con soja (*Glycine max*) con labranza mínima. El diseño original contemplaba considerar dos situaciones de disponibilidad hídrica: secano y riego suplementario. Sin embargo, el exceso de lluvias registrado en ese año impuso un único nivel de humedad en el perfil de suelo. La urea se aplicó al voleo a la siembra. Dentro de las unidades experimentales fertilizadas se delimitaron microparcels de 2 x 1.7 m (3.4 m²), donde se aplicó urea con un enriquecimiento en ^{15}N de 9.634% átomos en exceso. El resto de las unidades experimentales se fertilizó con urea comercial. El tamaño de las microparcels se previó para que, luego de la cosecha de trigo, se pudiera sembrar soja inoculada y no

inoculada dentro de las microparcels y así evaluar la absorción del N residual por el cultivo siguiente. En 1998, el ensayo se instaló en un lote lindante con el cultivado en 1997. Los tratamientos evaluados fueron: dos niveles de disponibilidad de agua (secano y riego suplementario en respuesta a datos de perfil de humedad obtenido por sonda de neutrones) y tres dosis de N como urea (0, 60 y 120 kg N ha⁻¹). La aplicación de urea comercial y enriquecida fue igual a la descrita para el ensayo de 1997, pero en microparcels de 1.8 x 1 m (1.8 m²), para muestrear sólo el cultivo de trigo. En todos los tratamientos se aplicó fertilización fosfórica de base (36 kg P₂O₅ ha⁻¹).

En 1997, la parte aérea de las plantas de trigo se muestreó en las siguientes etapas: emergencia de hoja bandera, grano lechoso y madurez fisiológica. En 1998, se tomaron muestras sólo cuando las plantas llegaron a la madurez fisiológica. En cada muestreo, se cuantificó la materia seca, el contenido de N total por el método de Kjeldahl modificado y la relación isotópica de ¹⁴N/¹⁵N por espectrometría de emisión óptica en un espectrómetro modelo NOI6PC. Para las determinaciones de N total y ¹⁵N, se realizó la digestión Kjeldahl de 0.5 g de material vegetal. Se procedió luego a la destilación, recogiendo el destilado en HCl 0.1 N. Para evitar la contaminación cruzada, se destiló alcohol diluido en agua (1:5) entre muestra y muestra. La titulación se efectuó con NaOH 0.1 N. Inmediatamente después de la titulación, las muestras se acidificaron y deshidrataron sobre plancha calefactora a menos de 50 °C (R. Goyenola, 1996. Comunicación personal). En el momento de medición de la relación isotópica de ¹⁴N/¹⁵N las muestras se disolvieron en 1 mL de agua destilada.

A la cosecha, también se determinó el rendimiento; para esto se utilizaron unidades experimentales de 4 m².

En marzo de 1998, se tomaron muestras de la soja y se analizó, en la biomasa aérea cosechada, el contenido de N total y el N derivado de la urea aplicada al cultivo predecesor.

El cálculo del N derivado del fertilizante recuperado en las plantas (Nddf) se efectuó, para lo cual se basó en los métodos descritos por Zapata (1990), según la siguiente ecuación:

$$Nddf = N \frac{p - f_p}{u - f_u} \quad (1)$$

Donde: N es el nitrógeno acumulado en la planta, p y u son el porcentaje átomo abundancia ¹⁵N en la planta y en la urea marcada, respectivamente, y f_p y f_u son el porcentaje át. ¹⁵N de las plantas no fertilizadas y la urea no marcada, respectivamente.

En el caso del trigo, se consideró una abundancia relativa de fondo de 0.366% y, en el caso de la soja, se utilizó el valor de abundancia relativo determinado en las plantas de soja cultivadas en las parcelas sin fertilización (0.371%).

La recuperación porcentual de N derivado del fertilizante (RF) es:

$$RF = \frac{Nddf}{F} 100 \quad (2)$$

Donde: F es la cantidad de fertilizante aplicada.

La eficiencia de uso del fertilizante (EUF) en trigo también se calculó con el método de la diferencia entre el N absorbido por las plantas fertilizadas y las no fertilizadas, según la siguiente ecuación:

$$EUF = \frac{NF - NT}{F} 100 \quad (3)$$

Donde: NF y NT es el N acumulado en las plantas fertilizadas y no fertilizadas, respectivamente, y F es la cantidad de fertilizante aplicada.

En 1998, durante el macollaje de las plantas de trigo, se tomaron muestras de suelo y se determinó el N-NH₄⁺ producido por destilación con MgO luego de tratar el suelo con 2 M KCl a 100 °C durante 4 h (Gianello y Bremner, 1986; F. Selles, 1997. Comunicación personal), como medida del N potencialmente mineralizable (Cabrera, 2000).

El análisis estadístico se realizó cada año por separado, debido a que los diseños experimentales fueron diferentes. El análisis de varianza se determinó utilizando el procedimiento General Linear Model (GLM) de Statistical Analysis System (SAS Institute, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSION

Condiciones Climáticas

En 1997, las precipitaciones registradas entre julio y diciembre fueron de 594 mm, superiores al

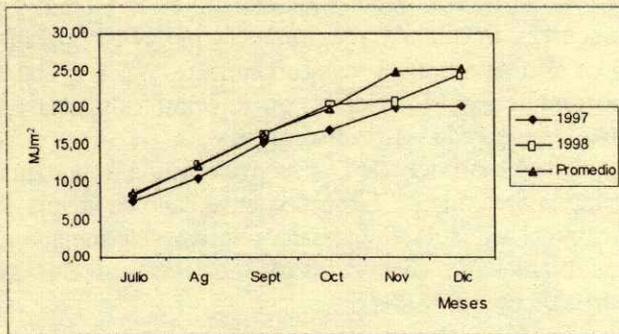


Figura 1. Radiación solar registrada en el sitio de ensayo en 1997 y 1998, comparada con el promedio histórico de 20 años.

promedio de 20 años (420 mm) y a las necesidades de agua para el cultivo de trigo (455 mm) en la zona de Pergamino (INTA, 1997). La incidencia de la luz solar fue baja con muchos días de nubosidad parcial durante el período de crecimiento del cultivo (Figura 1).

Durante 1998, se produjeron algunos períodos de sequía coincidentes con los habituales en la zona (De Zeljkovich y Pérez, 1992). Por otra parte, la precipitación acumulada (423 mm) en los primeros seis meses antes de la siembra de trigo fue menor que el promedio histórico (540 mm).

Rendimiento

La producción de grano de trigo, en 1998, fue más alta que en 1997. Incluso el trigo no fertilizado, en 1998, alcanzó un rendimiento superior al trigo

Cuadro 1. Rendimiento en grano de trigo, con condiciones de humedad y dosis de urea (0, 50, 60 y 120 kg N ha⁻¹).

Tratamiento N aplicado kg ha ⁻¹	Rendimiento	
	1997	1998
	kg ha ⁻¹	
Sin riego		
0	1922 ± 219	2704 ± 180
50	1974 ± 71	-
60	-	2705 ± 336
120	-	3190 ± 305
Con riego		
0	-	3152 ± 326
60	-	4299 ± 390
120	-	4837 ± 92
Análisis estadístico		
N	NS	**
Riego	-	*
N x Riego	-	*
CV (%)	7	11

*, ** = significativo a $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$, respectivamente; NS = no significativo.

fertilizado en 1997 (Cuadro 1). Hacia el final del ciclo de cultivo 1997, se produjo una pérdida importante de la biomasa vegetal total. Esto determinó un bajo rendimiento y la ausencia de efecto de la fertilización sobre el mismo. La disminución en el rendimiento y las pérdidas de materia seca se relacionaron con las condiciones climáticas que se registraron en ese año. Las lluvias ocurrieron, principalmente, en octubre, lo cual coincidió con el llenado de grano. Esta situación es recurrente en la zona, se presenta en forma cíclica y se ha mencionado como motivo de bajo rendimiento de trigo (Hall *et al.*, 1992).

En 1998, se registró una importante respuesta a la fertilización acompañada por riego. Sin embargo, sin la aplicación de riego, sólo la dosis mayor de urea provocó un incremento en el rendimiento.

Estos resultados indican la fuerte relación entre el rendimiento del cultivo de trigo y las condiciones climáticas de la zona. Tanto el exceso de lluvias de 1997 como el déficit hídrico del cultivo sin riego en 1998 condujeron a bajos rendimientos y a una escasa respuesta a la fertilización. Es probable que la baja respuesta a la fertilización observada, en 1998, se haya relacionado más con la escasa agua acumulada en el perfil antes de la siembra que con las lluvias ocurridas durante el período de cultivo.

Acumulación y Removilización de Nitrógeno

En 1997, hubo una acumulación final de N menor a la registrada en grano lechoso, debido a pérdidas ocurridas al final del ciclo de cultivo. Estas pérdidas afectaron también a la biomasa aérea total. Entre grano lechoso y madurez fisiológica, las pérdidas de biomasa fueron de 28.6% en las parcelas sin fertilización y de 34.3% en las plantas fertilizadas. Las pérdidas de N fueron ligeramente más bajas, pero siguiendo la tendencia de menores pérdidas en las plantas no fertilizadas (Figura 2). Aún así, las plantas fertilizadas acumularon más N a la cosecha que las plantas no fertilizadas.

El trigo con riego con fertilización presentó una acumulación mayor de N en toda la planta (Cuadro 2). La partición del N en las partes de la planta se vio fuertemente afectada por el exceso de humedad. En 1997, se observó una acumulación proporcionalmente muy importante del N en la gluma del trigo, debido a una concentración de N muy alta en esta parte de la planta (1.3 y 1.5% en las plantas control y fertilizadas, respectivamente). La gluma constituye un destino temporal del N durante la fase temprana del llenado

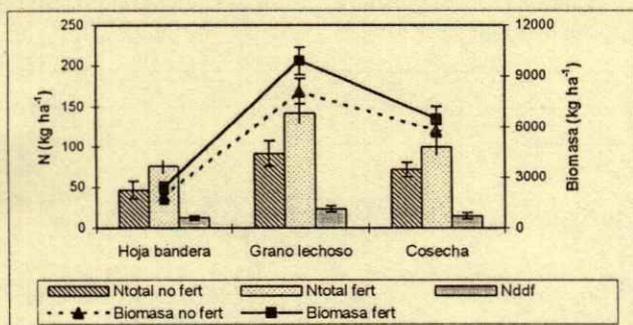


Figura 2. Evolución de la biomasa aérea y el nitrógeno en el trigo cultivado en un año con excesiva lluvia (1997). Ntotal no fert: Nitrógeno total en plantas no fertilizadas; Ntotal fert: Nitrógeno total en plantas fertilizadas; Biomasa no fert: Biomasa aérea en plantas no fertilizadas; Biomasa fert: Biomasa aérea en plantas fertilizadas; Nddf: N derivado de la urea-¹⁵N.

de grano, en especial, cuando la absorción de N del suelo continúa (Dalling, 1985). En las condiciones de humedad de 1997, la absorción de N pudo prolongarse hasta el final del ciclo, pero el traslado del N y de los fotosintatos hacia el grano como destino final no se completó.

La redistribución de fotosintatos puede estimarse por la relación entre la biomasa en grano y la biomasa total o índice de cosecha (IC). De igual modo, el índice de cosecha de N (ICN) indica la proporción de N en grano con respecto al N acumulado en toda la

planta. Tanto el IC como ICN se afectaron por la disponibilidad hídrica. El IC más bajo se observó durante 1997 (Cuadro 3).

Si bien se esperaba una relación inversa entre el contenido de humedad en el perfil y la concentración de proteína en el grano de trigo, los resultados mostraron que el riego por sí mismo no produjo cambios significativos en la concentración de proteína. En 1997, con exceso de lluvias tampoco hubo respuesta a la fertilización. En 1998, se verificó una interacción significativa entre riego y dosis de fertilización recibida. La fertilización incrementó la concentración de proteína en grano de trigo en todos los casos menos al agregarse la dosis más alta de urea con riego. En ese tratamiento se registró el rendimiento más alto. La fertilización temprana en trigo con riego puede aumentar el rendimiento y la concentración de proteína en grano conjuntamente, aunque el rendimiento se beneficia más (Hogg y Ackerman, 1998) y el mayor rendimiento puede significar una dilución del N del grano (Selles y Zentner, 1998).

Recuperación del Fertilizante

Como consecuencia de las pérdidas mencionadas, ocurridas en 1997, la mayor acumulación de N derivado del fertilizante se registró en el estadio de

Cuadro 2. Acumulación y distribución del nitrógeno en las distintas fracciones de las plantas de trigo, para diferentes condiciones de disponibilidad hídrica y distintos niveles de fertilización (0, 50, 60 y 120 kg N ha⁻¹).

Tratamiento N aplicado kg N ha ⁻¹	1997				1998			
	H+T	Gluma	Grano	Total	H+T	Gluma	Grano	Total
Sin riego								
0	16.3 ± 3.0	18.4 ± 1.4	37.7 ± 5.1	72.4 ± 9.0	25.9 ± 2.6	7.3 ± 0.6	68.8 ± 7.0	102.0 ± 5.5
50	25.0 ± 3.6	25.5 ± 6.5	45.0 ± 1.2	95.5 ± 9.8	-	-	-	-
60	-	-	-	-	23.5 ± 1.4	7.7 ± 1.0	70.0 ± 9.3	101.2 ± 9.3
120	-	-	-	-	33.3 ± 3.7	11.9 ± 1.6	84.6 ± 6.8	129.8 ± 6.8
Con riego								
0	-	-	-	-	31.8 ± 7.9	10.2 ± 3.3	71.0 ± 7.6	113.0 ± 10.6
60	-	-	-	-	76.0 ± 8.6	22.0 ± 0.6	107.0 ± 5.2	205.0 ± 2.8
120	-	-	-	-	63.4 ± 2.5	19.5 ± 0.9	126.0 ± 5.0	209.0 ± 6.7
Análisis estadístico								
N	NS	NS	NS	NS	**	**	**	**
Riego	-	-	-	-	**	**	*	**
N x Riego	-	-	-	-	**	**	**	**
CV (%)	21.8	23.7	8.8	15.8	10.3	11.7	7.6	7.0

H+T = hoja + tallo.

*, ** = significativo a P ≤ 0.05 y P ≤ 0.01, respectivamente; NS = no significativo.

Cuadro 3. Índice de cosecha (IC), índice de cosecha de nitrógeno (ICN) y contenido de proteína en el grano de trigo para diferentes condiciones de disponibilidad hídrica y distintos niveles de fertilización (0, 50, 60 y 120 kg N ha⁻¹).

Tratamiento N aplicado kg ha ⁻¹	1997			1998		
	IC	ICN	Proteína %	IC	ICN	Proteína %
Sin riego						
0	0.28 ± 0.02	0.54 ± 0.01	13.85 ± 0.30	0.36 ± 0.01	0.67 ± 0.03	14.48 ± 0.50
50	0.28 ± 0.03	0.45 ± 0.03	14.80 ± 0.19	-	-	-
60	-	-	-	0.36 ± 0.03	0.69 ± 0.03	14.74 ± 0.17
120	-	-	-	0.35 ± 0.01	0.65 ± 0.04	15.14 ± 0.30
Con riego						
0	-	-	-	0.30 ± 0.03	0.61 ± 0.06	12.85 ± 0.50
60	-	-	-	0.31 ± 0.02	0.54 ± 0.03	15.33 ± 0.08
120	-	-	-	0.34 ± 0.01	0.60 ± 0.01	14.21 ± 0.27
Análisis estadístico						
N	NS		NS	NS	NS	**
Riego	-	-	-	*	*	NS
N x Riego	-	-	-	NS	*	**
CV (%)	5.3	3.6	2.2	6.9	5.9	2.6

*, ** = significativo a $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$, respectivamente; NS = no significativo.

grano lechoso, cuando se encontraba incorporado a las plantas de trigo 48% del fertilizante aplicado. Si bien no se tiene información completa sobre el destino del N perdido y el que no se incorporó a las plantas de trigo, el uso de urea enriquecida en ¹⁵N permitió cuantificar el N residual que permaneció en el suelo y que pudo ser utilizado por el cultivo siguiente. Efectivamente, la soja no inoculada absorbió N proveniente de la urea enriquecida aplicada al trigo. En marzo de 1998, 2.9% del N aplicado al trigo se encontraba en la biomasa aérea de la soja.

En la soja inoculada no se registró diferencia significativa entre el enriquecimiento en ¹⁵N de las plantas crecidas en las parcelas fertilizadas previamente con urea enriquecida y el valor correspondiente a las plantas cultivadas sin fertilización previa (datos no presentados). La fijación biológica de N aportó suficiente N atmosférico para diluir e impedir la medición del posible N residual derivado de la fertilización aplicada al trigo.

Numerosos trabajos han mostrado que el valor de la eficiencia de uso calculada en función de la recuperación de ¹⁵N en el cultivo puede diferir del valor calculado por el método de la diferencia (Jenkinson *et al.*, 1985; Jokela y Randall, 1997; Pilbeam *et al.*, 1997; Schindler y Knighton, 1999). La información que brindan los dos métodos puede ser distinta, pero se complementa. La eficiencia de uso del fertilizante calculada con base en las diferencias del N acumulado en las plantas fertilizadas y no fertilizadas integra todos los efectos de la fertilización sin distinguir entre ellos. La fertilización puede

favorecer factores como la mineralización del N orgánico del suelo o la eficiencia de uso del agua y, entonces, la absorción de N aportado por el suelo de las plantas fertilizadas no se mantiene igual que en las plantas testigo. Sin embargo, el método de la diferencia atribuye el mayor N acumulado en las plantas fertilizadas sólo al aporte del N del fertilizante. Por eso, el método de la diferencia sólo permite calcular la recuperación aparente del fertilizante que no siempre es igual a la recuperación real. La recuperación efectiva del N del fertilizante (RF) puede conocerse, en cambio, a partir del ¹⁵N incorporado al trigo a partir del fertilizante marcado con ¹⁵N. En madurez fisiológica, la recuperación efectiva del N del fertilizante, medida por el método directo con urea-¹⁵N, fue similar en 1998 y 1997 independientemente del tratamiento aplicado (Cuadro 4). Estos valores se encuentran dentro del rango descrito por distintos autores (Pilbeam, 1996), pero son relativamente bajos para los determinados en otras zonas de la Región Pampeana (Bárbaro *et al.*, 1998). La eficiencia de uso de la urea, calculada por el método de la diferencia, varió de 0 a más de 100% (Cuadro 4). Pilbeam *et al.* (1997) mencionaron eficiencias de más de 100% y éstas muestran que la disponibilidad del N del suelo varía cuando se fertiliza.

En situación de menor humedad, como la presentada en 1998 en las parcelas no regadas, los dos métodos registran la misma eficiencia de uso para la dosis más alta. Cuando se aplicó la dosis más baja, se produjo absorción de N aportado por la urea ¹⁵N, pero

Cuadro 4. Eficiencia de uso de la urea (EUF), calculada por el método indirecto o de la diferencia y recuperación porcentual efectiva del N derivado de la urea marcada (RF), considerando diferentes condiciones de disponibilidad hídrica y distintos niveles de fertilización (50, 60 y 120 kg N ha⁻¹).

Urea aplicada kg N ha ⁻¹	1997		1998			
	RF	EUF	Sin riego		Con riego	
			RF	EUF	RF	EUF
50	23 ± 7.6	46 ± 2.8				
60			18 ± 0.4	0 ± 15.6	20 ± 0.9	>100 (153 ± 26)
120			23 ± 1.8	23 ± 6.3	22 ± 2.9	80 ± 13.5

no hubo diferencia entre el N total asimilado por las plantas fertilizadas y las no fertilizadas. Entonces, la eficiencia de uso, calculada por el método de la diferencia, resultó nula mientras que el método isotópico registró una recuperación de 18%. Jokela y Randall (1997) y Schindler y Knighton (1999) explicaron un fenómeno similar por la alta cantidad inicial de N inorgánico en el perfil del suelo. Si bien, la falta de respuesta a la fertilización en rendimiento y en absorción de N es similar a la descrita por los autores mencionados, en la presente investigación la situación parece relacionarse también con la falta de la disponibilidad de agua. Aunque no se descarta la buena cantidad inicial de N inorgánico en el perfil, las plantas habrían tenido un desarrollo limitado por la falta de agua que, también, afectó la absorción de N. Las plantas estarían utilizando el fertilizante como fuente alternativa de N y no como fuente extra. Por lo tanto, no hubo incremento neto del contenido total de N en el tejido vegetal.

En los casos de buena a excesiva provisión de agua, tanto en 1997 como en 1998, el método de la diferencia registra valores mayores de EUF que la RF. Esta es la situación más frecuentemente citada en las investigaciones donde se comparan los dos métodos (Hauck y Bremner, 1976; Jokela y Randall, 1997). Corresponde al fenómeno de "ANI" (del inglés added nitrogen interaction) o "priming" (Raun *et al.*, 1999; Jenkinson *et al.*, 1985) que implica un cambio provocado por la fertilización en la absorción del N no marcado provisto por el suelo. El "ANI" se ha vinculado a una estimulación de la mineralización del N del suelo que deja más N disponible para las plantas en el perfil del suelo. Esta estimulación estaría dada por las dosis bajas de N aplicado que favorecen la actividad microbiana.

El aumento de la actividad microbiana también pudo dar lugar a inmovilización del N, aportado por el fertilizante. Cuando el fertilizante está enriquecido

con ¹⁵N, esto puede conducir a lo que se denomina sustitución de pools (Pilbeam *et al.*, 1997), con la consecuente variación del ¹⁵N disponible para las plantas. La desaparición del ¹⁵N del pool disponible para las plantas también puede darse por otros procesos como denitrificación.

Con el suelo más seco, la absorción de N derivado del suelo (Ndds) no varió con la fertilización, pero cuando el suelo permaneció húmedo, la fertilización estimuló la absorción de N nativo del suelo (Cuadro 5).

La mayor absorción de N se debió a una mayor demanda de la planta y a una mayor disponibilidad de N. El N del suelo provino del pool inorgánico inicial, de la mineralización del N orgánico nativo y de los residuos de soja cultivada precedentemente. Si bien, la fijación biológica de N durante el cultivo de soja pudo haber dejado más N disponible, el estímulo de la mineralización causado por los residuos de soja

Cuadro 5. N derivado del fertilizante (Nddf) y del suelo (Ndds), para condiciones de disponibilidad hídrica y niveles de fertilización (0, 50, 60 y 120 kg N ha⁻¹).

Tratamiento N aplicado kg ha ⁻¹	1997		1998	
	Nddf	Ndds	Nddf	Ndds
Sin riego				
0	-	72.4 ± 9.0	-	102.0 ± 5.5
50	11.7 ± 3.8	83.8 ± 8.2	-	-
60	-	-	10.8 ± 0.2	90.4 ± 9.6
120	-	-	27.4 ± 2.2	102.4 ± 4.5
Con riego				
0	-	-	-	113.1 ± 20.3
60	-	-	12.0 ± 0.5	193.0 ± 1.6
120	-	-	26.3 ± 3.4	182.7 ± 3.6
Análisis estadístico				
N	-	NS	**	**
Riego	-	-	NS	**
N x Riego	-	-	NS	**
CV (%)		9.9	10.5	8.2

** = significativo a P ≤ 0.01; NS = no significativo.

tiene mayor incidencia en el desarrollo del cultivo de trigo siguiente a la soja (Alves *et al.*, 1999).

Para descartar posibles diferencias en el N potencialmente mineralizable en las distintas parcelas del ensayo, realizado en 1998, se determinó el N-NH₄⁺ extraído en caliente. Si bien, el valor de N-NH₄⁺ determinado fue alto (72.3 mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ suelo), no hubo diferencias significativas entre parcelas.

CONCLUSIONES

La recuperación efectiva en el cultivo de trigo del N aportado por la urea marcada fue baja, pero sufrió menos influencia de las condiciones climáticas que la eficiencia de uso del fertilizante, calculada por el método de la diferencia entre plantas fertilizadas y no fertilizadas. La recuperación de ¹⁵N en la soja no inoculada que siguió al trigo mostró que el N aportado por el fertilizante se conservó, al menos en parte, en el sistema suelo-planta y que pudo ser utilizado por el cultivo subsecuente. En 1998, la fertilización con riego estimuló la absorción de N nativo del suelo, debido a que la aplicación de N parece haber favorecido la mineralización. En suelos con actividad microbiana importante, el N del fertilizante puede no ser utilizado por las plantas inmediatamente después de su aplicación y, en cambio, pasar a formar parte del pool orgánico que se mineraliza cuando las condiciones sean propicias. Es necesario estudiar la dinámica del N aportado por el fertilizante durante un período más largo, incluyendo el ciclado de la materia orgánica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con financiación de la División Conjunta FAO/OIEA, Proyecto ARCAL XXII. Los autores quieren agradecer muy especialmente a los Dres. Felipe Zapata y Segundo Urquiaga por su asesoramiento y dedicación.

LITERATURA CITADA

- Alves, J.R., L. Zotarelli, R. Boddey y S.Urquiaga. 1999. Ciclaje de N en sistemas de siembra directa y convencional. pp. 1-5. *In: R. Álvarez (ed.). Biología del suelo en siembra directa. Boletín Especial. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Argentina.*
- Bárbaro, N., S. López, M. Melaj, R. Bergh, H. Echeverría, C. Videla y T. Loewy. 1998. Empleo de urea marcada para evaluar la tecnología de fertilización nitrogenada en trigo. pp. 3-9. *In: Actas IV Congreso Nacional de Trigo. II Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño-Invernal. Argentina.*
- Burkart, R., N.O. Bárbaro, R.O. Sánchez y D.A. Gómez. 1999. Eco-regiones de la Argentina. Administración de Parques Nacionales. Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Argentina.
- Cabrera, M. 2000. Métodos rápidos para la determinación del nitrógeno orgánico potencialmente mineralizable. Conferencia en el Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.
- Dalling, M. 1985. The physiological basis of nitrogen redistribution during grain filling in cereals. pp. 55-71. *In: J. Harper, L. Schrader y R. Howell. (eds.). Exploitation of physiological and genetic variability to enhance crop productivity. Am. Soc. of Plant Physiologist. Rockville, IN.*
- De Zelykovich, L.T. y O. Pérez. 1992. Necesidades de agua de los cultivos de trigo y soja en la región de Pergamino (Bs.As). INTA EEA Pergamino. Carpeta de Producción Vegetal. Tomo XI, Soja. Informe 97. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- Gianello, C. y J.M. Bremner. 1986. Comparison of chemical methods of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17: 215-236.
- Hall, A.J., C.M. Rebella, C.M. Ghersa y J.Ph. Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. pp. 412-450. *In: C.J. Pearson (ed.). Field crop ecosystems. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.*
- Hauck, R. y J.M. Bremner. 1976. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. *Adv. Agron.* 28: 219-266.
- Hogg, T.J. y P. Ackerman. 1998. Late nitrogen application to improve grain protein of irrigated sceptre durum wheat. pp. 291-297. *In: D.B. Fowler, W.E. Geddes, A.M. Johnston y K.R. Preston (eds.). Wheat protein production and marketing. University Extension Press. University of Saskatchewan, Canada.*
- INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1997. Guía práctica para el cultivo de trigo. Campaña 1997. Buenos Aires, Argentina.
- Jenkinson, D.S., R.H. Fox y J.H. Rayner. 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen—the so-called "priming effect". *Soil Sci.* 36: 425-444.
- Jokela, W. y G. Randall. 1997. Fate of fertilizer. Nitrogen as affected by time and rate of application on corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1695-1703.
- Michelena, R.O., C.B. Iruetia, F.A. Vavruska, R. Mon y A. Pitaluga. 1989. Degradación de suelos en el norte de la región pampeana. Proyecto de Agricultura Conservacionista. Publ. Téc. 6. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina.
- Pilbeam, C.J. 1996. Effect of climate on the recovery in crop and soil of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to wheat. *Fert. Res.* 45: 209-215.
- Pilbeam, C.J., A.M. McNeill, H.C. Harris y R.S. Swift. 1997. Effect of fertilizer rate and form on the recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to wheat in Syria. *J. Agric. Sci.* 128: 415-424.
- Raun, W., G. Johnson y R.L. Westerman. 1999. Fertilizer nitrogen recovery in long-term continuous winter wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 645-650.
- Rebella, C. y L.T. de Zelykovich. 1980. Probabilidades de deficiencias y excesos hídricos en la región de Pergamino. pp. 79-93. *In: Proc. IX Reunión Argentina de la Ciencia del*

- Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina.
- SAS Institute. 1985. SAS user's guide: Statistics. Version 5 Ed. SAS Inst. Cary, NC.
- Satorre, E. y G. Slafer. 1999. Wheat production systems of the Pampas. pp. 333-348. *In*: E. Satorre y G. Slafer (eds.). Wheat, ecology and physiology of yield determination. Food Products Press. Haworth Press. New York.
- Schindler, F.V. y R.E. Knighton. 1999. Fate of fertilizer nitrogen applied to corn as estimated by the isotopic and difference methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1734-1740.
- Selles, F. y R.P. Zentner. 1998. Environmental factors affecting wheat protein. pp. 139-150. *In*: D.B. Fowler, W.E. Geddes, A.M. Johnston y K.R. Preston (eds.). Wheat protein production and marketing. University Extension Press. University of Saskatchewan, Canada.
- Spescha, L., A. Beltrán, C. Messina y R. Hurtado. 1997. Efectos del ENSO (El Niño-Southern Oscillation) sobre la producción agrícola argentina. pp. 19-22. *In*: Proc. Workshop sobre "Efectos de El Niño sobre la variabilidad climática, agricultura y recursos hídricos en el sudeste de Sudamérica". Montevideo, Uruguay.
- Zapata, F. 1990. Isotope techniques in soil fertility and plant nutrition studies. pp. 61-128. *In*: Training Course Series 2. Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. IAEA, Viena.

EFICIENCIA DE ABONOS VERDES (CROTALARIA Y MUCUNA) Y UREA, APLICADOS SOLOS O JUNTAMENTE, COMO FUENTES DE N PARA EL CULTIVO DE ARROZ¹

Efficiency of Green Manure (Crotalaria and Mucuna) and Urea as Nitrogen Source for Rice Crop

T. Muraoka², E.J. Ambrosano³, F. Zapata⁴, N. Bortoletto³, A.L.M. Martins³,
P.C.O. Trivelin², A.E. Boaretto² y W.B. Scivittaro⁵

RESUMEN

Se efectuaron ensayos en dos localidades (Pindorama y Votuporanga, SP, Brasil, suelos Podzólico rojo y Latosol rojo oscuro, respectivamente) con el objetivo de: a) evaluar la eficiencia de las leguminosas Crotalaria (*Crotalaria juncea*) y Mucuna-preta (*Mucuna aterrima*), usadas como abono verde, en suplir el N para el cultivo de arroz; b) estudiar la interacción entre urea y abono verde en la utilización del N por el arroz; y c) evaluar el efecto del fraccionamiento del fertilizante nitrogenado en el aprovechamiento de N por el cultivo de arroz. Los tratamientos evaluados fueron los siguientes: T₁ = testigo; T₂ = 80 kg N ha⁻¹ (30[†]+50 ó 30+50[†]); T₃ = 40 kg N ha⁻¹ (15[†]+25 ó 15+25[†]); T₄ = Abono verde mucuna (AV[†]_m); T₅ = Abono verde crotalaria (AV[†]_c); T₆ = AV_m + 40N (AV[†]_m+15+25; AV_m+15[†]+25 ó AV_m+15+25[†]); T₇ = AV_c + 40N (AV[†]_c+15+25; AV_c+15[†]+25 ó AV_c+15+25[†]). († representa el marcado con ¹⁵N). Inicialmente se cultivaron las leguminosas en las unidades experimentales de los tratamientos correspondientes a T₄, T₅, T₆ y T₇, siendo simultáneamente producidas leguminosas marcadas con ¹⁵N en una área adyacente al ensayo, utilizando urea-¹⁵N con 10% de enriquecimiento. Las leguminosas se cortaron después de la floración y la paja se mantuvo en sus unidades experimentales, y se incorporaron al suelo antes de la siembra de arroz, en diciembre de 1997. El fertilizante nitrogenado se aplicó fraccionadamente (15+25 ó 30+50 kg N ha⁻¹). Tanto urea-¹⁵N (5% ¹⁵N) como las

leguminosas-¹⁵N, se aplicaron en sub-parcelas dentro de cada parcela principal. Se demostró que las leguminosas son una buena alternativa como fuente de N, siendo equivalente o superior a la aplicación de 40 kg N ha⁻¹ como urea para la producción de grano. La producción obtenida con la combinación de Mucuna (AV_m) y 40 kg ha⁻¹ N superó lo obtenido con la dosis de 80 kg N ha⁻¹. Ambas proporcionaron prácticamente la misma cantidad de N para el arroz (26 y 25% del N en el grano proveniente de la mucuna y crotalaria, respectivamente, en Pindorama y 38 y 37%, en Votuporanga). Estas leguminosas pueden suplir una cantidad relativamente grande de N (149 kg N ha⁻¹, Crotalaria y 362 kg N ha⁻¹, Mucuna). Los abonos verdes proporcionaron mejor uso del N del fertilizante, sobre todo en las aplicaciones de cobertura, permitiendo una eficiencia de hasta 79%.

Palabras clave: ¹⁵N, mucuna, crotalaria, fontes de N, arroz, eficiencia de N.

SUMMARY

Experiments were carried out in two sites (Pindorama and Votuporanga, SP, Brasil, Red yellow podzolic and Dark red latosol, respectively) to evaluate: a) the efficiency of the legumes crotalaria (*Crotalaria juncea*) and mucuna (*Mucuna aterrima*), used as green manure, in supplying N, to rice; b) the interaction of N of fertilizer and of green manure on N utilization by rice; and c) the effect of split application of nitrogen fertilizer on N utilization efficiency of rice. The following treatments were considered: T₁ = control; T₂ = 80 kg N ha⁻¹ (30[†]+50 or 30+50[†]); T₃ = 40 kg N ha⁻¹ (15[†]+25 or 15+25[†]); T₄ = mucuna green manure (GM[†]_m); T₅ = crotalaria green manure (GM[†]_c); T₆ = GM_m + 40 (GM[†]_m+15+25; GM_m+15[†]+25 or GM_m+15+25[†]); T₇ = GM_c + 40 (GM[†]_c+15+25; GM_c+15[†]+25 or GM_c+15+25[†]). († represents green manure or urea labeled with ¹⁵N). Initially the legumes were grown in separate plots (T₄, T₅, T₆, and T₇) and labeled legume plants were produced simultaneously

¹ Proyecto ARCAL XXII, OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica).

² CENA - USP Piracicaba, SP, Brasil. (Muraoka@cena.usp.br).

³ IAC (Campinas, SP, Votuporanga, SP y Pindorama, SP).

⁴ IAEA, Vienna, Austria.

⁵ EMBRAPA, CFACT, Pelotas, RS.

Recibido: Enero de 2001. Aceptado: Diciembre de 2001.

Publicado en Terra 20: 17-23.

in an area adjacent to the experiment, using urea- ^{15}N with 10% ^{15}N enrichment. The legume plants were cut after flowering and left on the soil surface and incorporated into the soil before rice sowing. The nitrogen fertilizer (urea) was split, at seeding and after 30 days (15 + 25 or 30 + 50 kg N ha $^{-1}$). The legumes showed to be a good N source, being equivalent or superior to the application of 40 kg N ha $^{-1}$ as urea for rice grain production. The grain yield obtained with the combination of GM $_m$ and 40 kg N ha $^{-1}$ as urea surpassed that obtained with 80 kg N ha $^{-1}$ as urea. Both legumes provided practically the same amount of N to rice (26 and 25% of N in the grain derived from the mucuna and crotalaria, respectively, in Pindorama, and 38 and 37% in Votuporanga). These legumes can supply relatively large amounts of N (149 kg N ha $^{-1}$, crotalaria and 362 kg N ha $^{-1}$, mucuna). The green manure permitted better use of N fertilizer, mainly when the second application was done, reaching an efficiency as high as 79%.

Index words: ^{15}N , mucuna, crotalaria, N sources, rice, N efficiency

INTRODUCCION

Con la práctica de abono verde es posible recuperar la fertilidad del suelo, proporcionando aumento del contenido de materia orgánica, de la capacidad de intercambio catiónico y de la disponibilidad de macro y micronutrientes; formación y estabilización de agregados; mejoramiento de la infiltración de agua y aeración; disminución diurna de la amplitud de la variación térmica; control de nemátodos y, en el caso de leguminosas, incorporación al suelo de nitrógeno, efectuado a través de la fijación biológica (Igue, 1984).

En el Brasil, los abonos verdes se han utilizado por más de 30 años, con resultados positivos en las más diversas condiciones de producción, con relación al suplemento de N para el cultivo de maíz, después de soya (Mascarenhas *et al.*, 1986), algodón después de la soya y caña de azúcar después de la soya (Mascarenhas *et al.*, 1994), en áreas de renovación, y maíz después de tremoso (*Lupinus albus* L.) (Kanthack *et al.*, 1991; Tanaka *et al.*, 1992).

En los estudios sobre la dinámica de nitrógeno en el sistema suelo-planta, muchas veces es difícil distinguir el origen de este elemento en la planta, que puede ser de la atmósfera o del suelo, el cual se

encuentra en distintas formas orgánicas o inorgánicas. Con el uso de ^{15}N puede determinarse con precisión las rutas que el N sigue en el sistema.

Desde los trabajos de Broadbent y Nakashima (1974), pioneros en marcación de abono verde con ^{15}N , se han realizado diversos estudios para cuantificar la capacidad del abono verde para suplir con N el cultivo subsiguiente (Ladd *et al.*, 1981).

En Brasil, Silva (1991) obtuvo resultados sorprendentes, estimó 42% de aprovechamiento del N del abono verde (*Mucuna*) por el arroz. No obstante, Assis (1992) observó que *Sesbania*, a pesar de ser considerada un abono verde bastante promisor, por fijar N por la raíz y por el tallo (Dreyfus e Dommergues, 1981), presenta baja eficiencia (< 5.81% de utilización) en arroz.

Recientemente, Ambrosano (1995) obtuvo valores cercanos a 20% de utilización de N para crotalaria y mucuna por el cultivo de maíz.

Usando ^{15}N , Ribeiro (1996) constató que la mineralización del abono verde depende de la especie, siendo rápida para *Pueraria* (15 días). La mucuna se mineralizó lentamente (60 días). Assis (1992), usando ^{15}N , comprobó que la incubación por más de dos meses no favoreció el aprovechamiento del N en maíz proveniente de *Sesbania*.

Sin embargo, todos los estudios brasileños con ^{15}N se realizaron en macetas y condiciones de invernadero. El único dato obtenido en condiciones de campo es de Scivittaro (1998), quien encontró que la contribución de abono verde mucuna fue 10% eficiente en maíz.

Los objetivos de este trabajo fueron: a) evaluar en condiciones de campo, la capacidad de las leguminosas crotalaria (*Crotalaria juncea*) y mucuna (*Mucuna atterrima*) para suplir con N el cultivo de arroz; b) evaluar el efecto de fraccionamiento del fertilizante nitrogenado en la eficiencia de utilización de N por el cultivo de arroz; y c) estudiar la interacción del N del fertilizante y del N de los abonos verdes en la utilización del N por el arroz.

MATERIALES Y METODOS

Procedimiento Experimental

Los experimentos se realizaron en Pindorama (suelo Pozólico rojo) y en Votuporanga (suelo Latosol rojo oscuro), en las respectivas estaciones experimentales del Instituto Agronómico de São Paulo (IAC). Los tratamientos fueron los siguientes:

Tratamientos experimentalesT₁ = TestigoT_{2A} = 80 kg N ha⁻¹ (30[†]+50)T_{2B} = 80 kg N ha⁻¹ (30+50[†])T_{3A} = 40 kg N ha⁻¹ (15[†]+25)T_{3B} = 40 kg N ha⁻¹ (15+25[†])T₄ = abono verde 1 ([†]AV₁)T₅ = abono verde 2 ([†]AV₂)T_{6A} = [†]AV₁ + 40 kg N ha⁻¹ (15+25)T_{6B} = AV₁ + 40 kg N ha⁻¹ (15[†]+25)T_{6C} = AV₁ + 40 kg N ha⁻¹ (15+25[†])T_{7A} = [†]AV₂ + 40 kg N ha⁻¹ (15+25)T_{7B} = AV₂ + 40 kg N ha⁻¹ (15[†]+25)T_{7C} = AV₂ + 40 kg N ha⁻¹ (15+25[†])Abono verde 1 (mucuna-preta, *Mucuna aterrima*).Abono verde 2 (crotalaria, *Crotalaria juncea*).[†]15, [†]30, 25[†], [†]50, [†]AV₁, [†]AV₂ = representa urea o leguminosa marcada con ¹⁵N.T₃ corresponde a la dosis recomendada por el Instituto Agronómico de São Paulo (IAC).

Inicialmente, las leguminosas (crotalaria y mucuna) se sembraron en marzo de 1997, en todas las unidades experimentales respectivas, con excepción de T₁, T₂, T₃ y T₈. En área próxima, se produjeron plantas de leguminosas, abonos verdes marcados con ¹⁵N utilizando urea-¹⁵N 10%. El suelo se encaló antes de la siembra.

En la época de floración, las leguminosas se cortaron y se incorporaron al suelo en las unidades experimentales.

Las plantas que fueron marcadas con ¹⁵N (Cuadro 1) se colocaron en subparcelas de 1 m² demarcadas dentro de cada parcela correspondiente, después de retirar las plantas sin marcaciones.

El arroz se sembró en diciembre (cultivar IAC-25) en todas las unidades experimentales, que también

recibieron fertilizantes P y K (100 kg P₂O₅ y 60 kg K₂O ha⁻¹), así como nitrógeno (urea-¹⁵N) en los tratamientos correspondientes.

El N se fraccionó en dos aplicaciones, 30 kg N en la siembra y 50 kg a 35 días (T₂) y 15 kg en la siembra y 25 kg N ha⁻¹ a 35 días (T₃). Para la aplicación de ¹⁵N se utilizaron subparcelas de 1, 2 ó 3 m² por cada parcela. Se utilizó urea-¹⁵N con 5% de enriquecimiento.

Las plantas de arroz se cosecharon después de completar su ciclo con, aproximadamente, 120 días. Los granos se separaron de la paja, se pesaron y los resultados se convirtieron en kg ha⁻¹. Después de pesados, se retiraron muestras para análisis de nitrógeno y otros nutrimentos, relación C/N y ¹⁵N.

Las concentraciones de N se determinaron por digestión–destilación semi-microkjeldahl (Bremner y Malvaney, 1982) y la abundancia de ¹⁵N (átomos %) por espectrometría de masa, siguiendo el método de preparación de muestras de Trivelin *et al.* (1973).

Análisis Estadístico

Para los valores de productividad, el diseño experimental utilizado fue en bloques al azar, con cuatro repeticiones. Se realizó un análisis de varianza por localidad y un análisis conjunto de las dos localidades. Las medias se comprobaron con la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$).

En los casos de las variables N, Nddf y EUF, como la interacción tratamiento x localidad dio significativas, los tratamientos se compararon en cada localidad, individualmente por la prueba Duncan ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 1. Características químicas y cantidad de material de las leguminosas crotalaria y mucuna producidas y utilizadas como abono verde.

Leguminosas	Nutrimentos													
	¹⁵ N %	N	P	K	Ca	Mg	S	C	C/N	Fe	Cu	Mn	Zn	MS
					g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹			kg ha ⁻¹
Votuporanga														
Crotalaria	0.628	16.90	2.11	12.99	5.35	2.73	1.15	459	27	256	5.36	47	30	8835
Mucuna	0.654	28.19	2.73	14.95	10.83	3.12	1.75	449	16	365	9.96	75	33	12850
Pindorama														
Crotalaria	0.559	16.68	1.74	13.58	6.38	2.93	1.23	455	27	463	4.94	144	33	2135
Mucuna	0.616	26.27	2.57	17.12	13.70	3.72	3.50	474	18	347	13.59	270	45	5750

MS = matéria seca (fitomasa).

RESULTADOS Y DISCUSION

Producción de Grano y Paja

En Votuporanga, el incremento de grano y paja debido a la fertilización nitrogenada fue bastante significativo en ambas localidades, de 37% con 40 kg N ha⁻¹ y 74% con 80 kg N ha⁻¹ en relación con el testigo. En Pindorama, el efecto fue mayor, siendo de 52% y 101%, con 40 y 80 kg N ha⁻¹, respectivamente (Cuadros 2 y 3)

El efecto de los abonos verdes también fue considerable, equivalente al obtenido con la aplicación de 40 kg N ha⁻¹.

En Votuporanga, la mucuna y crotalaria proporcionaron 34 y 36% de incremento en la producción de grano, respectivamente, sobre el testigo. En Pindorama, como sucedió con urea, el efecto de los abonos verdes fue mayor, 53% para mucuna y 80% para crotalaria.

En Votuporanga, cuando se combinó fertilizante nitrogenado (40 kg N ha⁻¹) y abonos verdes, el efecto fue aditivo, proporcionando un incremento de 92% para mucuna y de 66% para crotalaria. En Pindorama, se obtuvo 116% para mucuna y 71% para crotalaria, superando el tratamiento con 80 kg N ha⁻¹, como urea.

El efecto más pronunciado, ocurrido en Pindorama, puede explicarse por la mayor eficiencia de utilización del N de urea y de los abonos verdes, como se describe adelante.

Utilización de N de los Abonos Verdes

Los datos relativos a cantidad total de N contenido en grano y paja; N en la planta (grano y paja) derivado del fertilizante (urea y abono verde) (Nddf) y eficiencia de utilización de N del cultivo (EUN), se encuentran en los Cuadros 4 y 5.

Los datos comparativos de ambos sitios se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 2. Efecto de abonos verdes (mucuna y crotalaria) aplicados solos o conjuntamente con urea en la producción de arroz (grano), cultivado en dos localidades.

Tratamiento	Localidad		Promedio Análisis conjunto
	Votuporanga	Pindorama	
T ₁ 0 (kg N ha ⁻¹) testigo	1830	1936	1883 d [†]
T ₂ 80 (30+50) (kg N ha ⁻¹)	3183	3900	3542 ab
T ₃ 40(15+25) (kg N ha ⁻¹)	2513	2944	2727 c
T ₄ abono verde Mucuna (AV _m)	2459	3080	2770 c
T ₅ abono verde Crotalaria (AV _c)	2480	3495	2988 bc
T ₆ AV _m + N (15+25) (kg N ha ⁻¹)	3517	4183	3850 a
T ₇ AV _c + N (15+25) (kg N ha ⁻¹)	3034	3314	3174 bc
CV (%)	18.72	19.62	19.34

Medias seguidas por letras distintas difieren entre sí por la prueba de Duncan (P < 0.05).

Los valores entre paréntesis en las columnas de grano corresponden al incremento en relación con el testigo.

[†] Incremento en relación con el testigo.

[†] Promedio de dos localidades.

Cuadro 3. Efecto de abonos verdes (mucuna e crotalaria) aplicados solos o juntamente con urea en la producción de arroz (paja), cultivado en dos localidades.

Tratamiento	Localidad		Promedio Análisis conjunto
	Votuporanga	Pindorama	
T ₁ 0 (kg N ha ⁻¹) testigo	500	565	533 b [†]
T ₂ 80 (30+50) (kg N ha ⁻¹)	885	950	918 a
T ₃ 40(15+25) (kg N ha ⁻¹)	388	825	607 b
T ₄ abono verde Mucuna (AV _m)	677	945	811 a
T ₅ abono verde Crotalaria (AV _c)	1075	1065	1068 a
T ₆ AV _m + N (15+25) (kg N ha ⁻¹)	1470	1075	1273 a
T ₇ AV _c + N (15+25) (kg N ha ⁻¹)	795	1195	995 a
CV (%)	11.15	4.60	8.81

Medias seguidas por letras distintas difieren entre sí por la prueba de Duncan (P < 0.05).

[†] Promedio de dos localidades.

Cuadro 4. Efecto de abonos verdes (mucuna y crotalaria) aplicados solo o conjuntamente con urea en el contenido del nitrógeno y eficiencia de la utilización del N (EUF) en arroz cultivado en Pindorama.

Tratamiento (kg N ha ⁻¹)	Contenido de N			%	N _{dur}			EUN	
	Grano kg N ha ⁻¹	Paja kg N ha ⁻¹	Total kg N ha ⁻¹		Grano kg N ha ⁻¹	Paja kg N ha ⁻¹	Total kg N ha ⁻¹	Por apl.	Total
T ₁ 0 testigo	20.08 d	3.25 c	23.33 d						
T ₂ A 80 (30 ¹ +50) urea	47.10 ab	6.20 b	53.30 ab	14.87	6.97 d	15.89	0.96 de	7.93 d	26.45 f
B (30 + 50 ¹) urea				31.99	15.45 a	29.23	2.47 ab	17.92 a	35.85 c
T ₃ A 40 (15 ¹ +25) urea	34.34 c	5.44 b	39.74 c	11.84	4.06 e	12.62	0.69 ef	4.75 e	31.67 de
B (15 + 25 ¹) urea				32.56	11.29 bc	27.89	1.65 bc	12.93 b	51.74 b
T ₄ Mucuna (151)	40.03 bc	5.66 b	45.69 bc	26.08	10.47 bc	22.62	1.27 cd	11.74 bc	7.77 g
T ₅ Crotalaria (35.6)	42.86 bc	6.51 ab	49.37 bc	25.48	11.99 b	19.91	1.29 cd	13.28 b	37.31 e
T ₆ A Mucuna ¹ (15+25) urea	52.04 a	6.87 ab	58.91 a	18.26	8.89 cd	12.21	0.84 de	9.73 cd	6.44 g
B Mucuna (15 ¹ +25) urea				8.86	4.58 e	9.40	0.59 f	5.17 e	34.49 cd
C Mucuna (15+25 ¹) urea				35.55	17.48 a	32.92	2.32 ab	19.20 a	79.19 a
T ₇ A Crotalaria ¹ (15+25) urea	45.64 ab	8.34 a	53.98 ab	18.36	8.87 cd	18.30	1.41 cd	10.28 c	28.87 ef
B Crotalaria (15 ¹ +25) urea				8.11	3.63 e	7.81	0.48 f	4.10 e	27.37 ef
C Crotalaria (15+25 ¹) urea				38.37	16.09 a	32.26	2.71 a	18.80 a	75.19 a

T¹15N.

Medias seguidas por letras distintas difieren entre sí de acuerdo con la prueba de Duncan (P < 0.05).

EUN apl. = calculada con base en la cantidad de N ha⁻¹ aplicada parcelada (15, 25, 30 ó 50).EUN total = calculada con base en la dosis de N ha⁻¹ total (40 ó 80).**Cuadro 5. Efecto de abonos verdes (mucuna y crotalaria) aplicados solo o conjuntamente con urea en el contenido del nitrógeno y eficiencia de la utilización del N (EUF) en arroz cultivado en Votuporanga.**

Tratamiento (kg N ha ⁻¹)	Contenido de N			%	N _{dur}			EUN	
	Grano kg N ha ⁻¹	Paja kg N ha ⁻¹	Total kg N ha ⁻¹		Grano kg N ha ⁻¹	Paja kg N ha ⁻¹	Total kg N ha ⁻¹	Por apl.	Total
T ₁ 0 testigo	20.08 c	3.56 e	23.64 c						
T ₂ A 80 (30 ¹ +50) urea	39.97 a	7.50 abc	47.47 a	11.22	4.53 cd	11.47	0.88 c	5.41 cd	18.03 c
B (30 + 50 ¹) urea				16.86	7.23 b	12.29	0.98 bc	8.21 b	16.41 c
T ₃ A 40 (15 ¹ +25) urea	29.78 b	4.25 d	34.03 b	4.31	1.28 f	3.74	0.16 f	1.44 f	9.57 d
B (15 + 25 ¹) urea				14.71	4.08 cd	7.90	0.35 e	4.43 cd	17.69 c
T ₄ Mucuna ¹	29.17 b	4.98 cd	34.15 b	38.09	11.18 a	25.92	1.29 b	12.47 a	3.42 e
T ₅ Crotalaria ¹	31.02 b	5.32 bcd	36.34 a	37.50	11.30 a	34.50	1.82 a	13.12 a	9.97 d
T ₆ A Mucuna ¹ (15+25) urea	40.32 a	6.50 abcd	46.82 a	29.50	12.50 a	17.45	1.29 b	13.79 a	3.95 e
B Mucuna (15 ¹ +25) urea				8.86	3.57 de	6.80	0.42 de	3.99 de	26.62 b
C Mucuna (15+25 ¹) urea				35.15	14.86 a	9.13	0.60 d	15.46 a	61.85 a
T ₇ A Crotalaria ¹ (15+25) urea	41.86 a	6.56 abcd	48.42 a	23.61	10.60 a	26.53	2.21 c	12.67 a	8.54 d
B Crotalaria (15 ¹ +25) urea				6.48	2.71 e	6.30	0.42 de	3.13 e	20.86 bc
C Crotalaria (15+25 ¹) urea				13.75	5.85 bc	6.59	0.55 d	6.40 bc	25.58 b

T¹15N.

Medias seguidas por letras distintas difieren entre sí de acuerdo con la prueba de Duncan (P < 0.05).

EUN apl. = calculada con base en la cantidad de N ha⁻¹ aplicada parcelada (15, 25, 30 ó 50).EUN total = calculada con base en la dosis de N ha⁻¹ total (40 ó 80).

Se observa que, en Pindorama, la eficiencia fue mejor en todos los tratamientos.

Los abonos verdes, además de ser fuente de N y otros nutrimentos para el arroz, como se demostró en trabajos anteriores (Silva, 1991; Assis, 1992; Ribeiro, 1996), parecen presentar "efecto priming" (liberación de N del suelo debido a la aplicación de abono verde). Por lo tanto, comparando las EUN del tratamiento T₃,

aplicación de 40 kg N ha⁻¹, parcelada en dos aplicaciones (15 y 25 kg N ha⁻¹), con los de T₆ y T₇ (misma dosis de N combinada con abonos verdes) puede constatar que, en Pindorama, las EUNs aumentaron de 32% (dosis de 15 kg N ha⁻¹) y 52% (dosis de 25 kg N ha⁻¹) a 34% y 79% con mucuna y 27% y 75% con crotalaria, aunque fue negligible en la aplicación a la siembra. Ya en Votuporanga, estos

Cuadro 6. Comparación de la eficiencia de utilización del N (EUN) en maíz cultivado en Pindorama y Votuporanga.

Tratamiento	EUN	
	Pindorama	Votuporanga
	----- % -----	
T ₁ 0	-	-
T ₂ A 80 (30 [†] +50)	26.45	18.03
B (30 + 50 [†])	35.85	16.41
(A+B)	(32.31)	(17.02)
T ₃ A 40 (15 [†] +25)	31.67	9.57
(15 + 25 [†])	52.49	17.69
(A+B)	(44.67)	(14.67)
T ₄ Mucuna	7.77	3.42
T ₅ Crotalaria	37.36	9.97
T ₆ A Mucuna [†] (+15+25)	6.44	3.95
B Mucuna (+15 [†] +25)	35.62	26.62
C Mucuna (+15+25 [†])	79.84	61.85
(B + C)	(63.25)	(48.25)
T ₇ A Crotalaria [†] (+15+25)	28.87	8.54
B Crotalaria (+15 [†] +25)	28.56	20.86
C Crotalaria (+15+25 [†])	76.52	25.58
(B + C)	(58.52)	(23.82)

Los números entre paréntesis en la columna de tratamientos son las cantidades de N aplicadas parceladas, [†] denotando urea-¹⁵N. Los números entre paréntesis en la columna de EUN son los valores de EUN calculados con base en toda la dosis, o sea 80 ó 40 kg N ha⁻¹.

incrementos fueron más visibles, de 10% (dosis de 15 kg N ha⁻¹) y 18% (dosis de 25 kg N ha⁻¹) para 27% y 62%, respectivamente, con la mucuna y 21% y 26% con crotalaria. Considerando la dosis total de 40 kg N ha⁻¹, la eficiencia de urea fue de 15% en Votuporanga, con la presencia de abonos verdes subieron hasta 49% (con mucuna) y 24% (crotalaria). En Pindorama, igualmente el efecto fue considerable, aumentando de 44% a 62% (mucuna) y 57% (crotalaria). Este efecto positivo de los abonos verdes probablemente se debió al "efecto priming", al mejoramiento de las condiciones físicas del suelo por el aumento de la materia orgánica, y al aumento de las actividades microbiológicas, lo cual pudo haber contribuido a la reducción de pérdida del N del fertilizante por lixiviación o volatilización.

Considerando las cantidades de N añadidas por los abonos verdes (mucuna 151 kg N ha⁻¹ y crotalaria 35.6 kg N ha⁻¹ en Pindorama; mucuna 362 kg N ha⁻¹ y crotalaria 149 kg N ha⁻¹ en Votuporanga) y las relaciones C/N más estrechas (Cuadro 1), se esperaba mejor efecto de la mucuna. Sin embargo, no hubo diferencia entre ambos en Pindorama, siendo que en Votuporanga, aunque sin significancia estadística, la producción de grano con crotalaria fue más alta.

Probablemente, la crotalaria presenta su N en forma más disponible, como puede observarse en la eficiencia de utilización, 3% con la mucuna contra 10% con la crotalaria, en Votuporanga y 8% con la mucuna y 37% con crotalaria, en Pindorama. Las leguminosas contribuyeron con 38% (mucuna) y 37% (crotalaria) del N del arroz en Votuporanga y 26% (mucuna) y 25% (crotalaria) en Pindorama.

CONCLUSIONES

Las leguminosas mucuna y crotalaria, usadas como abonos verdes, tuvieron efecto equivalente a fertilización de 40 kg N ha⁻¹ como urea. Son por lo tanto, una buena alternativa como fuente de nitrógeno.

Estas leguminosas presentan características distintas como fuente del nitrógeno. La mucuna, produce más materia seca y contiene más nitrógeno, proporcionando hasta 362 kg N ha⁻¹, más del doble que crotalaria (149 kg N ha⁻¹). El nitrógeno de crotalaria, parece ser más fácilmente disponible, pues la contribuciones de ambas en termo de contenido del nitrógeno (Nddf) fue igual.

Los abonos verdes proporcionaron mejor uso del nitrógeno del fertilizante ("efecto priming"), sobre todo en la aplicación de cobertura, favoreciendo una eficiencia de hasta 79%.

LITERATURA CITADA

- Ambrosano, E. 1995. Dinâmica do nitrogênio dos adubos verdes, *Crotalaria juncea* (*Crotalaria juncea*) e mucuna-preta (*Mucuna aterrima*) em dois solos cultivados com milho. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP. Piracicaba, Brasil.
- Assis, V.L.G. de. 1992. Uso de *Sesbania rostrata* Brem como fonte de nitrogênio para o arroz irrigado. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP. Piracicaba, Brasil.
- Bremner, J.M. y C.S. Malvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-624. In: A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. 2a ed. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Broadbent, F.E. y T. Nakashima. 1974. Mineralization of carbon and nitrogen in soil amended with of carbon-13 and nitrogen-15 labeled plant material. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38: 313-315.
- Dreyfus, B. y Y. Dommergues. 1981. Stem nodules on the tropical legume *Sesbania rostrata*. p. 471. In: A.H. Gibson y W.E. Newton (eds.). Current perspectives in nitrogen fixation. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Igue, K. 1984. Dinâmica da matéria orgânica e seus efeitos na propriedade do solo. pp. 232-267. In: Adubo verde no Brasil. Fundação Cargill, Campinas, SP. Brasil.

- Kanthack, R.A.D., H.A.A. Mascarenhas, O.M. de Castro y R.T. Tanaka. 1991. Nitrogênio aplicado em cobertura no milho após tremoço. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 26(1): 99-104.
- Ladd, J.N., J.M. Oades y D. Amato. 1981. Distribution and recovery of nitrogen from legumes residues decomposing in soils sown to wheat in the field. *Soil Biol. Biochem.* 13: 251-256.
- Mascarenhas, H.A.A., R. Hiroce, N.R. Braga, M.A.C. de Miranda, E.A. Bulisani, C.A. Pommer, E. Sawazaki, E. Gallo y J.C.V.N.A. Pereira. 1986. Efeito do nitrogênio residual de soja na produção de milho. (Boletim técnico 58). Instituto Agrônômico de Campinas.
- Mascarenhas, H.A.A., R.T. Tanaka, A.A. Costa, F.V. Rosa y V.F. Costa. 1994. Efeito residual das leguminosas sobre o rendimento físico e econômico da cana-planta. (Boletim científico 32). Campinas, Instituto Agrônômico.
- Ribeiro, G. de A. 1996. Efeito de períodos de incubação de adubos verdes (mucuna e puerária) na liberação de nitrogênio (^{15}N) e enxofre (^{35}S) para o arroz. Dissertação de Mestrado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP. Piracicaba, Brasil.
- Scivittaro, W.B. 1998. Utilização de nitrogênio (^{15}N) e enxofre (^{35}S) do adubo verde mucuna-preta pelo milho. Piracicaba. Tese de Doutorado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP. Piracicaba, Brasil.
- Silva, R. 1991. Potencial da mucuna-preta como adubo verde para o arroz de sequeiro em Latossolo amarelo da Amazonia. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP. Piracicaba, Brasil.
- Tanaka, R.T., H.A.A. Mascarenhas, O.S. Dias, C. Campidelli y E.A. Bulisani. 1992. Cultivo da soja após incorporação de adubo verde e orgânico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 27(11): 1477-1483.
- Trivelin, P.C.O., E. Satati y E. Matsui. 1973. Preparo de amostras para análise de ^{15}N por espectrometria de massa. (Boletim técnico 2). Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Piracicaba, Brasil.

DINÂMICA DO ENXOFRE (^{35}S) PROVENIENTE DA MUCUNA-PRETA EM UM SISTEMA SOLO-PLANTA¹

Fate of Sulfur (^{35}S) from Velvet Bean Green Manure in a Soil-Plant System

Walkyria Bueno Scivittaro², Takashi Muraoka³ e Antonio Enedi Boaretto³

RESUMO

Os adubos verdes constituem importante fonte de enxofre para as plantas; sua eficiência depende do estabelecimento de sistemas de manejo de culturas onde os períodos de liberação do nutriente pelos adubos verdes e os de maior demanda por culturas subsequentes coincidam. Realizou-se, sob condições de casa de vegetação, um experimento para estudar a capacidade e o padrão temporal de fornecimento de enxofre da mucuna-preta em um sistema solo-planta. Os tratamentos, dez períodos de incubação (0, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210 e 240 dias) do solo com mucuna-preta marcada com ^{35}S (2,2 g kg⁻¹ de solo) e uma testemunha sem adição do adubo verde, foram dispostos em delineamento inteiramente ao acaso, com quatro repetições. As unidades experimentais foram constituídas por vasos contendo 2 kg de terra, onde foram cultivadas 4 plantas de arroz cultivar IAC-165 por 39 dias. A contribuição do enxofre da mucuna-preta para o total do nutriente acumulado nas plantas de arroz foi, em média, de 9,7%. O aproveitamento do enxofre da mucuna-preta pelas plantas de arroz diminuiu com o aumento do período de incubação. A maior parte do enxofre do adubo verde, em média 80%, permaneceu no solo após o cultivo do arroz. A recuperação do enxofre da mucuna-preta no sistema solo-planta diminuiu com o prolongamento do período de incubação, indicando que quanto mais cedo for realizado o plantio, após a incorporação desse adubo verde, menores serão as perdas de enxofre do sistema.

¹ Trabalho financiado pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

² Embrapa Clima Temperado. BR 392 km 78. Caixa Postal 403 CEP: 96001-970-Pelotas, RS. (sac@cpact.embrapa.br)

³ Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP). Av. Centenário 303. Caixa Postal 96 CEP: 13400-970-Piracicaba, SP.

Recibido: Enero de 2001. Aceptado: Diciembre de 2001.
Publicado en Terra 20: 25-32.

Palavras-chave: Adubação verde, Mucuna aterrima, eficiência, recuperação, perdas.

SUMMARY

Green manures are an important source of sulfur for plants. Its efficiency depends on the establishment of culture management systems where the release periods of nutrients from green manures coincide with greater demand periods of subsequent crops. A greenhouse experiment was carried out for evaluating the capacity and temporal pattern of velvet bean green manure in supplying sulfur to rice plants and to study the fate of the sulfur from velvet bean green manure in a soil-plant system. The treatments consisted of a control and 10 incubation periods of soil with ^{35}S labeled velvet bean (0, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210, and 240 days). The incubation of dry plant material (2.2 g kg⁻¹ soil) was initiated with the longest period in order to coincide with the test crop (rice) planting for all treatments, at zero time. A completely randomized experimental design with 11 treatments and four replicates was used. Pots with 2 kg soil were used as the experimental plots and four rice plants were grown in each pot for 39 days. Green manure contribution to the sulfur accumulated by rice plants was, on average, 9.7%. Sulfur utilization from velvet bean decreased with increases in the duration of incubation. More than 80% of the green manure sulfur remained in the soil after rice cultivation. Green manure sulfur recovery in the soil-plant system decreased with increases in the incubation period.

Index words: Green manure, Mucuna aterrima, efficiency, recovery, losses.

INTRODUÇÃO

O uso de adubos verdes como fonte de nitrogênio para as culturas há muito foi estabelecido. Porém, em adição ao nitrogênio, os adubos verdes contêm outros nutrientes, em formas orgânicas lábeis, que podem se tornar disponíveis para culturas subsequentes, mediante mineralização.

Na região tropical, o conhecimento do potencial de fornecimento de enxofre dos adubos verdes assume particular importância, pelo fato de seus solos apresentarem baixa disponibilidade natural de enxofre (Neptune *et al.*, 1975) e pelo aumento da incidência de casos de deficiência desse nutriente (Vitti, 1986). Além disso, a matéria orgânica, principal fonte de enxofre do solo, tem se mostrado, de forma geral, pouco eficiente no fornecimento do nutriente para as plantas. Por outro lado, o enxofre contido em resíduos de vegetais recém-incorporados ao solo é indicado como uma das mais importantes fontes de S para as plantas (Goh & Gregg, 1982) por sua capacidade de reciclar o nutriente contido no solo.

Poucos são os resultados de pesquisa disponíveis que tratam da avaliação do potencial de fornecimento de enxofre de adubos verdes (Till & Blair, 1978; Goh & Gregg, 1980; Chapman, 1987; Dhillon & Dhillon, 1991; Ribeiro, 1996).

Till & Blair (1978) verificaram efeito da temperatura sobre a recuperação de enxofre (^{35}S) de *Trifolium repens* pela gramínea *Axonopus affinis*. As porcentagens do S aplicado recuperadas na parte aérea de *A. affinis* foram de 3,9% e 9,3% e nas raízes, de 4,6% e 5,6%, para temperaturas diurno/noturnas de 15/10 °C ou 28/22 °C, respectivamente. Por sua vez, Goh & Gregg (1980), utilizando *Lolium perenne* como planta teste, constataram variações de 7% a 20% no aproveitamento do enxofre (^{35}S) contido em resíduos de *L. perenne* ou *T. repens*, aplicados a diferentes solos. As variações observadas foram atribuídas a diferenças na composição, na quantidade e na granulometria dos materiais utilizados, bem como no tipo de solo.

Em experimento realizado em casa de vegetação, com um solo deficiente em enxofre, Chapman (1987) verificou que 27% do enxofre (^{35}S) presente nos tecidos de *Lolium perenne* foram fornecidos por resíduos frescos da mesma gramínea incorporados ao solo. A quantidade de S fornecida pelos resíduos não supriu as necessidades de enxofre da planta teste, que apresentou deficiência do nutriente. Por outro lado, Dhillon & Dhillon (1991) relataram contribuição significativa do enxofre contido nos adubos verdes *Vigna sinensis* e *Cyamopsis tetragonoloba* para a nutrição de *Brassica campestris*, destacando-se o desempenho de *V. sinensis*. Verificou-se que o uso dos adubos verdes, combinado ou não com sulfato de potássio, promoveu maiores rendimento e absorção de enxofre por *B. campestris* que os obtidos com o uso exclusivo de sulfato de potássio. A combinação com

uma fonte mineral de enxofre diminuiu o percentual do nutriente na planta derivado do adubo verde.

O aproveitamento do enxofre contido nos adubos verdes mucuna-preta (*Mucuna aterrima*) e puerária (*Pueraria phaseoloides*) por plantas de arroz foi influenciado pelo período de incubação (zero a 90 dias) do solo com esses adubos verdes, variando de 3,8% a 7,4% e de 2,2% a 4,5% para a mucuna-preta e puerária, respectivamente (Ribeiro, 1996).

A eficiência de utilização do enxofre contido nos adubos verdes é influenciada pelo sistema de manejo de culturas adotado. Este deve ser definido com base em informações sobre os padrões temporais de mineralização do nutriente, permitindo o estabelecimento de sistemas de manejo onde os períodos de liberação do enxofre contido no adubo verde e os de maior demanda por culturas subseqüentes sejam sincronizados, maximizando a eficiência da utilização do nutriente.

Desenvolveu-se um experimento para avaliar a capacidade e o padrão temporal de fornecimento de enxofre contido no adubo verde mucuna-preta e estudar a dinâmica do enxofre nele contido em um sistema solo-planta.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado sob condições de casa de vegetação, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP), em Piracicaba, SP, de abril 1994 a setembro 1995. Compreendeu uma fase preliminar, para produção de mucuna-preta (*Mucuna aterrima*) marcada com ^{35}S , que foi incorporada a amostras de solo, cultivando-se, em seguida, arroz. Utilizou-se amostra superficial (0-20 cm) de um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 1999), com a seguinte composição química: 1,4 g kg⁻¹ de N (Parkinson & Allen, 1975); 21 g dm⁻³ de matéria orgânica; pH (CaCl₂) de 4,4; 59 mmol_c dm⁻³ de H+Al; 52 mg dm⁻³ de P; 4,3 mmol_c dm⁻³ de K; 20 mmol_c dm⁻³ de Ca; 13 mmol_c dm⁻³ de Mg (Raij *et al.*, 1987) e 147 mg kg⁻¹ de S (Tabatabai, 1982).

A mucuna-preta marcada com ^{35}S foi produzida em vasos contendo 5,0 kg de terra fina seca ao ar. Aos vasos foi aplicado superfosfato triplo, na dose de 320 mg kg⁻¹ de P e, em seguida, realizou-se a semeadura da mucuna-preta, utilizando-se 6 sementes por vaso. Dez dias após a emergência das plantas, efetuou-se o desbaste, mantendo-se 3 plantas por vaso. Para a marcação isotópica da leguminosa, aplicou-se a cada vaso 1 mL de solução de sulfato de

sódio ($\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$) livre de carregador, com atividade específica de $64,75 \text{ MBq mL}^{-1}$.

Nesta fase, os tratamentos culturais compreenderam regas diárias com água destilada, mantendo-se a umidade do solo próxima a 70% de sua capacidade máxima de retenção de água; tutoramento das plantas e tratamento fitossanitário para o controle de ácaros, pulgão e de mosca branca. A colheita das plantas foi realizada 80 dias após a emergência, consistindo no corte da parte aérea e na remoção das raízes, que foram lavadas em água de torneira e destilada. O material vegetal foi seco ao ar e em estufa, pesado para determinação da produção de matéria seca e amostrado para determinação do teor de enxofre e da atividade específica do ^{35}S . Após, procedeu-se à desintegração do material, originando partículas com aproximadamente $0,25 \text{ cm}^2$ de área.

Os tratamentos compreenderam dez períodos de incubação do solo com mucuna-preta marcada com ^{35}S (zero, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210 e 240 dias) e um tratamento testemunha, sem adição do adubo verde, para quantificar o fornecimento de enxofre do solo. Estes foram dispostos em delineamento experimental inteiramente ao acaso com quatro repetições. As unidades experimentais foram constituídas por vasos contendo 2 kg de terra, nos quais foram cultivadas quatro plantas de arroz.

A incubação de mucuna-preta marcada com ^{35}S ($2,7 \text{ g kg}^{-1}$ de S; $0,259 \text{ MBq g}^{-1}$ de S), na dose de $2,2 \text{ g kg}^{-1}$ de terra, foi iniciada pelo maior período, possibilitando coincidir o plantio da cultura teste, para todos os tratamentos, no tempo zero. À exceção da testemunha, todos os demais tratamentos foram umedecidos durante o período de incubação, mantendo-se a umidade do solo próxima a 70% de sua capacidade máxima de retenção de água.

Por ocasião do transplântio do arroz, revolveu-se a terra dos vasos e retirou-se uma amostra para determinação dos conteúdos de enxofre (Tabatabai, 1982), de sulfato (Vitti, 1989) e da atividade específica do ^{35}S (Blair & Crofts, 1969) nessas frações. Quatro plantas de arroz, de uma cultivar de sequeiro (IAC-165), produzidas em areia lavada durante 44 dias, foram transplantadas a cada vaso e cultivadas por 39 dias. Durante este período, as plantas receberam aplicações diárias de água destilada, mantendo-se a umidade do solo em 80% de sua capacidade máxima de retenção de água. A drenagem de água foi impedida pelo revestimento dos vasos com sacos plásticos. A colheita do arroz compreendeu o corte da parte aérea e a retirada das

raízes, que foram lavadas em água de torneira e destilada, secas em estufa e pesadas. O material vegetal foi analisado para determinação do teor de S (Bataglia *et al.*, 1983) e da atividade específica do ^{35}S (Blair & Crofts, 1969). Em seguida, amostrou-se a terra dos vasos para determinação dos conteúdos de enxofre e de sulfato e da atividade específica do ^{35}S .

A resposta aos tratamentos foi avaliada pelas quantidades de enxofre e de sulfato no solo e pela porcentagem e quantidade de sulfato no solo proveniente da mucuna-preta, determinadas por ocasião do transplântio do arroz. Quantificou-se, ainda, a quantidade de enxofre absorvida pelas plantas de arroz, a quantidade de enxofre no arroz proveniente da mucuna-preta, o aproveitamento de enxofre da mucuna-preta pelo arroz, as quantidades totais de enxofre e de sulfato no solo e as quantidades de enxofre e de sulfato no solo provenientes da mucuna-preta. Associando-se dados relativos às plantas de arroz e ao solo, determinou-se, a quantidade de enxofre da mucuna-preta recuperada e perdida do sistema solo-planta. O somatório das quantidades de S no arroz proveniente da mucuna-preta e residual no solo foi considerado como recuperado e, o restante, em relação ao total adicionado, como perdido do sistema solo-planta.

A análise estatística dos dados compreendeu análises de variância e a aplicação do teste de Dunnett, ao nível de 5%, para contrastar os efeitos dos tratamentos com incorporação de adubo verde em relação à testemunha. Efetuaram-se, ainda, análises de regressão polinomial para comparação dos níveis do fator período de incubação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 são apresentados os dados de quantidade de enxofre e de sulfato no solo, determinadas por ocasião do transplântio e da colheita do arroz, e de enxofre absorvido pelas plantas de arroz, relativos ao tratamento testemunha, bem como as significâncias do teste de Dunnett, contrastando esse tratamento frente aos demais. A discussão desses dados será feita separadamente, a medida em que forem descritos nesta seção do trabalho.

Enxofre e Sulfato no Solo - Transplântio do Arroz

Por ocasião do transplântio do arroz, as quantidades de enxofre no solo referentes aos tratamentos com incorporação de mucuna-preta não

Quadro 1. Quantidades de enxofre (QSS) e de sulfato no solo (QSO₄S), por ocasião do transplântio e da colheita do arroz, e quantidades de enxofre acumuladas nas plantas de arroz, relativas ao tratamento testemunha, e as respectivas significâncias do teste de Dunnett, contrastando os efeitos dos tratamentos com incorporação de mucuna-preta em relação à testemunha.

Variável	Valor	Período de incubação, dias										
		0	20	40	60	90	120	150	180	210	240	
QSS [†] (mg vaso ⁻¹)	403	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
QSO ₄ S [†] (mg vaso ⁻¹)	56,5	*	*	*	*	ns	*	*	ns	*	*	*
S acumulado – Parte aérea (mg vaso ⁻¹)	8,9	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	*	*	*	ns
S acumulado – Raízes (mg vaso ⁻¹)	3,4	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S acumulado – Total (mg vaso ⁻¹)	12,3	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
QSS [‡] (mg vaso ⁻¹)	389	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
QSO ₄ S [‡] (mg vaso ⁻¹)	65	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

^{†, ‡} resultados referentes a amostras de solo coletadas por ocasião do transplântio e da colheita do arroz, respectivamente.

* = significativo a 5% de probabilidade, pelo teste bilateral de dunnett. ns = não significativo.

diferiram estatisticamente daquela encontrada na testemunha (Quadro 1), indicando pequena representatividade do enxofre contido no adubo verde em relação ao conteúdo do nutriente do solo. No entanto, o comportamento verificado para o conteúdo de sulfato no solo, foi distinto (Quadro 1); a testemunha apresentou conteúdo de S-SO₄ semelhante apenas aos dos tratamentos com períodos de incubação de 90 e 180 dias, sendo inferior aos demais. É interessante notar que o adubo verde estimulou a mineralização de enxofre do solo, visto que contribuiu com, no máximo, 6,9% do sulfato encontrado no solo (Quadro 2). Este resultado difere do descrito por Chapman (1987). O autor relata que na ausência de plantas, a incorporação de resíduos de *Lolium perenne* não estimulou a mineralização de S orgânico do solo.

Quadro 2. Quantidade de enxofre (QSS) e de sulfato no solo (QSO₄S), quantidade (QSO₄SPMP) e porcentagem de sulfato no solo proveniente da mucuna-preta (SO₄SPMP), determinadas por ocasião do transplântio do arroz.

Período de incubação dias	QSS	QSO ₄ S	QSO ₄ SPMP	SO ₄ SPMP
	mg vaso ⁻¹			%
0	459	71,1	4,9	6,9
20	476	65,9	3,5	5,3
40	505	65,1	3,5	5,4
60	499	63,8	3,6	5,7
90	502	60,3	3,9	6,5
120	481	62,4	3,7	6,0
150	489	62,4	3,5	5,6
180	512	60,6	3,6	5,9
210	471	68,2	3,1	4,5
240	522	69,8	3,4	4,9
Média	488	65,0	3,7	5,7
F (linear)	ns	ns	**	**
F (quadrático)	ns	**	ns	ns
R ²	-	0,85	0,38	0,35
CV (%)	8	3	15	15

** = significativo a 1% de probabilidade. ns = não significativo.

Os dados de quantidade de enxofre e de sulfato no solo e de porcentagem e quantidade de sulfato no solo proveniente do adubo verde, determinados por ocasião do transplântio do arroz, são apresentados no Quadro 2. Não houve efeito do período de incubação sobre o conteúdo de enxofre do solo. Por outro lado, verifica-se efeito significativo da variação no período de incubação sobre a quantidade de sulfato no solo e sobre a porcentagem e a quantidade de sulfato no solo proveniente do adubo verde. Os dados de quantidade de sulfato no solo (Y₁) foram ajustados pelo modelo:

$$Y_1 = 70,1644 - 0,1543X_1 + 0,0006X_1^2, R^2 = 0,85**$$

O conteúdo máximo de sulfato no solo ocorreu para o período de incubação zero, decrescendo até o período de 119 dias. Esse resultado indica imobilização crescente de sulfato no intervalo de 0 a 119 dias e que após esse período, a magnitude do processo de mineralização de enxofre foi superior ao de imobilização. Por sua vez, a porcentagem (Y₂) e a quantidade de sulfato no solo proveniente da mucuna-preta (Y₃) decresceram com o aumento do período de incubação. Os modelos que melhor se ajustaram aos dados obtidos foram, respectivamente,

$$Y_2 = 6,2192 - 0,0050X_2, R^2 = 0,35** \text{ e}$$

$$Y_3 = 4,0783 - 0,00036X_3, R^2 = 0,39**$$

Possivelmente, este comportamento esteja relacionado ao estímulo da mineralização do enxofre orgânico do solo, durante o período incubação, proporcionado pela adição do adubo verde.

Utilização de Enxofre pelo Arroz

Os tratamentos com períodos de incubação de 90, 120, 180 e 210 dias propiciaram acúmulos de enxofre

na parte aérea das plantas de arroz significativamente superiores ao da testemunha. No entanto, essas diferenças não se confirmaram para as raízes e parte aérea + raízes (Quadro 1). Da mesma forma, as quantidades de enxofre acumuladas nas plantas de arroz não foram influenciadas pela variação no período de incubação (Quadro 3). A contribuição da mucuna-preta para o enxofre absorvido pelas plantas de arroz foi pequena, em média, de 9,7% (dados não apresentados). Esse resultado reflete a participação modesta do adubo verde para o "pool" de enxofre disponível (S-SO₄) do solo (Quadro 2). Em acréscimo, o fato de o arroz, como a maioria dos cereais de interesse econômico, não ser uma espécie muito exigente em enxofre, deve ter contribuído para a pequena recuperação pela planta do S proveniente do adubo verde. Os valores obtidos equipararam-se aos relatados por Ribeiro (1996), para os adubos verdes mucuna-preta e puerária (5,2 a 11,6%). No entanto, foram inferiores aos descritos por Dhillon & Dhillon (1991), 12,3 a 25,1%. Deve-se considerar, porém, que estes autores cultivaram a planta teste (*Brassica campestris*) até a produção de grãos, possibilitando maior absorção de enxofre pelas plantas. Além das razões expostas, outros fatores como as condições ambientais, o tipo de solo, e a composição do adubo verde (Nelson, 1964; Williams, 1967; Goh & Gregg, 1980; Tabatabai & Al-Khafaji, 1980) devem ter contribuído para as diferenças os resultados experimentais relatadas.

Apenas as variáveis porcentagem de enxofre na planta (parte aérea) proveniente da mucuna-preta e quantidade de enxofre na planta (raízes) proveniente da mucuna-preta foram influenciadas pela variação do período de incubação (Quadro 3). Para ambas as variáveis, observou-se diminuição da contribuição do enxofre do adubo verde, em resposta ao aumento do período de incubação.

As quantidades de enxofre proveniente da mucuna-preta acumuladas nas plantas de arroz foram menores que as quantidades de sulfato no solo derivado do adubo verde, determinadas por ocasião do transplante do arroz (Quadro 2), indicando que a absorção de pequena quantidade de enxofre dessa fonte não foi devida à restrição na disponibilidade de S derivado do adubo verde no solo.

Os resultados de aproveitamento de enxofre do adubo verde pelas plantas de arroz são apresentados no Quadro 3. Verifica-se diminuição no aproveitamento de enxofre pelas raízes e parte aérea + raízes (Y₄) em decorrência do aumento no período de incubação, sendo os dados ajustados ao modelo:

$$Y_4 = 3,9319 - 0,0042X_4, R^2 = 0,75^{**} \text{ (dados transformados para raiz quadrada).}$$

Comportamento semelhante foi descrito por Ribeiro (1996), para os adubos verdes mucuna-preta e puerária. Como aplicação prática desse resultado, tem-se que quanto mais tardio for o plantio, após a

Quadro 3. Quantidade de enxofre acumulada nas plantas de arroz, quantidade de enxofre no arroz proveniente do adubo verde (QSAPAV) e aproveitamento do enxofre do adubo verde pelo arroz (ASAVA), em função do período de incubação do solo com o adubo verde mucuna-preta.

Período de incubação	S acumulado			QSAPAV			ASAVA		
	Parte aérea	Raízes	Total	Parte aérea	Raízes	Total	Parte aérea	Raízes	Total
dias	----- mg vaso ⁻¹ -----								
0	9,4	3,4	12,8	1,3	0,4	1,7	9,2	3,2	14,1
20	12,2	3,8	16,0	1,5	0,4	1,9	10,9	3,3	16,4
40	12,0	3,4	15,4	1,4	0,4	1,8	10,4	2,8	14,7
60	12,9	2,9	15,8	1,6	0,4	2,0	11,8	2,8	16,6
90	15,1	3,7	18,8	1,2	0,3	1,5	8,8	2,1	11,0
120	15,3	3,2	18,5	1,2	0,2	1,4	8,6	1,6	10,7
150	16,9	3,3	20,2	1,3	0,2	1,5	9,2	1,8	11,0
180	16,6	3,0	19,7	1,2	0,2	1,4	8,8	1,7	10,5
210	15,7	2,7	18,4	1,0	0,2	1,2	7,1	1,5	8,3
240	15,0	3,5	18,4	1,0	0,3	1,3	7,7	1,8	9,6
Média	13,7	3,2	16,9	1,3	0,3	1,6	9,3	2,3	12,3
F (linear)	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	**	**
R ²	-	-	-	-	0,79	-	-	0,81	0,75
CV (%)	23	23	22	24	35	26	11	16	11

*, ** = significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente. ns = não significativo.

incorporação do adubo verde, menor será a utilização do enxofre dessa fonte pela planta.

O aproveitamento de enxofre da mucuna-preta pelas plantas de arroz variou entre 9,6 e 16,6%. Esses valores são próximos aos encontrados por Goh & Gregg (1980), ao trabalharem com os adubos verdes: *Lolium perenne* e *Trifolium repens* e com *L. perenne*, como planta teste. No entanto, os resultados obtidos por Chapman (1987) e Dhillon & Dhillon (1991) superaram os do presente experimento, sendo de 27% e de 19 a 34%, respectivamente. Por outro lado, Ribeiro (1996) determinou recuperações de enxofre de adubos verdes menores, variando de 2 a 7%.

Enxofre e Sulfato no Solo - Colheita do Arroz

Na colheita, mantendo o comportamento verificado para o transplântio do arroz, não foram determinadas diferenças entre os tratamentos com incorporação de adubo verde e a testemunha, quanto ao conteúdo de S no solo (Quadro 1), o que se deve à pequena absorção de enxofre pelas plantas. Ao contrário, as quantidades de sulfato no solo, determinadas para os tratamentos que receberam adubo verde foram significativamente maiores que a da testemunha (Quadro 1).

Observou-se efeito do período de incubação sobre a quantidade de enxofre no solo (Y_5), determinada por ocasião da colheita do arroz (Quadro 4), que apresentou resposta quadrática ($Y_5 = 358,624 + 1,666X_5 - 0,006X_5^2$, $R^2 = 0,91^{**}$). O valor máximo foi obtido para o período de incubação de 129 dias. Esses resultados não se refletiram sobre a quantidade de enxofre no solo proveniente da mucuna-preta (Quadro 4).

Dos Quadros 2 e 4, observa-se que as reduções no conteúdo de enxofre do solo, do transplântio para a colheita, foram maiores que as remoções do nutriente pelas plantas (Quadro 3), indicando a ocorrência de perdas do nutriente do sistema solo-planta nesse período.

Os dados do Quadro 4 revelam pequena contribuição do enxofre da mucuna-preta para o conteúdo total do nutriente do solo. A maior parte do enxofre incorporada ao solo pelo adubo verde, em média 80%, nele permaneceu após o cultivo do arroz, sugerindo que o efeito residual do enxofre da mucuna-preta deve ser longo. Ainda do Quadro 4, observa-se efeito do período de incubação sobre as quantidades de sulfato no solo (Y_6) e sobre a quantidade de sulfato no solo proveniente da mucuna-preta (Y_6). Os dados

Quadro 4. Quantidade de enxofre (QSS) e de sulfato no solo (QSO₄S) e quantidade de enxofre (QSSPMP) e de sulfato no solo provenientes da mucuna-preta (QSO₄SPMP), determinadas por ocasião da colheita do arroz.

Período de incubação	QSS	QSSPMP	QSO ₄ S	QSO ₄ SPMP
dias	- - - - mg vaso ⁻¹ - - - -			%
0	364	13,0	92,1	3,6
20	402	11,2	76,3	2,5
40	394	10,8	75,8	2,6
60	434	10,9	83,5	2,9
90	443	11,0	78,2	4,4
120	479	10,7	80,9	4,6
150	474	10,6	77,7	4,2
180	444	10,2	80,6	4,3
210	422	10,6	78,1	3,4
240	383	10,4	90,2	4,4
Média	423	10,9	81,4	3,7
F (linear)	ns	ns	ns	**
F (quadrático)	**	ns	**	ns
R ²	0,91	-	0,40	0,34
CV (%)	8	11	5	24

** = significativo a 1% de probabilidade. ns = não significativo.

referentes à variável quantidade de sulfato no solo foram ajustados ao modelo:

$$Y_6 = 86,046 - 0,152X_6 + 0,0007X_6^2, R^2 = 0,40^{**},$$

com valor mínimo correspondente ao período de incubação de 133 dias. Por sua vez, os dados relativos à variável quantidade de sulfato no solo proveniente da mucuna-preta foram ajustados pelo modelo:

$$Y_7 = 3,047 + 0,0057X_7, R^2 = 0,34^{**},$$

que indica elevação na quantidade de sulfato no solo proveniente do adubo verde em resposta ao aumento do período de incubação.

A contribuição do enxofre da mucuna-preta para a fração S-SO₄ foi ligeiramente superior à verificada para S total (Quadro 4), indicando que o adubo verde contém compostos mais facilmente mineralizáveis que a matéria orgânica do solo, conforme proposto por Goh & Gregg (1982). Esse fato se torna mais evidente ao considerar-se que, após o cultivo do arroz, em média, 27% do enxofre do adubo verde foi recuperado na forma de sulfato.

Dos Quadros 3 e 4, verifica-se que os somatórios das quantidades de enxofre na planta e quantidades de sulfato no solo, determinadas por ocasião da colheita do arroz, foram maiores que as quantidades de sulfato no solo, determinadas no transplântio (Quadro 2),

indicando manutenção do processo de mineralização de enxofre durante o período de cultivo do arroz, conforme observado por Chapman (1987). O comportamento verificado para os dados relativos ao adubo verde foi semelhante; neste caso evidenciando o estímulo da mineralização do enxofre da mucuna-preta pelo cultivo.

Enxofre do Adubo Verde Recuperado e Perdido do Sistema Solo-Planta

As quantidades de enxofre da mucuna-preta recuperadas (Y_8) e perdidas do sistema solo-planta (Y_9) foram influenciadas pelo período de incubação. Para ambas as variáveis, os dados (transformados para raiz quadrada) foram ajustados a modelos lineares (Figura 1). Dos resultados, verifica-se acentuada redução na recuperação de enxofre da mucuna-preta em resposta ao aumento do período de incubação, indicando que quanto mais cedo for realizado o plantio, após a incorporação do adubo verde, menores serão as perdas de enxofre do sistema solo-planta. Os dados de recuperação do nutriente refletem as variações no aproveitamento de enxofre pelo arroz (Quadro 3).

Acredita-se, dado às características do experimento, que perdas de enxofre na forma gasosa tenham sido o principal mecanismo de saída do nutriente do sistema solo-planta. Além disso, a subestimativa do enxofre contido nas raízes do arroz

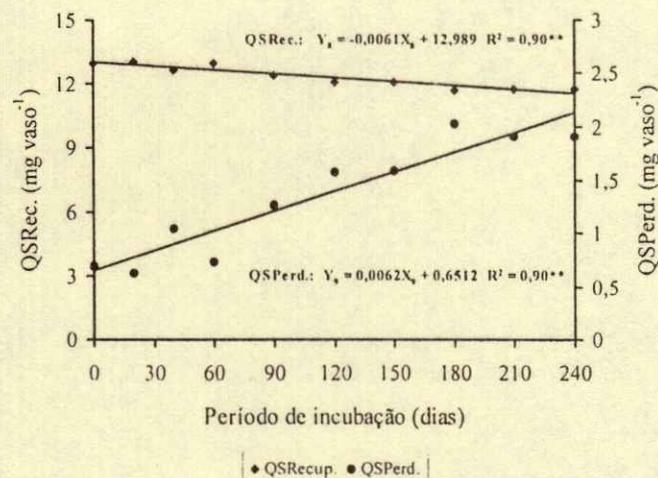


Figura 1. Quantidade de enxofre proveniente da mucuna-preta recuperada (QSRRecup.) e perdida (QSPerd.) do sistema solo-planta, em função do período de incubação do solo com esse adubo verde.

também pode ter contribuído para as perdas do nutriente, como proposto por Nelson (1973) e Nicolson (1970).

CONCLUSÕES

- A incorporação do adubo verde promoveu aumento no conteúdo de sulfato do solo, estimulando, principalmente, a mineralização do enxofre do solo.
- A contribuição média do enxofre da mucuna-preta para o total do nutriente acumulado nas plantas de arroz foi de 9,7%.
- O aproveitamento do enxofre da mucuna-preta pelo arroz diminuiu com o aumento do período de incubação.
- A maior parte do enxofre da mucuna-preta, em média 80%, permaneceu no solo após o cultivo do arroz.
- A recuperação de enxofre da mucuna-preta no sistema solo-planta diminuiu com o prolongamento do período de incubação.

LITERATURA CITADA

- Bataglia, O.C., A.M.C. Furlani, J.P.F. Teixeira, P.R. Furlani & J.R. Gallo. 1983. Métodos de análise química de plantas. Instituto Agrônomo, Campinas, Brasil. (IAC. Boletim Técnico, 78)
- Blair, G.J. & F.C. Crofts. 1969. A quantitative and radioactive sulfur (^{35}S) liquid scintillation counting method for determining soil and plant sulfur. *Soil Sci.* 107: 277-280.
- Chapman, S.J. 1987. Partitioning of ryegrass residue sulphur between the soil microbial biomass, other sulphur pools and ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Biol. Fert. Soils* 5: 253-257.
- Dhillon, K.S. & S.K. Dhillon. 1991. Relative contribution of green manures in sulphur nutrition of toria (*Brassica campestris*). *J. Nucl. Agric. Biol.* 20: 128-133.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1999. Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Produção de Informação, Brasília; Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brasil.
- Goh, K.M. & P.E.H. Gregg. 1980. Re-utilization by perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) of labelled fertilizer sulphur incorporated in field-grown tops and roots of pasture plants added to soils. *Fert. Res.* 1: 73-85.
- Goh, K.M. & P.E.H. Gregg. 1982. Field studies with radioactive sulphur labelled gypsum-fertilizer. III. Sulphur labelled pools and their significance. *New Zealand J. Sci.* 25: 135-139.
- Nelson, L.E. 1964. Status and transformation of sulfur in Mississippi soils. *Soil Sci.* 97: 300-306.
- Neptune, A.M.L., M.A. Tabatabai & J.J. Hanway. 1975. Sulfur fractions and carbon-nitrogen-phosphorus sulfur relationships in some Brazilian and Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 51-55.
- Nicolson, A.J. 1970. Soil sulfur balance studies in the presence and absence of growing plants. *Soil Sci.* 109: 345-350.
- Parkinson, J.A. & S.E. Allen. 1975. A wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen and mineral

- nutrients in biological material. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 6: 1-11.
- Raij, B. van, J.A. Quaggio, H. Cantarella, M.E. Ferreira, A.S. Lopes & O.C. Bataglia. 1987. Análise química do solo para fins de fertilidade. Fundação Cargill, Campinas, Brasil.
- Ribeiro, G. de A. 1996. Efeito de períodos de incubação de adubos verdes (mucuna e puerária) na liberação de nitrogênio (^{15}N) e enxofre (^{35}S) para o arroz. Dissertação de Mestrado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura-USP. Piracicaba, Brasil.
- Tabatabai, M.A. 1982. Sulfur. pp. 539-579. *In*: A.L. Page, R.H. Miller & D.R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis*. 2ª edição. ASA/SSSA. Madison, WI.
- Tabatabai, M.A. & A.A. Al-Khafaji. 1980. Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1000-1006.
- Till, A.R. & G.J. Blair. 1978. The utilization by grass of sulphur and phosphorus from clover litter. *Austr. J. Agric. Res.* 29: 235-242.
- Vitti, G.C. 1986. O enxofre na agricultura: situação, perspectivas e sugestões. pp. 98-110. *In*: Seminário fósforo, cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes. MANAH, São Paulo, Brasil.
- Vitti, G.C. 1989. Avaliação e interpretação do enxofre no solo e na planta. FUNEP, Jaboticabal, Brasil.
- Williams, C.H. 1967. Some factors affecting the mineralization of organic sulphur in soils. *Plant Soil* 26: 205-223.

EFFECTO DE LAS CONDICIONES PLUVIOMETRICAS EN TRIGO EN SISTEMAS DE PRODUCCION ALTERNATIVOS EN UN ULTISOL DE LA IX REGION, CHILE¹

Effects of Pluviometric Conditions in Wheat within Alternative Cropping Systems in an Ultisol, IX Region, Chile

Inés Pino², Juan Luis Rouanet³, Ana María Parada² y Adriana Nario²

RESUMEN

En la IX Región de Chile, el cultivo de especies anuales ha tenido un incremento, tanto en el uso continuo del suelo como en el uso de fertilizantes nitrogenados, como una manera de aumentar la producción y la calidad de los cultivos. Con el fin de evaluar el efecto de la pluviometría en los estadios de desarrollo del trigo, en esta investigación se compararon tres sistemas de manejo del suelo en dos temporadas de cultivo. Para este efecto se determinaron los parámetros agronómicos e isotópicos. Los sistemas de manejo fueron: a) inversión del suelo y uso del fuego para la eliminación de los residuos (TRAD); b) sin inversión del suelo y eliminación de los residuos mediante el uso del fuego (CL+Q); y c) sin inversión del suelo y manejo de los residuos en la superficie (CL-Q), el cual constituye el manejo más conservacionista y de reciente uso por parte de los agricultores. Las evaluaciones se realizaron durante las temporadas 1997/1998 y 1998/1999 en el mismo sitio experimental. Se utilizaron macroparcelas con el fertilizante comercial urea y microparcelas con fertilizante marcado, urea con 10% átomos en exceso (at. exc.) ¹⁵N. El diseño experimental consistió, para cada sistema de manejo, en bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. En las temporadas estudiadas, aun cuando hubo diferencias en los montos y distribución de lluvias, no se apreciaron grandes

diferencias ni en los parámetros agronómicos ni en los parámetros isotópicos a causa de la estabilidad del cultivar utilizado. Los resultados de estas dos temporadas de estudio indican que a) el sistema de labranza afectó la eficiencia de recuperación del nitrógeno por el cultivo de trigo; b) puede existir un retorno de nitrógeno importante aportado por los residuos; y c) el factor económico puede ser decisivo al elegir el sistema de manejo.

Palabras clave: ¹⁵N fertilizante, uso de N por la planta, estadio fisiológico.

SUMMARY

In Region IX of Chile, the continuous use of soils and the increase in the use of N fertilizers in annual crops have been considered by farmers as a way to improve crop production and crop quality. To assess the effect of annual rainfall on different phenological stages of wheat, three systems of soil management in two crop seasons were evaluated. Agronomic and isotopic parameters were measured. The management systems were a) turning the soil over and burning residues (TRAD), b) no tillage and burning residues (CL+Q), and c) no tillage and surface handling of residues, which is considered the most effective conservation and soil management, only recently used by farmers. Macro plots with commercial urea fertilizer and micro plots with labeled fertilizer, urea, 10 atoms excess (at. exc.) ¹⁵N were used. For each management system, completely random blocks with four replications per treatment were used. Although significant differences in rainfall were measured among seasons, no large differences were identified, in neither agronomic nor isotopic parameters; this is attributed to the cultivar's stability. The results of two seasons show that a) the tillage system affected the recovery efficiency in wheat, b) the crop residues might represent an important source of nitrogen recovery,

¹ Trabajo realizado con aportes del OIEA Proyecto CHI/5/020, ARCAL XXII y del Proyecto FONDECYT 1981116.

² Sección Técnicas Nucleares en Agricultura. Comisión Chilena de Energía Nuclear. Casilla 188-D, Santiago, Chile.

(ipino@cchen.cl)

³ Departamento de Recursos Naturales. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Carillanca. Casilla 58-D, Temuco, Chile.

(jrouanet@carillanca.inia.cl)

and c) the choice of any tillage system has to consider economic factors.

Index words: ^{15}N -fertilizer, plant N utilization, physiological stages.

INTRODUCCION

En la IX Región de Chile, en la actualidad, el cultivo de trigo presenta una alta demanda tanto en producción como en calidad, lo que ha conducido a un aumento en los costos, debido, en principio, a la fertilización nitrogenada, que representa entre 29 y 37% de los costos totales en los sistemas de producción tradicional (Godoy y Rouanet, 1999).

El uso de la quema y la eliminación de la cubierta vegetal afectan la capacidad de retención de nutrientes, especialmente de nitrógeno; además, incrementa el escurrimiento superficial, lo cual afecta, a su vez, la capacidad de retención del agua del suelo y la eficiencia de uso de los fertilizantes (Aggarwal *et al.*, 1997).

Las pérdidas de N-fertilizante en un sistema de producción agrícola, descontado la exportación de éste en el producto cosechado, significan una reducida eficiencia de uso del mismo, lo cual genera problemas ambientales (Powlson *et al.*, 1992; MacDonald *et al.*, 1997). El manejo del suelo y la rotación de cultivos afectan las vías de transformación de los nutrientes aplicados como fertilizantes, su incorporación a la materia orgánica, su disponibilidad en la solución del suelo y su absorción por la planta y, finalmente, la eficiencia de uso de ellos (Sijtsma *et al.*, 1998).

El objetivo del trabajo fue evaluar la condición de absorción de N en tres estados fenológicos del cultivo de trigo, comparando mediante el uso de las técnicas isotópicas (^{15}N) el contenido del nitrógeno total (Nt), nitrógeno derivado del fertilizante (Nddf) y del nitrógeno derivado del suelo (Ndds) con tres sistemas de manejo del suelo y diferentes condiciones de pluviometría y distribución. Las técnicas isotópicas han mostrado ser la herramienta más adecuada para dar pronta solución a la problemática actual del manejo racional de la nutrición vegetal (Navia *et al.*, 1997).

MATERIALES Y METODOS

En mayo de 1997 y en mayo de 1998, se estableció un ensayo de campo en el fundo Buenos Aires, sector Nueva Imperial, Temuco (IX Región), Chile, con el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.), variedad Dalcachue, con tres sistemas de manejo del suelo.

El suelo donde se estableció el experimento presenta una topografía ondulada con pendiente de 15 a 20% y corresponde al orden Ultisol (Typic Hapludult).

Se establecieron macroparcels con fertilizante comercial (urea) y dentro de ellas "microparcels isotópicas" con fertilizante marcado, urea con 10% at. exc. ^{15}N . En las microparcels, el fertilizante marcado se aplicó en solución sobre la superficie del suelo. Se utilizó, por temporada, un modelo de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Los sistemas de manejo de suelo usados fueron inversión del suelo y uso del fuego para la eliminación de residuos (TRAD), sin inversión de suelo y eliminación de residuos mediante el uso del fuego (CL+Q) y el sistema más conservacionista de manejo, sin inversión de suelo y manejo de residuos en la superficie (CL-Q). Se aplicó una dosis de 150 kg de N ha⁻¹, fraccionada en tres estadios fenológicos: 15 kg ha⁻¹ a la siembra, 67.5 kg ha⁻¹ en pleno macollamiento y 67.5 kg ha⁻¹ al inicio de encañado.

Se realizaron tres muestreos de material vegetal, en cada una de las temporadas: fines de macollamiento-inicio encañado: estadio 31, según Zadoks *et al.* (1974), presentado a 98 y 99 días desde siembra (DDS); espigamiento: estadio 59, según Zadoks *et al.* (1974), presentado a 175 y 169 DDS; y a madurez de cosecha: estadio 96, según Zadoks *et al.* (1974), presentado a 259 y 233 DDS. Para ello, se cortaron las plantas a nivel del suelo, tanto de las macroparcels como de las microparcels isotópicas. Todas las muestras se secaron, se molieron y se sometieron a análisis de N total (Kjeldahl) y ^{15}N para la microparcels (espectrometría de emisión óptica). Los parámetros agronómicos determinados fueron: rendimiento de materia seca y de grano, absorción de N por las distintas partes de la planta, y los parámetros isotópicos fueron: nitrógeno en la planta proveniente del fertilizante (% y kg ha⁻¹) y nitrógeno en la planta

proveniente del suelo (% y kg ha⁻¹) en la planta total y en el grano.

RESULTADOS Y DISCUSION

La distribución de las precipitaciones durante la temporada 1997/1998 (Figura 1) indica un superávit de agua de lluvia, principalmente en otoño y primavera. Aun cuando, en 1997, las precipitaciones fueron 80% superiores al promedio de 27 años, dadas las características topográficas, el cultivo no estuvo sometido a exceso de agua, tanto en superficie como en profundidad. Desde agosto en adelante, la distribución de lluvias permitió un adecuado almacenaje y abastecimiento de agua en el suelo, lo cual favoreció los procesos de absorción de nutrimentos y, posteriormente, del llenado de grano.

Durante la temporada 1998/1999, se observó un desbalance hídrico, en especial durante el período primaveral (septiembre en adelante), debido a la baja caída pluviométrica, en comparación con la caída promedio de 27 años (Figura 2). Lo anterior significó que, en el perfil del suelo, la humedad aprovechable alcanzara un déficit de 30% en el sitio del ensayo. La diferencia entre temporadas debido al déficit de agua aprovechable en el suelo, desde fines de octubre en adelante, habría afectado negativamente los procesos de traslocación de fotosintatos y N al grano (crecimiento del mismo). Se registró una reducción en el peso final del grano que, como una variable anexa determinada en este estudio, fue 44 mg grano⁻¹ en 1997/1998 y 28 mg grano⁻¹ en 1998/1999, similar para todos los tratamientos (Rouanet *et al.*, 1999b).

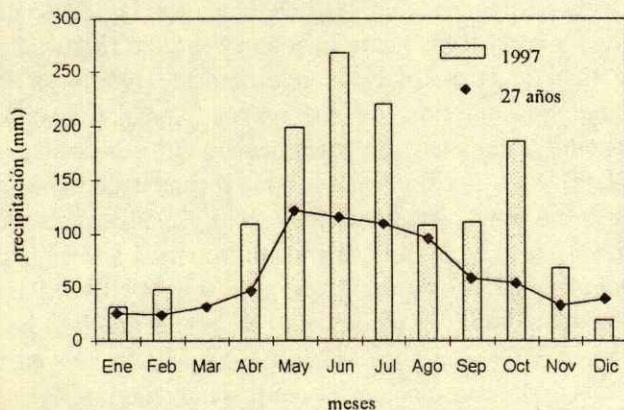


Figura 1. Distribución pluviométrica mensual. 1997.

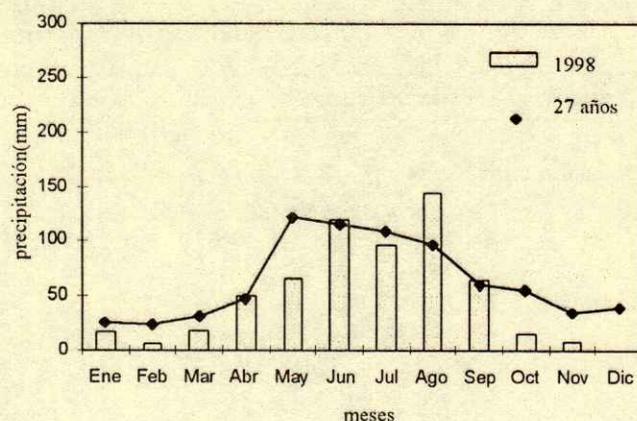


Figura 2. Distribución pluviométrica mensual. 1998.

En el Cuadro 1, se presentan los parámetros agronómicos e isotópicos, en los tres estadios fenológicos, de los tres sistemas de manejo del suelo.

En la temporada 1997/1998, la mayor producción de materia seca total se obtuvo en el sistema CL+Q, sin diferencias significativas entre los otros dos sistemas de manejo; igual situación se presentó para el N total expresado en kg ha⁻¹. El Nddf (%) a cosecha fue similar en los tres sistemas, sin embargo, al expresarlo en Nddf kg ha⁻¹, el valor más alto se produjo para CL+Q al igual que el Ndds. La mayor cantidad de Nddf en el grano se encontró en CL+Q, seguido por el sistema TRAD y CL-Q.

Al completar el ciclo de crecimiento y desarrollo de las plantas (temporada 1997/1998), en los tres sistemas de manejo, el porcentaje de Ndds fue superior al porcentaje de Nddf presente en ellas (Cuadro 1). Esto podría indicar que el suelo aportó nitrógeno hasta el término del cultivo y que el N proveniente del fertilizante se presentaría en menor proporción, producto de inmovilización y lixiviación a estratos más profundos en el perfil del suelo que el desarrollo radical del cultivo. Power y Peterson (1998) sugieren que mucho del fertilizante aplicado es inmovilizado como N orgánico del suelo o se pierde. Este aspecto es de especial énfasis, ya que ello podría conducir a recomendar una fertilización nitrogenada diferente para cada sistema de manejo (Power y Peterson, 1998).

Por otro lado, la producción de grano no presentó diferencias significativas entre sistemas de manejo, con valores para CL+Q de 7.5 t ha⁻¹, CL-Q 7.0 t ha⁻¹ y TRAD 6.6 t ha⁻¹ (peso seco). Estos resultados son

Cuadro 1. Parámetros agronómicos e isotópicos en la planta total de trigo variedad Dalcahue (hojas, tallo, capotillo y grano) y N en el grano derivado del fertilizante (Nddf) y derivado del suelo (Ndds).

Tratamiento	Periodo crecimiento	MS [†]	N total	Nddf	Nddf	Ndds	Ndds	Nddf grano	Ndds grano
		kg ha ⁻¹		%	kg ha ⁻¹	%		kg ha ⁻¹	
Temporada 1997/1998									
CL+Q [‡]	Macollamiento	381 d [§]	14.2 d	48.4 ab	6.9 d	51.6 b	7.3 d		
	Espigamiento	12655 c	110.4 b	58.4 a	64.5 a	41.6 c	46.9 c		
	Cosecha	17746 a	121.5 a	43.7 b	53.1 b	56.3 a	68.4 a	42.2 a	53.2 a
CL-Q	Macollamiento	325 d	11.9 d	46.1 ab	5.6 d	53.9 b	6.4 d		
	Espigamiento	10259 c	90.3 c	57.9 a	52.3 b	42.1 c	38.0 cd		
	Cosecha	16493 b	102.7 b	43.2 b	44.4 c	56.8 a	58.3 b	35.8 c	46.8 b
Tradicional	Macollamiento	423 d	14.5 d	42.1 b	6.1 d	57.9 a	8.4 d		
	Espigamiento	11683 c	102.0 b	60.3 a	61.6 a	39.7 c	40.5 c		
	Cosecha	16053 b	109.1 b	43.7 b	47.6 c	56.3 a	61.4 b	39.1 b	46.3 b
Temporada 1998/1999									
CL+Q [‡]	Macollamiento	1048 d [§]	37.9 c	36.2 bc	13.4 cd	63.8 a	24.2 d		
	Espigamiento	8960 c	122.1 a	44.1 b	53.8 ab	55.9 b	68.3 a		
	Cosecha	11304 b	111.6 b	43.9 b	49.0 b	56.1 b	62.6 b	35.9 b	44.3 b
CL-Q	Macollamiento	1052 d	38.2 c	32.2 bc	12.5 cd	67.8 a	25.9 d		
	Espigamiento	9654 c	117.8 ab	40.8 b	48.0 b	59.2 b	69.7 a		
	Cosecha	11852 b	110.3 b	42.6 b	46.9 b	57.4 b	63.3 b	33.9 c	47.8 a
Tradicional	Macollamiento	1396 d	55.5 c	42.7 b	21.3 c	57.3 b	31.8 c		
	Espigamiento	11505 b	129.4 a	50.2 a	65.0 a	49.8 c	64.4 a		
	Cosecha	13003 a	127.7 a	51.0 a	65.1 a	49.0 c	62.6 b	49.1 a	47.9 a

[†] MS = materia seca.

[‡] CL+Q = sistema de manejo sin inversión del suelo y eliminación de los residuos mediante el uso del fuego. CL-Q = sistema de manejo sin inversión del suelo y manejo de los residuos en la superficie.

[§] Letras distintas en columna señalan diferencias significativas ($P < 0.05$) según test de Scheffé.

similares a los encontrados anteriormente, tanto para este tipo de suelos como para Andisoles (Rouanet, 1996). En cuanto a la producción de residuos, en el sistema CL-Q se alcanzaron 9.4 t ha⁻¹, los cuales permanecieron sobre la superficie del suelo, protegiéndolo de la erosión, y sirvieron como fuente potencial de nutrimentos con efecto residual a los siguientes cultivos en la rotación.

En términos porcentuales, Austin *et al.* (1980) encontraron que 78% del N total estaba presente en el grano, cifra habitual en trigo de invierno. En este mismo estudio se determinó que, aunque en el sistema CL-Q la recuperación de N total y Nddf fue menor, al permanecer el residuo se estarían reciclando 20 kg de N total ha⁻¹, de los cuales 9 kg corresponden al N proveniente del fertilizante (Rouanet *et al.*, 1999a). Esta cifra, aunque aparentemente baja, representa una mayor eficiencia en el manejo del N por parte del agricultor, en comparación con los sistemas de eliminación de residuos por quema. Asimismo, al reducir la evaporación directa desde el suelo, es posible obtener mayor rendimiento de grano en años de baja

pluviometría (Borrensen, 1999). Estos valores indican que en los sistemas con quema de residuo, aunque se recupera más Nddf en la paja que en el sistema que no utiliza la eliminación del residuo, al hacer uso del roce o fuego, se pierden 11 kg ha⁻¹ en CL+Q y 10 kg ha⁻¹ de Nddf en TRAD (datos no mostrados) del sistema suelo-planta.

En la temporada 1998/1999 (Cuadro 1), con una pluviometría escasa para la zona en estudio (Figura 2), la materia seca total fue notoriamente inferior a la temporada anterior con una mayor expresión para el sistema tradicional, sin diferencias significativas entre CL+Q y CL-Q. El primer sistema mencionado también absorbió mayor cantidad de N total y Nddf expresado en kg ha⁻¹. En el grano se encontraron 49.1 kg de Nddf para TRAD, 35.9 para CL+Q y 33.9 para CL-Q. Para esta temporada, el rendimiento de grano fue 5.4 t ha⁻¹ para TRAD, 4.9 t ha⁻¹ para CL-Q y 4.6 t ha⁻¹ para CL+Q. De esta manera, el rendimiento fue inferior en esta temporada, producto del déficit hídrico producido.

Para la temporada 1997/1998 (Cuadro 1) se aprecia un bajo crecimiento hasta el periodo de

macollamiento frente a los valores obtenidos en la temporada 1998/1999. Por otra parte, entre espigamiento y cosecha para el año de mayor pluviometría, se obtuvo un incremento promedio de 5.2 t ha⁻¹ de MS, a diferencia del año seco en que ésta incrementó en aproximadamente 2.0 t ha⁻¹.

Además, es posible destacar que en la temporada lluviosa se presentó un incremento en el N total hasta cosecha, situación contraria en la temporada de sequía en que se perdió N total entre espigadura y cosecha siendo las mayores pérdidas para CL+Q. Olson (1982) y McDonald *et al.* (1997) atribuyeron estas pérdidas a pérdidas de amonio a través de las hojas, o bien, a pérdidas de parte del material vegetal por efecto de una sequía prematura. En la temporada 1997/1998, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas en el índice de cosecha aunque los sistemas de manejo sin inversión de suelo, mantuvieron un mayor porcentaje en producción de grano con relación a la producción total de fitomasa, siendo el índice de cosecha de 43% y 41% para el sistema TRAD. En la temporada 1998/1999, estos valores fueron 41% para CL+Q y TRAD y 42% para CL-Q.

En cuanto al Nddf en porcentaje, se aprecia una disminución en el periodo entre espigadura y cosecha en la temporada 1997/1998, lo cual sugiere una mayor absorción del N derivado del fertilizante hasta el periodo de espigadura, situación que es más notoria para el sistema TRAD.

Sin embargo, en el año de pluviometría menor (1998/1999) no se aprecia el mismo efecto, con ello se indica una absorción más lenta hasta espigadura. Al observar los valores de Nddf en kg ha⁻¹ se aprecian ligeras pérdidas pero inferiores a las presentadas en la temporada de más alta pluviometría.

Para el periodo de sequía se obtuvieron valores similares para el Ndds para CL+Q y TRAD, con pérdidas de 2 kg para TRAD y de 6 kg para CL+Q y CL-Q, situación que no se produce para ninguno de los sistemas en la temporada con mayor caída pluviométrica.

CONCLUSIONES

La variedad Dalcahue de trigo presenta algunos cambios con relación a los efectos climáticos, aunque éstos no son muy marcados respecto a otras variedades cultivadas en la zona (Peyrelongue *et al.*, 1997), dada

la estabilidad de la variedad Dalcahue, lo que según Rouanet *et al.* (1991) se traduce en un leve cambio en sus características agronómicas a cambios del ambiente. Lo anterior puede constituir ventajas y desventajas desde el punto de vista económico para el agricultor por cuanto en épocas de sequía para asegurar su producción, independiente de la variedad utilizada, el agricultor llega a aplicar dosis de hasta 300 kg de N ha⁻¹, lo cual constituye un aumento en los costos de producción.

El rendimiento en grano de trigo se asoció inversamente a las pérdidas de N-fertilizante del sistema suelo-planta. Los datos indican que el sistema de laboreo afecta la eficiencia de recuperación del N total por las plantas, que puede ocurrir un retorno importante de N (kg) aportado por los residuos, y que hay un factor económico de considerar para elegir el sistema de manejo adecuado.

LITERATURA CITADA

- Aggarwal, R.K., R.K. Praveen-Kumar y J.F. Power. 1997. Use of crop residue and manure to conserve water and enhance nutrient availability and pearl millet yields in an arid tropical region. *Soil Tillage Res.* 41(1-2): 43-51.
- Austin, R.B., J. Bingham, R.D. Blackwell, L.T. Evans, M.A. Ford, C.L. Morgan y M. Taylor. 1980. Genetic improvement in winter yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci. Camb.* 94: 675-689.
- Borrensen, T. 1999. The effect of straw management and reduced tillage on soil properties and crop yields of spring-sown cereals on two loam soils in Norway. *Soil Tillage Res.* 51(1-2): 91-102.
- Godoy, A. y J.L. Rouanet. 1999. Antecedentes económicos de producción de trigo en sistemas de manejo de suelo: Alternativos para la temporada 1997-1998 y 1998-1999. *Agricultura conservacionista en cultivos anuales, agricultura de futuro.* Acta 3: 31-40.
- MacDonald, A.J., P.R. Poulton, D.S. Powlson y D.S. Jenkinson. 1997. Effects of season, soil type and cropping on recoveries, residues and losses of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to arable crops in spring. *J. Agric. Sci.* 129: 125-154.
- Navia, M., I. Pino, W. Luzio y A.M. Parada. 1997. Evaluación de la eficiencia de superfosfato triple y roca fosfórica en doce variedades de trigo utilizando el método de dilución isotópica. Parte 2: Parámetros isotópicos. *Terra* 15: 21-27.
- Olson, R.C. 1982. Immobilization, nitrification and losses of fall-applied, labeled ammonium-nitrogen during growth of winterwheat. *Agron. J.* 74: 991-996.
- Peyrelongue, A., I. Pino y M. Buneder. 1997. Evaluación de fuentes nitrogenadas (¹⁵N) en tres variedades de trigo, en un Andisol y un Ultisol de la IX Región. I. Efecto en el rendimiento, absorción y eficiencia de uso de N estimada por método convencional. *Agric. Téc.* 57: 87-95.

- Power, J.F. y G.A. Peterson. 1998. Nitrogen transformation, utilization, and conservation as affected by fallow tillage method. *Soil Tillage Res.* 49(1-2): 37-47.
- Powson, D.S., P.B.S. Hart, P.R. Poulton, A.E. Johnston y D.S. Jenkinson. 1992. Influence of soil type, crop management and weather on the recovery of ^{15}N -labelled fertilizer applied to winter wheat in spring. *J. Agric. Sci.* 118: 83-100.
- Rouanet, J.L. 1996. Labranza conservacionista. Respuesta productiva de los cultivos anuales. *Tierra Adentro* 10: 44-46.
- Rouanet, J.L., P. Barriga, J.C. García y J. Santander. 1991. Estabilidad geográfica de cultivares de trigo en la IX Región de Chile. *Agro Sur* 19(2) 79-87.
- Rouanet, J.L., I. Pino, A.M. Parada y A. Nario. 1999a. Nitrógeno en producción de trigo, eficiencia de uso de N-fertilizante por la planta y N-fertilizante en el suelo. p. 42. *In:* Agricultura Conservacionista en Cultivos Anuales, Agricultura de Futuro. Serie Acta 3. INIA-Carillanca. Temuco, Chile
- Rouanet, J.L., I. Pino, A.M. Parada, H. Uribe, A. Nario, A. Godoy, M. Mera y A. Montenegro. 1999b. Aplicaciones de las técnicas isotópicas con ^{15}N en el estudio de la recuperación del nitrógeno fertilizante en el suelo y su absorción por la planta en sistemas de producción de trigo. *Nucleotécnica* 19(33): 33-43.
- Sijtsma, C.H., A.J. Campbell, N.B. McLaughlin y M.R. Carter. 1998. Comparative tillage costs for crop rotations utilizing minimum tillage on a farm scale. *Soil Tillage Res.* 49(3): 223-231.
- Zadoks, J.C., T.T.T. Chang y C.F. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.

EVALUACION DE LA FIJACION SIMBIOTICA DE NITROGENO DE *Lupinus albus* y *L. angustifolius* EN UN ANDISOL VILCUN DEL SUR DE CHILE¹

Evaluation of the Symbiotic Nitrogen Fixation of *Lupinus albus* and *L. angustifolius* in a Vilcun Andisol of Southern Chile

Leticia Barrientos D.², Adolfo Montenegro B.² e Inés Pino N.³

RESUMEN

Las leguminosas han formado parte de los sistemas de producción de cultivos del sur de Chile desempeñando papeles de trascendencia en su sostenibilidad. Dentro de éstas, *Lupinus albus* y *L. angustifolius* se han incluido como alternativa en las rotaciones, puesto que estas leguminosas pueden satisfacer gran parte de su requerimiento de nitrógeno por medio de la fijación simbiótica. Con el objetivo de comparar la cantidad de N fijado por ambas especies y su distribución en distintos órganos de la planta durante diferentes periodos en su ciclo de crecimiento, se realizó un experimento de campo en un Andisol de la serie Vilcún, para lo cual se utilizó la técnica de la dilución isotópica de ¹⁵N. Se utilizaron 10 kg de ¹⁵N ha⁻¹ con 9.381% átomos en exceso, aplicados en forma de sulfato de amonio en las microparcels con lupino y en aquellas con el cultivo de referencia (*Avena sativa* cv. Nehuén). En la primera evaluación [45 días después de la siembra (DDS)] se determinó que *L. albus* cv. Lolita fijó 39 kg de N ha⁻¹ y que *L. angustifolius* cv. Gungurru fijó 25 kg de N ha⁻¹, equivalentes a 69 y 49% de N derivado del aire, respectivamente. En la segunda evaluación (80 DDS), *L. albus* cv. Lolita fijó 282 kg de N ha⁻¹ y *L. angustifolius* cv. Gungurru fijó 197 kg de N ha⁻¹, lo que equivale a 95 y 91% de N derivado del aire, respectivamente. A la cosecha (160 DDS), el contenido de proteína promedio del grano de *L. albus* fue 38%, en tanto que en *L. angustifolius* fue 23%. Estos resultados demostraron que *L. albus* cv. Lolita y *L. angustifolius* cv. Gungurru tienen la capacidad de fijar elevadas cantidades de N en el Andisol Vilcún,

y que el menor contenido de proteína en el grano de *L. angustifolius* cv. Gungurru sería una consecuencia del hábito indeterminado de crecimiento que caracteriza a esta especie en el sur de Chile.

Palabras clave: Lupino, ¹⁵N, crecimiento indeterminado, Andisol.

SUMMARY

In Southern Chile, Leguminae have formed an important part of crop cultivation systems performing relevant roles in their sustainability. Among these crops, *Lupinus albus* and *L. angustifolius* have been included as alternatives in crop rotation since these legumes can satisfy a great proportion of their nitrogen requirement by means of symbiotic nitrogen fixation. A field experiment in a Vilcun Andisol was conducted to assess the nitrogen fixation rates and to study the N distribution in different parts of the plants during the reproductive phase of both lupine species using the ¹⁵N isotope dilution technique. 10 kg of ¹⁵N ha⁻¹ at 9.381% atom excess were applied as ammonium sulphate in both fields, one with lupine and the other with the reference crop (*Avena sativa* cv. Nehuen). In the first evaluation [45 days after seeding (DDS)] it was determined that *L. albus* cv. Lolita fixed 39 kg of N ha⁻¹ and *L. angustifolius* cv. Gungurru fixed 25 kg of N ha⁻¹ which was equivalent to 69 and 49% of N derived from air, respectively. In the second evaluation (80 DDS) *L. albus* cv. Lolita fixed 282 kg N ha⁻¹ and *L. angustifolius* cv. Gungurru fixed 197 kg N ha⁻¹ which was equivalent to 95 and 91% of N derived from air, respectively. By the time of harvesting (160 DDS), the grain protein content of *L. albus* was 38%, being 23% in *L. angustifolius*. These results have demonstrated that *L. albus* cv. Lolita and *L. angustifolius* cv. Gungurru have the capacity of fixing great quantities of N from air in a Vilcun Andisol. The differences in grain protein content are due to the indeterminate growth habit that

¹ Investigación financiada por Proyecto CHI 5/020, OIEA-CCHEN-INIA.

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Carillanca. Casilla 58-D, Temuco, Chile. (bardleti@carillanca.inia.cl)

³ Comisión Chilena de Energía Nuclear, CEN La Reina. Casilla 188-D, Santiago, Chile.

characterizes *L. angustifolius* cv. Gungurru in Southern Chile.

Index words: *Lupine*, ^{15}N , *indeterminate growth*, *Andisol*.

INTRODUCCION

El género *Lupinus* comprende alrededor de 500 especies, de las cuales alrededor de 10 se encuentran presentes en Chile. Entre éstas, cuatro especies están consideradas como nativas (Marticorena y Quezada, 1985), mientras que el resto corresponde a introducciones, ya sea para protección ambiental, como forrajeras, ornamentales, abono verde, o cultivadas (Peñaloza, 1997).

Entre las especies cultivadas, *L. albus* y *L. angustifolius* corresponden a aquellas comercialmente más importantes para la producción de grano en el sur de Chile, las que se han incorporado en sistemas de producción basados, en principio, en la rotación con cereales (Peñaloza, 1996). En conjunto, la superficie cultivada con ambos lupinos alcanzó 19 000 ha en la temporada 1998/1999, con 100% concentradas en la IX Región (INE, 1999).

De acuerdo con cifras de la FAO (1994), el consumo de nitrógeno en el país se ha incrementado durante el último tiempo y representa más de 50% del total de los fertilizantes utilizados en el sector silvoagropecuario. Frente a esta dependencia, resulta importante considerar la existencia de especies con la capacidad de fijar N atmosférico, cuyo impacto en la sostenibilidad de los sistemas no se ha dimensionado en toda su magnitud. Dentro de este grupo de especies destaca *L. angustifolius*, cuyos aportes de N a los sistemas, por vía de la fijación biológica, se han estimado entre 150 y 222 kg ha⁻¹ año⁻¹ en suelos del sudoeste de Australia (Unkovich *et al.*, 1994).

Con el objetivo de comparar la cantidad de N fijado por *L. albus* y *L. angustifolius* y su distribución en distintos órganos de la planta durante diferentes periodos en su ciclo de crecimiento se realizó, en un Andisol de la serie Vilcún, un experimento de campo en el Centro Regional de Investigación Carillanca, para lo cual se utilizó la técnica de la dilución isotópica de ^{15}N .

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en un Andisol plano de la serie Vilcún (Typic Dystrandep) (Mella y Kuhne,

1985), del Centro Regional de Investigación INIA-Carillanca (38°41' sur, 72°25' oeste; a una altitud de 200 m), cuya caracterización química se indica en el Cuadro 1. La determinación de los valores de los parámetros químicos del suelo se realizó de acuerdo con la metodología señalada por Sadzawka (1990). Se utilizaron dos especies de lupino: *Lupinus albus* cv. Lolita y *Lupinus angustifolius* cv. Gungurru, y *Avena sativa* cv. Nehuén como cultivo de referencia, en un diseño de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. El estudio incluyó tres fechas de muestreo. Cada parcela experimental consistió en ocho hileras de 6 m de largo con separación de 25 cm entre hileras. Se utilizó una dosis de siembra de 120 kg semilla ha⁻¹ en lupino y de 160 kg semilla ha⁻¹ en avena.

La fertilización base para lupino consistió en 72 kg de K₂O ha⁻¹. La fertilización base para avena consistió en 47 kg de P₂O₅ ha⁻¹ y 72 kg de K₂O ha⁻¹, aplicados como superfosfato triple y muriato de potasio, respectivamente. El nitrógeno marcado se aplicó como sulfato de amonio con 9.381% átomos en exceso, en dosis de 10 kg N ha⁻¹. Sólo se marcó una microparcela de 2 m², ubicada dentro de cada parcela experimental. El resto de la parcela recibió la misma dosis de N pero en la forma de salitre sódico (NaNO₃). La cantidad de N₂ fijado por el lupino se determinó utilizando la técnica de dilución isotópica (Fried y Middelboe, 1977).

La semilla de lupino se inoculó, previo a la siembra, con inoculante líquido preparado con una mezcla de cepas de *Bradyrhizobium* del Laboratorio de Microbiología de Suelos del CRI Carillanca. Posteriormente, la semilla inoculada se recubrió con CaCO₃ finamente molido.

Cuadro 1. Caracterización química del Andisol Vilcún.

Parámetro químico	
N inorgánico disponible (mg kg ⁻¹)	20.00
P Olsen (mg kg ⁻¹)	25.00
pH agua 1:2.5	6.10
Materia orgánica (%)	15.00
Ca intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	8.14
Mg intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	1.22
K intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	0.21
Na intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	0.28
Suma bases (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	9.85
Al intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	0.01
CICE (Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo) (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	9.86
Al saturación (%)	0.10

El ensayo se sembró el 22 de agosto de 1997 y el nitrógeno marcado isotópicamente, equivalente a 10 kg de N ha⁻¹, se aplicó a las microparcels una semana después, mediante un aspersor manual. Posterior al primer muestreo, se realizó una limpieza manual de malezas. Las malezas presentes en las parcelas marcadas isotópicamente se sacaron manualmente y se depositaron en la superficie de la respectiva microparcels. Las malezas de las parcelas experimentales se eliminaron del ensayo.

El muestreo de plantas se realizó en tres estadios fenológicos: 50% floración de ramas de primer orden [45 días después de la siembra (DDS)]; término de floración de ramas de segundo orden (80 DDS); y a la cosecha (160 DDS). En cada periodo se cosechó 50 cm lineales de dos hileras adyacentes marcadas con ¹⁵N. Las muestras se pesaron, se cortaron en trozos de 10 a 20 mm y se secaron a 65 °C. Las muestras de lupino en el primer muestreo se separaron en eje principal, ramas de primer orden, hojas, flores y raíces; en el segundo muestreo en eje principal, ramas de primer orden, hojas, vainas y raíces; y a la cosecha en eje principal, ramas de primer orden, vainas, granos y raíces. Las muestras de avena se separaron a la cosecha en tallo, hojas, cáscara y granos. La cosecha se realizó el 29 de enero, totalizando un ciclo de cultivo de 160 días. Tanto las determinaciones de ¹⁵N (átomos en exceso en plantas y en el fertilizante) como las de N total en plantas, se realizaron en el Laboratorio de Técnicas Nucleares en Agricultura de la Comisión Chilena de Energía Nuclear. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa SAS, (1989). Los resultados obtenidos se sometieron a análisis de varianza y las medias de los tratamientos a la prueba de Tukey (P ≤ 0.05).

RESULTADOS Y DISCUSION

El uso de fertilizantes marcados con ¹⁵N provee una medida integrada de la cantidad de nitrógeno fijado y acumulado por el cultivo durante el ciclo de crecimiento (Danso *et al.*, 1999). Los métodos de ¹⁵N son potencialmente precisos para medir la fijación de N₂ en las plantas. Esta técnica, sin embargo, requiere el uso de cultivos de referencia. En este estudio, se utilizó avena como cultivo de referencia, puesto que no se dispone de isólinas de lupino no nodulante, en tanto que otras leguminosas no nodulantes, como arveja y soya, no se desarrollan adecuadamente en las condiciones climáticas de la IX Región. Los errores resultantes del uso de una planta de referencia

inadecuada pudieran ser significativos cuando la fijación de N₂ es baja (inferior a 30%) y disminuyen cuando las tasas de fijación se incrementan (arriba de 60%) (Danso *et al.*, 1999). Dada las tasas de fijación de N₂ obtenidas en este estudio, la elección de la avena como cultivo de referencia fue adecuada.

En la Figura 1 se presentan los resultados para materia seca (kg ha⁻¹) en *L. albus* y *L. angustifolius*. Estos valores se obtuvieron en cultivos con rendimiento de grano de 3600 kg ha⁻¹ en *L. albus* cv. Lolita y de 4900 kg ha⁻¹ en *L. angustifolius* cv. Gungurru, normales a los esperados para la IX Región. En las tres épocas de muestreo, se observaron valores de fitomasa aérea similares en las dos especies de lupino y no hubo diferencias estadísticamente significativas en los parámetros evaluados (P ≤ 0.05).

En la Figura 2, se presentan los porcentajes de asimilación de N del fertilizante, del suelo y del aire. De acuerdo con los resultados, 45 DDS, *L. albus* obtuvo 69% del N derivado del aire (N_{da}) y *L. angustifolius* 49% de N_{da}. En el segundo periodo de muestreo, el N_{da} que se observó en ambos cultivares fue cercano a 90%. A la cosecha, el N_{da} fue superior a 80% en los dos cultivares de lupino. No se observaron diferencias estadísticamente significativas en los parámetros evaluados (P ≤ 0.05). En el tercer muestreo no están consideradas las hojas, por lo que este dato y los kg de N fijados ha⁻¹ están disminuidos por ese motivo. No obstante la alta tasa de fijación que presentaron estas dos especies de lupino, el suelo y, en menor medida, el fertilizante, también aportaron este elemento para cumplir con las necesidades de las plantas de lupino.

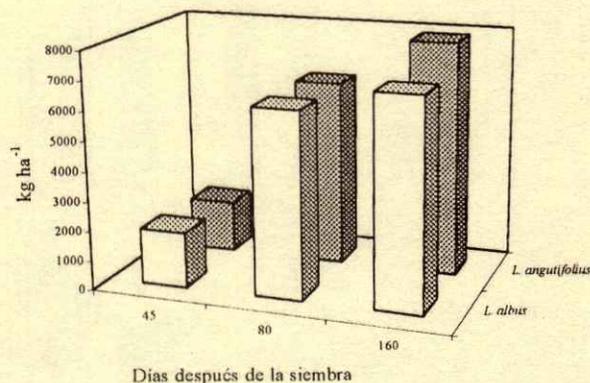


Figura 1. Materia seca (kg ha⁻¹) de *L. albus* cv. Lolita y *L. angustifolius* cv. Gungurru, en tres periodos de muestreo, en un Andisol Vilcún.

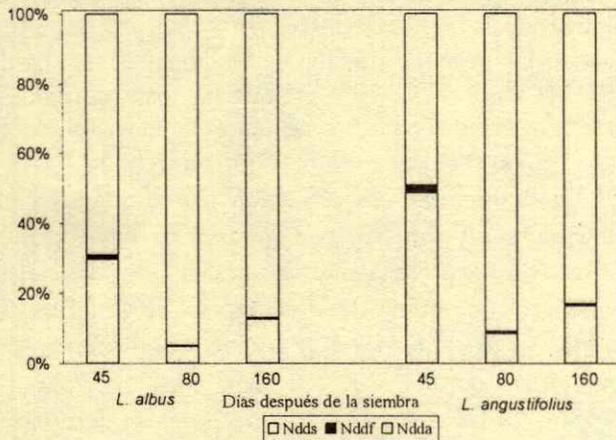


Figura 2. Asimilación de N del suelo (% Ndds), fertilizante (% Nddf) y N_2 fijado (% Ndfa) en *L. albus* cv. Lolita y en *L. angustifolius* cv. Gungurru, en un Andisol Vilcún

La acumulación del N total y fijado durante el ciclo de crecimiento de los dos cultivares de lupino estudiados se presenta en la Figura 3. Con respecto a los kg de N fijados ha^{-1} , el cultivar Lolita obtuvo de la atmósfera 39, 282 y 186 kg N ha^{-1} , en las tres épocas de muestreo investigadas. Por su parte, el cultivar Gungurru obtuvo desde la atmósfera 25, 197 y 127 kg N ha^{-1} , en cada uno de los muestreos realizados. Se observaron diferencias estadísticamente significativas sólo en la primera época de muestreo evaluada ($P \leq 0.05$). Las plantas de *L. albus* mostraron tendencia a absorber mayor cantidad de nitrógeno (57, 296 y 214 kg N ha^{-1}), al compararlas con lo

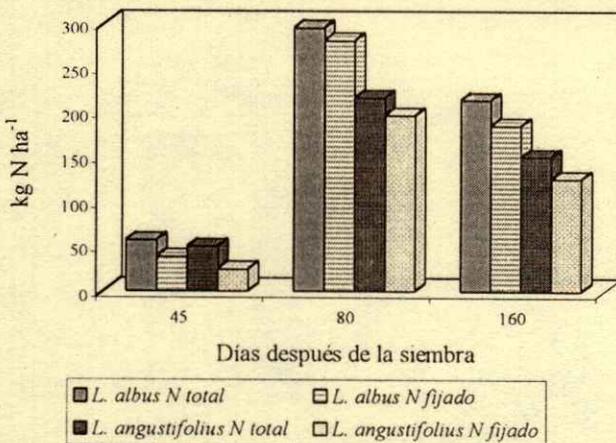


Figura 3. Nitrógeno total absorbido ($kg\ ha^{-1}$) y nitrógeno derivado de la atmósfera ($kg\ ha^{-1}$) acumulados durante el ciclo de crecimiento en *L. albus* cv. Lolita y *L. angustifolius* cv. Gungurru, en un Andisol Vilcún.

absorbido por *L. angustifolius* (50, 217 y 151 $kg\ N\ ha^{-1}$). Ambos cultivares presentaron patrones similares y, en ambos casos, la máxima acumulación de N se produjo en los primeros 80 días de crecimiento. El cultivar Lolita acumuló mayor cantidad de nitrógeno que el cultivar Gungurru. En el periodo de cosecha estos valores disminuyeron. Esta comparación permite señalar que los patrones de asimilación de nitrógeno estuvieron influenciados por la especie de lupino.

En Chile, no existen informes previos de datos de fijación simbiótica en lupino con técnicas isotópicas en este tipo de suelos. Barrientos *et al.* (1999) señalaron que en un Ultisol, *L. albus* cv. Rumbo obtuvo 93 y 90% del N derivado del aire, equivalentes a 107 $kg\ N\ ha^{-1}$ y 66 $kg\ N\ ha^{-1}$, en las temporadas agrícolas 1997/1998 y 1998/1999, respectivamente. Este ensayo se realizó en otro suelo con características químicas y físicas muy diferentes a las del suelo del presente estudio. En suelos arenosos de Australia, la acumulación de N en *L. angustifolius*, en el periodo de máxima biomasa, fluctuó entre 199 y 372 $kg\ ha^{-1}$, con un promedio de N fijado de 190 $kg\ N\ ha^{-1}$ y una tasa de fijación de 86%. Otro reporte, también de Australia, hace referencia a fijaciones de N en lupino entre 90 y 151 $kg\ N\ ha^{-1}$, con tasas de fijación sobre 80% (Anderson *et al.*, 1998).

La alta dependencia de la fijación biológica para suplir las necesidades de N en ambas especies de lupino se demostró en ensayos realizados en diversos ambientes de la IX Región, en los cuales no se observó respuesta positiva a la aplicación de N (Barrientos *et al.*, 1996). Estos resultados confirman lo señalado por Hardarson *et al.* (1987) y FAO (1984) quienes indicaron que entre las leguminosas de grano, el haba (*Vicia faba*), el frijol de árbol (*Cajanus cajan*) y los lupinos (*Lupinus* spp.) se han indicado como muy eficientes en la fijación simbiótica de nitrógeno; otros, como: soya (*Glycine max*), maní (*Arachis hypogea*) y caupí (*Vigna unguiculata*) están en el promedio; en tanto que frijol común (*Phaseolus vulgaris*) y arveja (*Pisum sativum*) son pobres fijadores de nitrógeno atmosférico.

El estudio de distribución de N total (%) en estructuras aéreas (Figura 4) no detectó diferencias en N fijado, tanto en el eje principal como en ramas de primer orden, hojas, flores y raíces a 45 DDS, indicando que el N fijado se movilizó de manera similar en ambas especies. Sin embargo, éste fue 50% inferior en ramas de primer orden de *L. angustifolius* a 80 y 160 DDS, comparado con *L. albus*, en tanto que

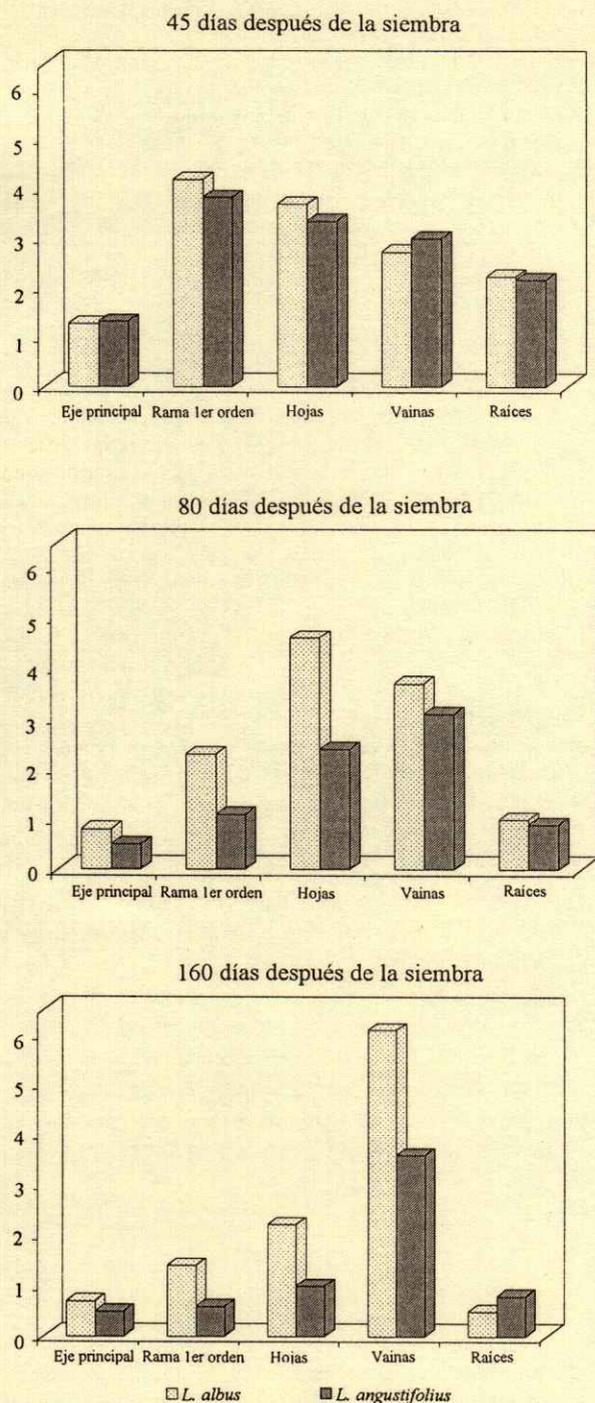


Figura 4. Contenido de N total (%) de diferentes órganos vegetales del lupino, durante el ciclo de crecimiento de *L. albus* cv. Lolita y *L. angustifolius* cv. Gungurru.

éste no difirió entre especies, cuando se comparó el eje principal. Se observaron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) a 80 DDS en el contenido de N total (%) entre las especies de lupino en ramas de primer orden y hojas, en tanto que a

160 DDS, se observaron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) entre las especies de lupino en el contenido de N total (%) de ramas de primer orden, vainas y granos.

Rojas (1996) señaló que, en la IX Región de Chile, los granos de ambas especies de lupino se caracterizan por presentar altos niveles de proteína, que los hacen altamente atractivos para integrar raciones concentradas para alimentación animal. Sin embargo, este autor también indicó que, en esta región, el *L. angustifolius* presenta variación proteica en el grano, fluctuante entre 33 y 26%, lo que no se observa en *L. albus*. Von Baer y Pérez (1991) también señalaron esta variación en el contenido de proteínas de ambos lupinos. En este experimento, el contenido de proteína del grano de *L. albus* alcanzó un promedio de 38%, en cambio, *L. angustifolius* presentó sólo 23%, con diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$). Qifu *et al.* (1998) señalaron que el suministro de nitrógeno tuvo un efecto sustancial en el contenido de N del grano y rendimiento del grano en *L. angustifolius*. Gran parte del N de la planta es derivado hacia el grano del lupino y los resultados de estos autores sugieren que cualquier deficiencia que afecte la absorción de N de la planta antes, durante o después del llenado de granos puede afectar la concentración final de N en las semillas y también el rendimiento en grano del cultivo de *L. angustifolius*.

El desarrollo vegetativo de algunas especies de lupino es indeterminado y comienza con la formación de un eje principal en el cual se desarrolla una inflorescencia terminal. Luego surgen ramas desde las axilas de las hojas situadas directamente bajo la inflorescencia del eje principal, las que son llamadas ramas de primer orden. De manera similar, surgen ramas de segundo orden desde las axilas de las hojas de las ramas de primer orden y así sucesivamente. Los lupinos con hábito de crecimiento indeterminado pueden desarrollar repetidas ramas laterales si las condiciones climáticas son favorables (Hardy *et al.*, 1998). De esta forma, el menor contenido de proteínas en el grano de *L. angustifolius* cultivado en el sur de Chile, respecto de otros países (Peñaloza, 1997), sería consecuencia de la inadecuada movilización de N hacia ramificaciones más tardías o redistribución de asimilados hacia estructuras vegetativas, de manera que los granos de mayor contenido de proteínas se localizarían en la primera flor, reduciéndose en estructuras reproductivas más tardías. Si bien no se dispone de cuantificaciones del contenido de N en el grano, de acuerdo con su posición en el patrón de

ramificación, resultados informados por Farrington *et al.* (1977) señalan que el contenido de N se reduce hacia el ápice de la planta. Estos resultados sugieren que el menor contenido promedio de proteínas en el grano de *L. angustifolius* sería consecuencia del hábito indeterminado que caracteriza a esta especie en el sur de Chile y no estaría asociado a una menor capacidad biológica para fijar N atmosférico.

CONCLUSIONES

La utilización de técnicas isotópicas permite indicar que las dos especies de lupino estudiadas se comportaron eficientemente en la fijación de nitrógeno atmosférico, lo que los hace cultivos muy interesantes para los sistemas agrícolas de la IX Región de Chile, no sólo por el ahorro de fertilizantes nitrogenados, sino también por la importante contribución que pueden hacer para lograr una producción agrícola sostenible.

LITERATURA CITADA

- Anderson, G., I. Fillery, P. Dolling y S. Asseng. 1998. Nitrogen and water flows under pasture-wheat and lupin-wheat rotations in deep sands in Western Australia. 1. Nitrogen fixation in legumes, net N mineralisation, and utilisation of soil-derived nitrogen. *Austr. J. Agric. Res.* 49: 329-343.
- Barrientos, L., E. Peñaloza y E. Méndez. 1996. Respuesta del lupino a inoculantes comerciales y fertilización nitrogenada. pp. 108-113. *In: E. Peñaloza y Romero (eds.). Avances en investigación en lupino. Serie Carillanca 51.*
- Barrientos, L., A. Montenegro, I. Pino, J. Rouanet y E. Peñaloza. 1999. Fijación simbiótica de nitrógeno en *Lupinus albus* en diferentes sistemas de manejo del suelo en un Ultisol de la IX Región de Chile. pp. 6-8. *In: R. Alvarez (ed.). Boletín especial. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Jornada Técnica Biología del Suelo en Siembra Directa. 14 y 15 de octubre. INTA CHILE, Buenos Aires, Argentina.*
- Danso, K.A.S., G. Hardarson y F. Zapata. 1999. Conceptos erróneos y problemas prácticos en el uso de las técnicas de enriquecimiento del suelo con ^{15}N para estimar la fijación de N_2 . pp. 25-57. *In: J.J. Peña Cabrales y F. Zapata, (eds.). Aumento de la fijación biológica del nitrógeno en el frijol común en América Latina. IMPROSA. Irapuato, Gto., México.*
- FAO. 1984. Legume inoculants and their use. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- FAO. 1994. Anuario de fertilizantes. Vol. 44. Colección FAO, Estadístico 126. Roma, Italia.
- Farrington, P., E.A.N. Greenwood, Z.V. Titmanis, M.J. Trinick y W.D. Smith. 1977. Fixation, accumulation, and distribution of nitrogen in a crop of *Lupinus angustifolius* cv. Unicrop. *Austr. J. Agric. Res.* 28: 237-248.
- Fried, M. y V. Middelboe. 1977. Measurement of amount of fixed nitrogen by a legume crop. *Plant Soil* 47: 713-715.
- Hardarson, G., S.K.A. Danso y F. Zapata. 1987. Biological nitrogen fixation in field crops. pp. 165-192. *In: B.R. Christie (ed.). Handbook of plant science in agriculture. CRC Press. Boca Raton, FL.*
- Hardy, A., C. Huyghe, M.A. Rahim, P. Roemer, J.M. Neves-Martins, E. Sawicka-Sienkiewicz y P.D.S. Caligari. 1998. Effects of genotype and environment on architecture and flowering time of indeterminate Andean lupins (*Lupinus mutabilis* Sweet). *Austr. J. Agric. Res.* 49: 1241-1251.
- INE. Instituto Nacional de Estadísticas. 1999. Informes anuales temporada agrícola 1998/99. INE. Santiago, Chile.
- Marticorena, C. y M. Quezada. 1985. Flora vascular de Chile. *Gayana Botánica* 42: 1-2.
- Mella, A. y A. Kuhne. 1985. Sistemática y descripción de las familias, asociaciones y series de suelos derivados de materiales piroclásticos de la zona central sur de Chile. pp. 549-716. *In: J. Tosso (ed.). Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura. Santiago.*
- Peñaloza, E. 1996. El lupino en los sistemas de producción. pp. 18-26. *In: E. Peñaloza y Romero (eds.). Serie Carillanca 51.*
- Peñaloza, E. 1997. El lupino para grano. pp. 213-220. *In: Anuario del Campo. Alternativas para la modernización y diversificación agrícola. Lo Castillo. Chile.*
- Qifu, M., N. Longnecker, N. Emery y C. Atkins. 1998. Growth and yield in *Lupinus angustifolius* are depressed by early transient nitrogen deficiency. *Austr. J. Agric. Res.* 49: 811-819.
- Rojas, C. 1996. El grano de lupino dulce en la engorda de novillos. pp. 27-34. *In: E. Peñaloza y Romero (eds.). Avances en investigación en lupino. Serie Carillanca 51.*
- Sadzawka, R.A. 1990. Métodos de análisis de suelos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Serie La Platina 16. Santiago, Chile.
- SAS Institute. 1989. User's Guide. Version 6. 4th ed. Vol. 2. Cary, NC.
- Unkovich, M., J. Pate y J. Hamblin. 1994. The nitrogen economy of broad acre lupin in Southwest Australia. *Austr. J. Agric. Res.* 45: 149-164.
- Von Baer, D. e I. Perez. 1991. Quality standard propositions for commercial grain of white lupin (*Lupinus albus*). pp. 158-167. *In: D. von Baer (ed.). Proc. 6th International Lupin Conference. Asociación Chilena del Lupino. Chile.*

RECICLAJE DE NITROGENO EN UNA SUCESION FRIJOL-MAIZ-FRIJOL EN SUELO FERRALITICO USANDO EL METODO ISOTOPICO

Nitrogen Recycling in a Common Bean-Maize-Common Bean Sequence on a Ferralitic Soil by Means of the Isotopic Method

Graciela Dueñas¹, Olegario Muñiz¹, Tamara Sánchez¹, Luis Gómez¹ y Hugo Alvarez²

RESUMEN

El suelo Ferralítico Rojo (Rhodic Ferralsol) es representativo de la provincia La Habana y por su elevada fertilidad y productividad es el más explotado para la producción agrícola. Esto ha conducido a su gradual deterioro, de ahí la importancia de establecer sucesiones de cultivos, por ejemplo maíz (*Zea mays*)-frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) que favorezcan la fertilidad del suelo. Por este motivo, se desarrolló un experimento en condiciones de campo para determinar el reciclaje de N en una sucesión frijol común-maíz-frijol común, en dos localidades experimentales con diferente disponibilidad de fósforo, sobre suelo Ferralítico Rojo (Rhodic Ferralsol) con el empleo del isótopo estable ¹⁵N. Se condujo un experimento con dos tratamientos y cinco repeticiones, uno que contempla la sucesión, sin cultivo-maíz-frijol común y el otro, frijol común-maíz-frijol común. El frijol común se inoculó con cepas de *Rhizobium* y se le aplicó 15 kg N ha⁻¹ como iniciador. Al maíz se le aplicaron 39 kg N ha⁻¹ en la forma de sulfato de amonio 3.4 % ¹⁵N a.e. para determinar el porcentaje de N derivado del fertilizante, del suelo y del residuo. Los residuos de maíz marcados, a su vez, se incorporaron previamente a un segundo cultivo de frijol común. Además, se incluyeron tratamientos testigo, uno donde no se aplicó N y el otro donde se utilizó frijol no nodulante para evaluar la fijación biológica del N. Se encontró que la incorporación de los residuos del frijol común aportaron entre 19 y 22 kg N ha⁻¹ al maíz que le sucedió, que el uso del *Rhizobium* permitió al frijol común fijar de la atmósfera hasta 60% de su requerimiento de N y que

el contenido de fósforo del suelo influyó en la fijación biológica de N (FBN) del frijol común.

Palabras clave: Técnicas nucleares, nutrición de plantas, suelo ferralítico rojo.

SUMMARY

Red Ferralitic soil (Rhodic Ferralsol) is the representative soil of the Havana province and because of its high fertility and productivity it is the most used for agricultural production, which leads to progressive soil degradation. Establishment of crop sequences like maize-bean that favors soil fertility is encouraged. For this reason, an experiment was developed in order to determine N recycling in a common bean-maize-common bean sequence on Red Ferralitic soil (Rhodic Ferralsol) with the employment of the stable isotope ¹⁵N, in two experimental lots with different P availability. An experiment with two treatments and five replications was carried out. The first consisted of no crop-maize-bean sequence and the second consisted of common bean-maize-common bean sequence. The bean was inoculated with strains of *Rhizobium* and received also 15 kg N ha⁻¹ as starter. Thirty-nine kg N ha⁻¹ were applied to maize in the form of ammonium sulfate 3.4 % ¹⁵N a.e. in order to determine the percentage of N derived from fertilizer, from soil and from residues. The residues of marked maize were previously incorporated to a second common bean crop. Two control treatments were also included, the first one had no N application and the second one used a No Nod bean cultivar in order to evaluate the N biological fixation. It was found that the incorporation of bean residues supplied between 19 and 22 kg N ha⁻¹ to the successive maize crop, that the use of the *Rhizobium* allowed the common bean crop to fix up to 60% of the N requirement and that soil P availability influenced the bean N biological fixation.

Index words: Nuclear techniques, plant nutrition, Rhodic Ferralsol.

¹ Instituto de Suelos, Apartado Postal 8022, 10800 Habana, Cuba. (larenee@ceniainf.cu).

² Instituto de Investigaciones de la Agricultura Tropical "Alejandro Humboldt (INIFAT), 19290 Santiago de las Vegas, Habana, Cuba.

INTRODUCCION

El suelo Ferralítico Rojo (Rhodic Ferralsol) de la provincia Habana, que constituye sólo 2.1% de la superficie total de Cuba, es por su elevada fertilidad y productividad, el más explotado para la producción de alimentos (tubérculos, raíces, hortalizas, banano y granos), destinados tanto a la población de esta provincia como de la provincia Ciudad Habana (capital de Cuba) que totaliza más de 3.5 millones de habitantes, casi la tercera parte de la población de Cuba.

Durante las últimas décadas, la intensificación y modernización de la actividad agrícola en la provincia Habana, comprendió la introducción de implementos y máquinas pesadas para la preparación de las tierras y de sistemas de riego de alta productividad, así como el abuso en el empleo de fertilizantes químicos y pesticidas lo que, unido al poco uso de abonos orgánicos, dio lugar a la degradación de estos suelos: aparición de capas compactas de espesor variable cerca de 15 cm de profundidad, disminución del contenido de materia orgánica del suelo, incremento de los valores de pH y disminución de la microflora edáfica. Esta situación, unida a los procesos de cambios climáticos y el monocultivo, ha causada la caída del rendimiento agrícola por lo que las instituciones científicas de Cuba, se han volcado a la búsqueda de tecnologías para el uso y manejo más adecuado de los suelos Ferralíticos Rojos de la provincia Habana que permitan el incremento del rendimiento agrícola con criterios de sostenibilidad.

La pérdida de la materia orgánica de estos suelos rige, en primer lugar, el deterioro del estado estructural de los mismos, promueve y agrava la compactación, lo cual se observa en el estado físico que muestran dichos suelos. El laboreo mínimo, la rotación de cultivos y la introducción del abono verde permiten detener el fenómeno de la compactación, mostrando un viraje en los valores de las propiedades físicas que los caracterizan, que indican una franca recuperación del estado estructural del suelo, haciendo su fertilidad sostenible (Alfonso y Monedero, 1999).

Con este fin, existe el Programa Nacional de Producción de Alimentos por Métodos Sostenibles que contempla varios proyectos que persiguen revertir el proceso degradativo y que incluye el desarrollo de sistemas de rotación con cultivos como el maíz y el frijol común cuya producción se propone incrementar.

El método isotópico permite medir la absorción de nutrimentos por la planta, proveniente de los fertilizantes, de los residuos de cosecha y del suelo, de forma más exacta y en menos tiempo que el método convencional (Zapata, 1990); esto constituye una valiosa herramienta de trabajo en el establecimiento de las medidas para el manejo integrado de los suelos agrícolas.

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar, mediante el isótopo ^{15}N , el reciclaje de N en una sucesión frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)-maíz (*Zea mays*)-frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) y se inscribe dentro del esfuerzo que realiza en este sentido la Estación Experimental La Renée del Instituto de Suelos, como centro rector de la actividad de suelos en la provincia Habana.

MATERIALES Y METODOS

Suelo Ferralítico Rojo

Los suelos Ferralíticos Rojos (Rhodic Ferralsol) ocupan un área de cerca de 780 000 ha en Cuba. Son suelos de perfil ABC, profundos, desarrollados sobre caliza, en los que predomina el color rojo, son permeables, formados por arcilla del tipo 1:1 e hidróxidos de hierro y aluminio. Son suelos originalmente ligeramente ácidos, poseen contenido de materia orgánica de hasta 5% y capacidad de intercambio catiónico de $20 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$. En términos generales, son considerados suelos fértiles y productivos.

Cincuenta y siete por ciento de la superficie agropecuaria de la provincia Habana está constituida por este tipo de suelo donde recae la producción intensiva de alimentos para la población.

Clima

Cuba cuenta con dos etapas de distribución de las lluvias bien definidas: la estación seca de noviembre a abril y la lluviosa de mayo a octubre (80% de las lluvias). La precipitación media anual de la provincia Habana es de 1454 mm, cercana a la de Cuba, 1375 mm. La humedad atmosférica relativa media es de 80% y oscila espacial y temporalmente entre 60 y 95%.

La temperatura media de la llanura Habana es de 24°C , la temperatura máxima en verano fluctúa entre 30 y 34°C , mientras que la mínima en invierno entre 15 y 20°C .

Ensayos Desarrollados

Se realizaron ensayos en condiciones de campo sobre suelo Ferralítico Rojo (Rhodic Ferralsol) en dos sitios experimentales: Estación Experimental "La Renée" del Instituto de Suelos y el Instituto Tecnológico "Rubén Martínez Villena", caracterizado el primero por un elevado contenido de fósforo asimilable y el segundo por un bajo contenido del mismo. El Cuadro 1 presenta algunas características de estos suelos.

Para evaluar el reciclaje de N en la sucesión frijol común-maíz-frijol común se desarrolló un esquema en dos etapas experimentales.

Etapas 1. Campaña maíz.

Tratamiento	Cultivo precedente	Cultivo principal
T1	Sin cultivo	Maíz (testigo)
T2	Sin cultivo	Maíz (marcado) [†]
T3	Frijol	Maíz (testigo)
T4	Frijol	Maíz (marcado) [†]

[†] Aplicación de 39 kg N ha⁻¹ en forma de sulfato de amonio 3.4% ¹⁵N a.e. (átomos en exceso).

En el T2 se determinaron % Nddf (Nitrógeno derivado del fertilizante) y % Ndds (Nitrógeno derivado del suelo), en T4 se determinó % Nddf (%Ndds + % Ndd residuos) y T1 y T3 son tratamientos testigo relativos al N.

Etapas 2. Campaña frijol.

Tratamiento	Cultivo precedente	Cultivo principal
T5	Sin cultivo-maíz	Frijol inoculado [†]
T6	Sin cultivo-maíz	Frijol no nodulante [‡]
T7	Frijol-maíz	Frijol inoculado [†]
T8	Frijol-maíz	Frijol no nodulante [‡]

[†] Aplicación de 15 kg N ha⁻¹ en forma de sulfato de amonio comercial.

[‡] Aplicación de 15 kg N ha⁻¹ en forma de sulfato de amonio 3.4% ¹⁵N a.e. (átomos en exceso).

En T5 se incorporaron los residuos de maíz marcados en T2 de la Etapa 1, en T7 se incorporaron los residuos de maíz marcados en T4 de la Etapa 1, en T5 se determinaron % Ndd residuo + (% Nddf + % Ndds + % Ndda), en T6 se determinaron % Nddf + (% Ndds + % Ndd residuo), en T7 se determinaron % Ndd residuo + [% Nddf + % Ndds + % Ndda (Nitrógeno derivado de la atmósfera)], y en T8 se determinaron % Nddf + (% Ndds + % Ndd residuo).

Cada tratamiento se repitió cinco veces y se aplicaron 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 60 kg K₂O ha⁻¹ en la forma

Cuadro 1. Características de los suelos donde se estudió el reciclaje de N en la sucesión frijol común-maíz-frijol común.

Propiedad del suelo	Localidad	
	La Renée	Villena
pH H ₂ O	7.80	7.80
pH KCl	7.15	7.30
Materia orgánica (%)	4.90	2.00
P Olsen (mg kg ⁻¹)	131.40	4.70
Ca ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	16.54	15.06
Mg ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	0.50	1.11
K ⁺ (cmol kg ⁻¹)	0.66	1.95
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹)	0.05	0.05

de superfosfato triple y cloruro de potasio, respectivamente.

La variedad de maíz híbrido (con riego) utilizada fue P-7928 y la de frijol común CC25-9(N), el que se inoculó con cepas de *Rhizobium* CF-1. Las parcelas contaban con seis surcos de 5 m de largo y distancia entre surcos de 0.7 m con un área total de 21 m². Las parcelas isotópicas contaban con dos surcos de 3 m de largo e igual distancia entre surcos para un total de 4.2 m². La siembra se efectuó a mano en las siguientes fechas: 1er cultivo (frijol común): diciembre 1996, 2do cultivo (maíz): abril 1997, 3er cultivo (frijol común): noviembre 1997.

Los resultados obtenidos se evaluaron por un análisis factorial y comparación de medias según la prueba de Newman Keuls; en el caso del rendimiento de maíz se realizó la prueba de contrastes ortogonales.

La preparación de las muestras para la determinación de N total y ¹⁵N se realizó según la metodología establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica (Zapata, 1990), las muestras se leyeron en un equipo NOI-6.

RESULTADOS Y DISCUSION

El rendimiento del maíz se incrementó en las parcelas fertilizadas que tuvieron frijol común como cultivo precedente (Cuadro 2), en ambas localidades estudiadas. El análisis factorial demostró que el factor localidad no influyó significativamente en el rendimiento agrícola, aunque se observó una tendencia marcada a la obtención de mayor rendimiento en la localidad La Renée, lo cual se debió al mayor contenido de materia orgánica (MO) y P presente en el suelo (Cuadro 1).

Los tratamientos probados influyeron significativamente en el rendimiento agrícola, la prueba de contrastes ortogonales evidenció (Cuadro 3)

Cuadro 2. Rendimiento grano de maíz.

Tratamiento	La Renée	Villena	Promedio tratamiento
	Mg de grano ha ⁻¹		
T1 Sin cultivo-maíz (testigo)	2.42	1.85	2.14 b
T2 ¹ Sin cultivo-maíz	2.64	1.98	2.31 ab
T3 Frijol-maíz (testigo)	2.50	2.10	2.30 ab
T4 ¹ Frijol-maíz	2.94	2.55	2.75 a
Promedio localidad	2.63 NS	2.12 NS	

¹ Aplicación de 39 kg N ha⁻¹ en forma de sulfato de amonio 3.4% ¹⁵N a.e. (átomos en exceso).

Letras iguales en columna no difieren significativamente entre sí (Newman Keuls, P < 0.05).

que de los tratamientos el que más influyó en el incremento del rendimiento del maíz fue la incorporación de los residuos de frijol previo a la siembra del maíz. Hamdi (1995) afirmó que el efecto residual de las leguminosas en los cultivos posteriores es uno de los factores más importantes a tener en cuenta cuando éstas son introducidas en un sistema agrícola.

Los resultados obtenidos con ¹⁵N (Cuadro 4) evidenciaron que, en ambos casos, el nitrógeno derivado del fertilizante (%Nddf) en el maíz no disminuyó, es decir, no se manifestó un efecto de dilución isotópica sino un mayor aprovechamiento del N por la planta, lo que se reflejó en el incremento del rendimiento de N y en la utilización del fertilizante nitrogenado por el maíz, por lo cual puede afirmarse que se produjo un efecto estimulante en la disponibilidad de N en el sistema y en la nutrición nitrogenada en el cultivo del maíz. En este sentido, nótese que el frijol común precedente aportó, en ambos sitios, alrededor de 20 kg N ha⁻¹ al maíz, de ahí la importancia de la incorporación al suelo de los residuos de cosecha de frijol común. Además, el análisis factorial de los resultados obtenidos con el método isotópico (rendimiento de N, % Nddf,

Cuadro 3. Valores F del análisis de varianza (contrastes ortogonales) del rendimiento en maíz.

Factor	F
Localidad	2.53 NS
Tratamiento	3.59 *
T1 LR + T1 V vs T2 LR + T2 V ¹	2.29 NS
T3 LR + T3 V vs T4 LR + T4 V	1.33 NS
T1 LR + T1 V + T2 LR + T2 V vs T3 LR + T3 V + T4 LR + T4 V	6.44 *
Localidad x tratamiento	1.29 NS
CV (%)	15.5

¹ LR = La Renée. V = Villena.

* = significativo. NS = no significativo.

Cuadro 4. Resultados obtenidos por el método isotópico en maíz.

Tratamiento	La Renée	Villena	Promedio tratamiento
	Rendimiento N (kg ha ⁻¹)		
T2 Sin cultivo-maíz	69.46	60.35	64.91 b
T4 Frijol-maíz	91.28	79.20	85.24 a
Promedio localidad	80.37 a	69.78 b	
CV (%)	2.60		
	N aportado por residuos (kg ha ⁻¹)		
T4 Frijol-maíz	21.82 a	18.85 b	20.33
CV (%)	3.00		
	N derivado del fertilizante (%)		
T2 Sin cultivo-maíz	12.91	10.50	11.70 b
T4 Frijol-maíz	14.57	10.25	12.41 a
Promedio localidad	13.74 a	10.28 b	
CV (%)	3.10		
	Rendimiento fertilizante N (kg ha ⁻¹)		
T2 Sin cultivo-maíz	8.96 c	6.33 d	7.64 b
T4 Frijol-maíz	13.28 a	10.25 b	11.76 a
Promedio localidad	11.12 a	8.29 b	
CV (%)	5.30		

Letras iguales en columna e hilera no difieren significativamente entre sí (Newman Keuls, P < 0.05).

rendimiento fertilizante N) arrojó significación tanto en relación con el factor localidad como con el factor tratamiento.

Danso (1995) afirmó que la fijación biológica del N (FBN) es el principal contribuyente al incremento del rendimiento de los cereales cultivados posteriormente a la leguminosa, entre otros aspectos, porque se reduce la extracción de N del suelo por la leguminosa, además de la contribución al mismo del nitrógeno de las raíces y de los nódulos en descomposición.

Sobre el porcentaje de utilización del fertilizante nitrogenado por el maíz, influyó significativamente tanto el factor localidad como el factor tratamiento (Cuadro 5). Los mayores valores se obtuvieron en La Renée y en la parcelas donde se incorporó previamente los residuos de frijol, aunque es necesario

Cuadro 5. Porcentaje de utilización del fertilizante nitrogenado por el maíz.

Tratamiento	La Renée	Villena	Promedio tratamiento
	----- % -----		
T2 Sin cultivo-maíz-frijol	22.97	16.23	19.60 b
T4 Frijol-maíz-frijol	34.06	26.28	30.17 a
Promedio localidad	28.51 a	21.25 b	
CV (%)	2.80		

Letras iguales en columna e hilera no difieren significativamente entre sí (Newman Keuls, P < 0.05).

señalar que la utilización del fertilizante nitrogenado del maíz sembrado en primavera en Cuba, en este tipo de suelo, no es alta debido al elevado aporte de N asimilable que el mismo realiza a partir de la mineralización de la materia orgánica en esta época del año (Dueñas *et al.*, 1997).

El efecto beneficioso de la incorporación de residuos de cosecha sobre el suelo, se evidenció también sobre el frijol común cosechado en la segunda etapa (Cuadro 6), donde el mayor rendimiento se encontró en La Renée y en las parcelas donde se incorporaron los residuos de frijol previo al maíz.

Al comparar ambas localidades (Cuadro 7), se obtuvo menor %N_{dda} en el sitio Villena, lo que puede deberse a que la dosis de P₂O₅ aplicada no fue suficiente de acuerdo con el bajo contenido de P del mismo. En este sentido, García (1999) obtuvo mejores resultados con la aplicación de 90 kg P₂O₅ ha⁻¹ para este suelo y cultivo, dado que esos suelos son altos fijadores de P. Además, a pesar de que el %N_{dda} no se incrementó significativamente, el N total acumulado fue mayor, lo que se revirtió en mayor N derivado de la atmósfera y también mayor rendimiento en granos de frijol común.

Los resultados del ensayo coinciden con los de Alfonso y Monedero (1998), obtenidos en condiciones similares y son de importancia económica y ecológica, ya que se recomienda a los productores la utilización de una secuencia de cultivos y la adopción de una práctica no utilizada en Cuba como es la incorporación de los residuos que les permite lograr incrementos del rendimiento de ambos granos, tan preciados actualmente en Cuba, con un mínimo de insumos: No se requiere de la fertilización del maíz ni se afecta la reserva de N del suelo y, en el caso del frijol común, el uso del *Rhizobium* que es ya una práctica creciente en Cuba, presenta un efecto económico de 21 dólares ha⁻¹ sólo por concepto de disminución del fertilizante nitrogenado.

Cuadro 6. Rendimiento del frijol común (inoculado).

Tratamiento	La Renée	Villena	Promedio tratamiento
	Mg de grano ha ⁻¹		
T5 Sin cultivo-maíz-frijol	2.55	1.45	2.00 b
T7 Frijol-maíz-frijol	3.04	2.15	2.60 a
Promedio localidad	2.80 a	1.80 b	
CV (%)	9.00		

Letras iguales en columna e hilera no difieren significativamente entre sí (Newman Keuls, P < 0.05).

Cuadro 7. Resultados obtenidos por el método isotópico en frijol común (inoculado).

Tratamiento	La Renée	Villena	Promedio tratamiento
	Rendimiento N (kg ha ⁻¹)		
T5 Sin cultivo-maíz-frijol	65.40	59.20	62.30 b
T7 Frijol-maíz-frijol	75.50	68.50	72.10 a
Promedio localidad	70.45 a	63.85 b	
CV (%)	1.90		
	N derivado del aire (%)		
T5 Sin cultivo-maíz-frijol	60.76	48.00	54.38
T7 Frijol-maíz-frijol	61.10	48.60	54.85
Promedio localidad	60.93 a	48.30 b	
CV (%)	1.10		
	N fijado (kg ha ⁻¹)		
T5 Sin cultivo-maíz-frijol	39.80 b	28.42 d	34.11 b
T7 Frijol-maíz-frijol	46.13 a	32.88 c	39.50 a
Promedio localidad	42.96 a	30.65 b	
CV (%)	2.30		

Letras iguales en columna e hilera no difieren significativamente entre sí (Newman Keuls, P < 0.05).

CONCLUSIONES

- La incorporación de los residuos de frijol común aportó entre 19 y 22 kg N ha⁻¹ al maíz que le sucedió.
- El uso del *Rhizobium* permitió al frijol común fijar de la atmósfera hasta 60% de su requerimiento de nitrógeno.
- La fijación de N de la atmósfera por el frijol común dependió de la concentración de fósforo del suelo.
- El empleo de la sucesión frijol común-maíz-frijol común en los suelos Ferralíticos Rojos de la provincia Habana resulta una alternativa económica y ecológicamente sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Organismo Internacional de Energía Atómica por el financiamiento parcial de la investigación a través del proyecto ARCAL XXII (RLA/5/036), así como al Dr. Felipe Zapata y a la Dra. Inés Pino por su valiosa colaboración.

LITERATURA CITADA

- Alfonso, C.A. y M. Monedero. 1998. Determinación del patrón de siembra óptimo para la asociación de maíz con leguminosas en suelos Ferralíticos Rojos. p. 77. In: Resúmenes del XI Seminario Científico del INCA. La Habana. Cuba.
- Alfonso, C.A. y M. Monedero. 1999. Impacto del trabajo del hombre sobre la calidad global de un suelo Ferralsol de Cuba. Proceedings del 1er Congreso de Conservación, Manejo y

- Gestión de Suelos en Cuencas Hidrográficas. La Habana, Cuba.
- Danso, S.K.A. 1995. Sustainable agriculture: The role of biological N fixing plants. Nuclear techniques in soil-plant-studies for sustainable agriculture and environmental preservation. IAEA: 205-224.
- Dueñas, G., T. López, O. Muñiz y F. Zapata. 1997. Reciclaje del N en una sucesión papa-maíz-papa sobre suelo Ferralítico Rojo. Informe interno. Instituto de Suelos, Cuba. En prensa.
- García, A. 1999. Uso de las técnicas nucleares para evaluar alternativas nacionales a los fertilizantes químicos, evolución de la materia orgánica y evaluación de métodos analíticos. Informe Final del Proyecto 020. PNCT 002. La Habana, Cuba.
- Hamdi, Y.A. 1995. Potential and assessment of BNF and its direct contribution in selected cropping system and ecological conditions. Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin. FAO (12): 201-222.
- Zapata, F. 1990. Isotope techniques in soil fertility and plant nutrition studies, use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. Training Course Series 2. IAEA: 61-127.

MANEJO DE LOS FERTILIZANTES NITROGENADOS EN MEXICO: USO DE LAS TECNICAS ISOTOPICAS (^{15}N)

Nitrogen Fertilizer Management in Mexico: Use of Isotopic Techniques (^{15}N)

J.J. Peña-Cabriales¹, O.A. Grageda-Cabrera² y J.A. Vera-Núñez¹

RESUMEN

La fertilización constituye uno de los principales factores que limitan la producción agrícola, pues los cultivos absorben sólo una fracción del fertilizante aplicado que oscila entre 10 y 60%. En México, en los últimos 40 años, el consumo de fertilizantes N-P-K se ha incrementado de 5×10^4 Mg a más de 5.5×10^6 Mg. Sin embargo, el uso de este insumo no ha sido el más adecuado y se han presentado problemas de contaminación ambiental. El propósito de esta contribución es destacar algunos de los estudios realizados en México, empleando técnicas isotópicas (^{15}N), en particular sobre el ciclo del nitrógeno y sus implicaciones agronómicas y ecológicas.

Se ilustra principalmente experiencia generada por el CINVESTAV-IPN, Unidad Irapuato, durante los últimos 10 años a través de proyectos financiados por el Organismo Internacional de Energía Atómica en la zona del Bajío, México.

Palabras clave: ^{15}N -eficiencia, estiércol, lodo, sorgo, trigo.

SUMMARY

In Mexico, in the last 40 years, fertilizer consumption has increased from 5×10^4 Mg to 5.5×10^6 Mg. However, in some agricultural regions there is irrational management of this input, resulting in potential environmental contamination. The objective in this paper is to show some studies carried out in an important region known as "El Bajío", Mexico, using isotopic techniques (^{15}N) particularly on the N cycle and its agronomic and ecological impact. During the last 10 years, the

¹Laboratorio de Microbiología Ambiental, CINVESTAV-Instituto Politécnico Nacional, Unidad Irapuato. Apartado Postal 629, Irapuato, Gto., México.

(jpena@ira.cinvestav.mx)

²INIFAP-CAEB/Celaya.

Irapuato Unit of CINVESTAV has generated experience through several projects dealing with N fertilization supported by the International Atomic Energy Agency.

Index words: ^{15}N -efficiency, manure, sludge, sorghum, wheat.

INTRODUCCION

En México, el uso de fertilizantes químicos se inició a principios del siglo pasado y la producción de los mismos en 1915 (Reyes-Castañeda, 1981). La utilización de fertilizantes sólidos es mayor que el uso de líquidos y gases (FERTINAL, 1994); estas últimas fuentes se utilizan en zonas más tecnificadas, como el Bajío-Guanajuato, valle de Sinaloa y valle del Yaqui-Sonora. Existen, en México, otras zonas agrícolas de gran importancia por el tipo de cultivo, como caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), que se produce en el trópico húmedo en Tabasco, donde el uso de fertilizantes es parte esencial en los sistemas de producción (SARH, 1991).

En México, el empleo de fertilizantes no es uniforme a lo largo del territorio nacional dedicado a la agricultura y se ha concentrado en áreas específicas donde se desarrolla una agricultura intensiva. Para ilustrar los rasgos más sobresalientes de estas regiones se citará el siguiente ejemplo de una zona de gran repercusión agrícola: "El Bajío".

El Bajío, considerada una de las zonas más productoras, tanto por el número de especies que se cultivan como por la superficie (5×10^5 ha), e importancia que ocupan algunas de ellas, ya que, con sólo 4.73% de la superficie nacional cultivada, contribuye con 6.16% al ingreso agrícola. Esta región constituye una de las principales entidades productoras de granos y hortalizas, así como exportadora de las mismas (Etchevers-Barra, 1996). Por otro lado, en esta zona agrícola se utiliza aproximadamente 15% (1.5×10^5 Mg N) del total de fertilizantes N distribuidos en el país (Peña-Cabriales y Grageda-Cabrera, 1997). En esta región, destaca la rotación intensiva de cereales y hortalizas, la

capacidad de los suelos (principalmente, arcillosos tipo Vertisol) para suministrar nutrientes a los cultivos se ha mantenido, en especial durante los últimos 30 años, a través de la aplicación de dosis cada vez mayores de fertilizantes químicos. El uso de abonos verdes, la rotación con leguminosas e incorporación de residuos agrícolas y pecuarios no se emplean en el mantenimiento de la fertilidad de los terrenos agrícolas. Esto ha producido una drástica disminución en el contenido de materia orgánica (MO) de los suelos.

Numerosos estudios han demostrado la bondad de las técnicas nucleares (^{15}N) para poder evaluar con precisión y rapidez, el aporte de nitrógeno proveniente de fertilizantes químicos (época, fuente y forma), abonos verdes, lodos y estiércoles, en los cultivos de importancia agrícola, pues permiten medir la cantidad de nutrimento que la planta está tomando de las diferentes fuentes evaluadas (Bowen y Zapata, 1990; Zapata, 1990).

Problemática Regional: El Caso de "El Bajío", Guanajuato, México

Con el propósito de ofrecer una idea clara de la problemática común de las grandes zonas agrícolas de México, el presente balance sintetiza tanto la información estadística disponible sobre la producción agrícola, como el consumo de fertilizantes nitrogenados en la región de "El Bajío", Guanajuato. En El Bajío en Guanajuato, 80% del área agrícola está destinada a la producción de cereales y hortalizas, siendo estos cultivos: trigo (*Triticum aestivum* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* Moench), maíz (*Zea mays* L.) y brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica* Plenck), con un sistema de rotación intensiva. Se discute también una serie de experimentos efectuados sobre diversos tópicos del ciclo del nitrógeno (absorción de N por los cultivos, mineralización, nitrificación, desnitrificación y volatilización), para lo cual se emplearon técnicas convencionales (cromatografía de gases y colorimétricas) como isotópicas (^{15}N).

La producción agrícola en esta zona requiere de altas dosis de N y agua para mantener la productividad. En este sentido, el cultivo de trigo se fertiliza con aproximadamente 350 kg N ha^{-1} para un rendimiento promedio de 5.5 Mg ha^{-1} , rendimiento que se ha mantenido durante los últimos 15 años, aunque la dosis de N aplicado como fertilizante ha aumentado en este período.

Es importante mencionar que en esta zona agrícola se concentra 25% de los pozos de agua del país, insumo del cual depende principalmente el cultivo de trigo. En general, la producción en el ciclo de invierno, con altas dosis de fertilización, empleando grandes y numerosas láminas de riego, tornan potencialmente vulnerable a los mantos freáticos fuente de agua para uso agrícola e inclusive humano.

Con los datos obtenidos de la información estadística, se generó un balance teórico de N para los principales cultivos de "El Bajío", Guanajuato: maíz, trigo, sorgo y brócoli (Cuadro 1). En este cuadro se observa que la recuperación del N disponible por los cultivos es alrededor de 60%, lo cual indica que de los $1.15 \times 10^5 \text{ Mg N año}^{-1}$ aplicados como fertilizantes, se desconoce el paradero de $4.6 \times 10^4 \text{ Mg N año}^{-1}$. En términos concretos, se desconoce el destino de aproximadamente $100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ de cultivo (Grageda-Cabrera *et al.*, 2000a).

Es preciso enfatizar que los procesos involucrados que parecen ser las mayores fugas de N (lixiviación y desnitrificación) se encuentran estrechamente ligados con el manejo del agua. Por lo general, los agricultores de la región realizan la práctica de fertilización y, posteriormente, saturan de agua el terreno, provocando el lavado del fertilizante. Además, los suelos presentan agrietamientos muy pronunciados lo que, sumado al alto contenido de arcillas, favorece condiciones de anoxia que pueden

Cuadro 1. Balance teórico de nitrógeno en diferentes sistemas de producción agrícola en "El Bajío", Guanajuato, México.

Componente	Maíz	Trigo	Sorgo	Brócoli
	- - - - - Mg N año ⁻¹ - - - - -			
N extraído				
Grano	5 072	15 630	19 864	-
Paja	2 755	7 034	16 553	-
Tallos y hojas	-	-	-	1 750
Florete	-	-	-	2 450
N introducido				
Incorporado	551	1 407	3 311	980
Quemado	-	5 627	13 242	-
Mineralizado	110	281	622	392
No mineralizado	441	1 126	2 649	588
Fertilizante	13 105	45 470	38 948	18 000
Disponibile	13 225	45 751	39 611	18 399
Recobrado	7 827	21 257	33 106	9 196
No contabilizado	5 829	24 494	6 505	9 196
Total no contabilizado				46 024

Fuente: Grageda-Cabrera *et al.* (2000a).

durar más de 24 h. Por consiguiente, se inició hace 10 años una serie de experimentos empleando métodos isotópicos con el objetivo de optimizar el manejo del N a través de prácticas en los principales cultivos de la región del Bajío, México.

Manejo de Fertilizantes Químicos Nitrogenados

Para el agricultor es de fundamental importancia conocer cuándo aplicar el fertilizante para optimizar la absorción por el cultivo y minimizar las pérdidas potenciales del nutrimento por las transformaciones microbianas que se dan en el suelo. Es decir, identificar el mejor momento de aplicación, durante el ciclo de desarrollo del cultivo, para promover la mayor absorción por las plantas cultivadas y disminuir así el riesgo de contaminación ambiental, tanto de acuíferos por NO_3^- o de contaminación de la atmósfera por formas gaseosas de N como NO , N_2O y NH_3 .

Trigo (*Triticum aestivum* L.)

En 1996, se realizó un experimento en un suelo Vertisol pélico de textura arcillosa y con 1.38% de materia orgánica de "El Bajío", Guanajuato, México, con el cultivo de trigo "Saturno". Se aplicó una dosis total de 320 kg N ha^{-1} como sulfato de amonio enriquecido con 1.03% ^{15}N átomos en exceso; esta dosis se fraccionó a razón de 160 kg N ha^{-1} y se aplicó durante la siembra y a 50 días después de la siembra (dds), con dos sistemas de manejo de residuos de sorgo, quemado vs. incorporado. La quema de residuos de sorgo es una práctica común implementada desde la década de los 60's, como una alternativa para acelerar la preparación de las parcelas agrícolas para el siguiente ciclo de cultivo de invierno (trigo), así como debido al hecho de que esta práctica genera un incremento sustancial en el rendimiento de grano de trigo (15 a 20%). Sin embargo, esta práctica tiene cada vez más restricciones, no sólo debido a las grandes emisiones de CO_2 que son liberadas a la atmósfera y que llegan a producir accidentes viales por la falta de visibilidad, sino también por el gran deterioro del recurso suelo, en particular, en el mantenimiento de la materia orgánica. Lamentablemente, el número de incendios en áreas forestales vecinas a la zona agrícola ha aumentado alarmantemente en los últimos años.

Los resultados confirman observaciones previas que el rendimiento fue consistentemente mayor en los

tratamientos donde el residuo de sorgo fue quemado en comparación con el tratamiento donde el residuo se incorporó, además, la acumulación de N por el cultivo de trigo disminuyó significativamente a un promedio de 45 kg N ha^{-1} cuando los residuos de sorgo se incorporaron (Cuadro 2). Similares resultados se observaron en cuanto al N derivado del fertilizante en ambos sistemas de manejo de residuos. Por otro lado, la cantidad de N derivado del fertilizante fue 41.7 y $28.1 \text{ kg N ha}^{-1}$ para el tratamiento de la quema de residuos e incorporación de los mismos, respectivamente, aunque el porcentaje de N derivado del fertilizante fue similar para ambos tratamientos (25 y 28%, respectivamente). Estos resultados probablemente se debieron a un efecto de incorporación de nutrimentos, como se ha reportado en otros sistemas (Hughes, 1979), y a una inmovilización del N (Mary *et al.*, 1996).

La información generada en el presente trabajo ilustra claramente que la cantidad de N aplicada al cultivo de trigo excede a la cantidad de asimilación del mismo, también principalmente indica cómo la incorporación de residuos de cosecha puede ayudar a disminuir las pérdidas de N en el sistema de producción y en el largo plazo puede llegar a significar un incremento del contenido de N orgánico del suelo (Grageda-Cabrera *et al.*, 2000b).

Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench)

Experimentos realizados con el cultivo de sorgo "Master" en "El Bajío", Guanajuato, donde los suelos predominantes son Vertisoles pélicos de textura arcillosa, ligeramente alcalinos con bajo contenido de materia orgánica y N total, se evaluaron las fuentes de N: urea (U), nitrato de amonio (NA) y sulfato de

Cuadro 2. Rendimiento y eficiencia de recuperación de nitrógeno derivado del fertilizante por el cultivo de trigo en "El Bajío", Guanajuato, México.

Residuo	Fertilización		Rendimiento Mg ha ⁻¹	Eficiencia %
	0 dds	50 dds		
Quemado	- - kg N ha ⁻¹ - -	- -		
	320 [†]	0	4.91	22.8
	160 [†]	160	6.43	28.3
Incorporado	160	160 [†]	6.01	30.6
	320 [†]	0	3.31	16.2
	160 [†]	160	4.33	15.6
	160	160 [†]	4.24	22.3

dds = días después de la siembra.

[†] aplicación de sulfato de amonio 1% átomos ^{15}N en exceso.

amonio (SA), marcadas con 1% átomos ^{15}N en exceso, aplicadas a razón de 180 kg N ha^{-1} en diferentes tiempos y fraccionamientos.

Los resultados no mostraron diferencias estadísticas significativas en rendimiento de grano por efecto de los tratamientos en estudio. Sin embargo, el fraccionamiento isotópico del N en la planta presentó diferencias significativas entre tratamientos. El SA presentó la mayor eficiencia y contribuyó con 44% del N total del cultivo, mientras que la U proporcionó sólo 37%. Por otro lado, la aplicación, en el momento de la siembra, presentó las mayores eficiencias de recuperación (40 a 65%) en comparación con las aplicaciones en la etapa de floración (15 a 20%) del cultivo de sorgo (Cuadro 3). Esto indica que el N del suelo proporciona más de 50% de los requerimientos de N para el cultivo de sorgo, lo cual concuerda con otros estudios (Hart *et al.*, 1986).

Los resultados de los esquemas de fertilización estudiados permiten concluir que la división de la dosis total en tres aplicaciones se tradujo en una mayor utilización de urea y sulfato de amonio, mientras que para nitrato de amonio se observó una máxima utilización cuando la dosis total se fraccionó en dos aplicaciones. En general, las aplicaciones del fertilizante en el momento de la floración presentaron un mínimo de incorporación de N por el cultivo de sorgo.

Manejo de Fertilizantes Orgánicos

La aplicación de residuos orgánicos al suelo es uno de los factores más importantes que influyen sobre el nivel de MO del mismo. Asimismo, la mineralización de estos residuos representa un punto clave para regular la cantidad de N disponible en el suelo. Sin embargo, los sistemas de producción agrícola intensiva dependen de la aplicación de fertilizantes químicos para mantener la producción; como consecuencia, el N mineral decrece provocando un declive en el contenido de MO. En México, son escasos los ensayos isotópicos realizados para evaluar el aporte de nutrimentos para los cultivos; sin embargo, a continuación se presentan resultados obtenidos con dos fuentes de nutrimentos muy importantes en México: los estiércoles y los lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Estiércoles. Experimentos de invernadero se condujeron para evaluar la eficiencia relativa de fuentes orgánicas de N para las plantas. Los

Cuadro 3. Eficiencia de recuperación de nitrógeno proveniente del fertilizante por el cultivo de sorgo en "El Bajío", Guanajuato, México.

Fuente	Fertilización			Recuperación
	0 dds	45 dds	92 dds	
	----- kg N ha ⁻¹ -----			
Urea	90 [†]	90	0	19.11
	90	90 [†]	0	23.06
	60 [†]	60	60	20.45
	60	60 [†]	60	17.98
	60	60	60 [†]	7.98
Nitrato de amonio	90 [†]	90	0	25.28
	90	90 [†]	0	24.27
	60 [†]	60	60	18.17
	60	60 [†]	60	18.06
	60	60	60 [†]	9.71
Sulfato de amonio	90 [†]	90	0	26.59
	90	90 [†]	0	21.74
	60 [†]	60	60	25.72
	60	60 [†]	60	21.74
	60	60	60 [†]	6.67

dds = días después de la siembra.

[†] Aplicación de fertilizante marcado con ^{15}N .

materiales estudiados fueron: estiércol de ganado vacuno (C/N = 23.4), caprino (C/N = 20.2), conejo (C/N = 16.1) y gallinaza (C/N = 7.9), así como abono verde de *Azolla filiculoides* (C/N = 12.1) aplicados a una dosis de 200 mg kg^{-1} (macetas con 3 kg de suelo Vertisol) y se aplicó como fuente marcada sulfato de amonio enriquecida con 10% átomos ^{15}N en exceso (80 mg kg^{-1}). Se utilizó ballico (*Lolium multiflorum*) como planta indicadora a diferentes tiempos de muestreo.

Los resultados mostraron diferencia en las variables de materia seca, rendimiento y porcentaje de N en cada uno de los cortes (Cuadro 4).

En cuanto a la eficiencia relativa de los abonos orgánicos, en el primer corte se observó que los materiales con relación C/N más baja mostraron una alta eficiencia, lo cual indica que el suministro de N por las diferentes fuentes orgánicas en estudio o equivalencia con sulfato de amonio es muy cercana a la unidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los materiales evaluados podrían clasificarse en tres grupos diferentes en cuanto a eficiencia como fuentes nutrimentales: aquellas de mineralización rápida (gallinaza y *Azolla*), lenta (vacuno) e intermedia (conejo y caprino). De igual manera, se observó que la relación C/N de las fuentes orgánicas determinaron su tasa de mineralización (Vázquez-Navarro *et al.*, 1994), mientras más baja, la disponibilidad de N para

Cuadro 4. Parámetros isotópicos y eficiencia relativa de fuentes orgánicas de nitrógeno.

Variable	Testigo	Sulfato amonio	Vacuno	Caprino	Conejo	Gallinaza	Azolla
Materia seca (g maceta ⁻¹)	9.18	12.62	11.58	15.02	16.40	16.59	18.03
% N total	1.56	2.04	1.45	1.46	1.50	2.11	1.90
Rendimiento N (mg maceta ⁻¹)	153.00	257.00	168.00	219.00	247.00	351.00	343.00
% ¹⁵ N a. e.	0.00	0.311	0.182	0.198	0.199	0.175	0.186
% Nddf	0.00	38.29	22.44	24.33	24.43	21.53	22.85
% Ndds	100.00	61.71	36.17	39.21	39.37	34.70	36.83
% Nddf0	0.00	0.00	41.39	36.46	36.20	43.77	40.32
Valor "A" (mg N)	0.00	386.80	442.72	359.64	355.60	487.92	432.53
Equivalencia sulfato de amonio [†] :							
	1 ^{er} corte	1.00	8.50	5.30	4.00	1.49	1.90
	2 ^{do} corte	1.00	2.80	2.40	2.60	1.52	1.65
	3 ^{er} corte	1.00	1.36	1.67	1.69	1.23	1.42

% ¹⁵N a. e. = % ¹⁵N átomos en exceso; % Nddf = % nitrógeno derivado del fertilizante; % Ndds = % nitrógeno derivado del suelo; %Nddf0 = % nitrógeno derivado de la fuente orgánica; [†] equivalencia x unidades N como estiércol = 1 unidad N como sulfato de amonio.

las plantas fue mayor en las etapas iniciales (Sommers, 1977). Asimismo, la absorción de N proveniente del suelo fue menor en los tratamientos donde se aplicaron fuentes orgánicas.

Los estudios sobre manejo de materia orgánica (MO) han demostrado que el deterioro en la fertilidad potencial de los suelos, cuando no se usan abonos orgánicos es mayor, en comparación con aquéllos donde la aplicación de MO es una práctica común. Además, estas fuentes nutrimentales son, en términos de energía, más baratas y ambientalmente más limpias, por lo que pueden usarse como complementarias a la aplicación de los fertilizantes químicos. La variación en disponibilidad y concentración de nutrimentos permiten utilizar a los estiércoles como fuentes nutrimentales para los cultivos, y pueden ser mezclados para sincronizar su disponibilidad con la época de mayor demanda de nutrimentos por el cultivo.

Lodos. El desarrollo urbano y la legislación sobre el tratamiento de aguas residuales han traído como consecuencia un gran incremento en la generación de lodos residuales, producto del tratamiento de las descargas de drenaje de origen doméstico e industrial. Por lo anterior, es necesario generar tecnologías para el uso de este tipo de materiales. Una alternativa es la aplicación como fertilizante, por su alto contenido de MO y nutrimentos, aunque debe de tomarse en cuenta que su aplicación en suelos agrícolas puede aumentar el riesgo a la salud, debido a que también son portadores de patógenos y metales pesados. Para determinar la disponibilidad de N derivado de lodos

irradiados y no irradiados en el cultivo de maíz empleando la técnica isotópica de ¹⁵N, se instaló un experimento con maíz "H-220" en un suelo Vertisol (CINVESTAV-IPN, Unidad Irapuato) con lodos residuales (53.2% de MO y 3.23% de N) de la planta tratadora de aguas "Empresa para la Prevención y Control de la Contaminación del Agua" del estado de México. Una parte del volumen total de lodo muestreado se irradió con ⁶⁰Co a una dosis promedio de 10 kGy en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Los lodos, tanto irradiados como no irradiados, se aplicaron al suelo a varios porcentajes (50, 100, 150 y 200%) de la dosis de N regional recomendada (260 kg N ha⁻¹) para maíz. Después de la aplicación del lodo, en cada uno de los tratamientos se marcó una microparcela con una dosis de 20 kg N ha⁻¹ como sulfato de amonio marcado con 10% átomos ¹⁵N en exceso. Finalmente, en la etapa de madurez fisiológica (120 dds), se cosechó el maíz de la microparcela isotópica y se dividió en submuestras de paja y grano para la determinación de la relación isotópica ¹⁴N/¹⁵N por espectrometría de emisión.

Los datos indican que existió una clara respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de N (Cuadro 5). Esta respuesta fue, en algunos casos, hasta de un incremento en 100% cuando el N se aplicó como lodo o como sulfato de amonio. Asimismo, la respuesta a la aplicación de los lodos fue similar, tanto en los irradiados como en los no irradiados. Fue interesante observar que la aplicación de N como lodo fue más eficiente que el fertilizante comercial; esto puede estar relacionado a la lenta liberación de N del material

Cuadro 5. Efecto de la aplicación de lodo en el rendimiento y la asimilación de N por el cultivo de maíz, sembrado en un suelo Vertisol pélico en Irapuato, Gto., México.

Tratamiento	Rendimiento grano	N-lodo recuperado en grano
kg N ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹
Lodo irradiado:		
130 lodo	4.8	63.4
260	5.9	97.5
390	5.4	80.8
520	6.0	120.9
260 [†]	4.8	72.9
260 S. amonio	4.3	35.5
20 S. amonio	2.1	-
Lodo no irradiado:		
130 lodo	5.0	58.5
260	5.7	86.1
390	5.7	79.3
520	5.3	99.9
260 [†]	4.6	63.9
260 S. amonio	4.4	35.3
20 S. amonio	2.1	-

[†]Lodo aplicado en forma superficial.

orgánico, así como a la presencia de otros macro y micronutrientes y factores biológicos (Sommers, 1977).

De una manera general, los resultados pueden resumirse de la siguiente manera: el rendimiento de maíz obtenido con el fertilizante comercial puede alcanzarse con la aplicación como lodo de 50% de la dosis de N recomendada para el maíz en la región.

CONSIDERACIONES GENERALES

La información presentada en este documento permitió la generación de recomendaciones para la producción de los diferentes cultivos en estudio. Su extensión a la gran mayoría de los agricultores redundará en un ahorro económico sustancial de los principales insumos que limitan la producción de los cultivos y, por otro lado, en una disminución del riesgo ambiental por el pobre manejo del agua y fertilizantes nitrogenados. Sin embargo, es importante mencionar que la investigación sobre estos temas deberá complementarse con el uso de tecnologías de materia orgánica que permitan un manejo óptimo de los sistemas de producción en términos de sostenibilidad.

LITERATURA CITADA

- Bowen, G.D. y F. Zapata. 1990. Efficiency in uptake and use of nitrogen by plants. pp. 348-362. *In*: IAEA (ed.). International symposium on the use of stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies. IAEA-FAO-ONU. Viena, Austria.
- Etchevers-Barra, J.D. 1996. Conferencia Inaugural "La Agricultura del Siglo XXI", Curso Regional de Capacitación FAO/OIEA "El Uso de las Técnicas Nucleares en los Estudios de las Relaciones Suelo-Planta", 2-27 de septiembre de 1996. CINVESTAV-IPN, Unidad Irapuato. Irapuato, Gto., México.
- FERTINAL. 1994. Información general sobre la producción de fertilizantes NPK. México, DF.
- Grageda-Cabrera, O.A., F. Esparza-García y J.J. Peña-Cabriales. 2000a. Environmental impact of nitrogen fertilizers in the "Bajío" region of Guanajuato State, Mexico. pp. 45-54. *In*: G. Sánchez and E. Olguín (eds.). Environmental biotechnology and cleaner bioprocesses. Taylor & Francis. London, UK.
- Grageda-Cabrera, O.A., F. Esparza-García, F. Zapata y J.J. Peña-Cabriales. 2000b. Influence of sorghum crop residue management on the recovery of ¹⁵N labelled fertilizer by wheat in Mexico. *J. Sustainable Agric.* 16(3): 75-91.
- Hart, P.B.S., J.H. Rayner y D.S. Jenkinson. 1986. Influence of pool substitution on the interpretation of fertilizer experiment with N-15. *J. Soil Sci.* 37: 389-403.
- Hughes, R.G. 1979. Arable farmer's problems with straw. pp. 35-40. *In*: E. Grossbard (ed.). Straw decay and its effect of disposal and utilization. John Wiley. New York.
- Mary, B., S. Recous, D. Darwis y D. Robin. 1996. Interaction between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant Soil* 181:71-82.
- Peña-Cabriales, J.J. y O.A. Grageda-Cabrera. 1997. Dinámica del nitrógeno en el ecosistema agrícola. p. 371. *In*: J. Ruiz-Herrera, D. Guzmán de Peña y J.J. Peña-Cabriales (eds.). Perspectivas de la microbiología en México. Instituto Politécnico Nacional. México, DF.
- Reyes-Castañeda, P. 1981. Historia de la agricultura. Información y síntesis. AGT. México, DF.
- SARH-Subsecretaría de Planeación-Dirección General de Estudios, Informática y Estadística Sectorial. 1991. El uso de fertilizantes. Distritos de Riego. Informe estadístico 137. México, DF.
- Sommers, L.E. 1977. Chemical composition of sewage sludge and analysis of their potential use as fertilizers. *J. Environ. Quality* 6: 225-231.
- Vázquez-Navarro, G., J.M. de la Fuente-Martínez y J.J. Peña-Cabriales. 1994. Eficiencia y pérdidas vía desnitrificación de fertilizantes nitrogenados aplicados a sorgo en un suelo vertisol. *Terra* 12: 345-353.
- Zapata, F. 1990. Técnicas isotópicas en estudios sobre la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas. pp. 79-100. *In*: G. Hardarson (ed.). El empleo de las técnicas nucleares en estudios de la relación suelo-planta. FAO-OIEA. Viena, Austria.

ABSORCION DE NITROGENO (^{15}N) POR EL CULTIVO DE CEBADA EN RELACION CON LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN "EL BAJIO", GUANAJUATO, MEXICO

Nitrogen (^{15}N) Uptake by Barley in Relation to Water Availability in "El Bajío", Guanajuato, Mexico

J.A. Vera-Nuñez¹, O.A. Grageda-Cabrera², M.A. Vuelvas-Cisneros² y J.J. Peña-Cabriales^{1†}

RESUMEN

En el presente estudio, se planteó como objetivo evaluar el efecto de tres calendarios de riego: 0-46, 0-40-70 y 0-40-70-90 días después de la siembra (dds) y tres dosis de nitrógeno: 120, 180 y 240 kg ha⁻¹, aplicadas en el momento de la siembra, en la absorción de nitrógeno y en el rendimiento en grano de cebada. Se sembró un cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) var. Esperanza con un diseño de parcelas divididas con cuatro repeticiones. Para medir la absorción de nitrógeno por la planta se marcó una microparcela con sulfato de amonio enriquecido con 1% ^{15}N átomos en exceso en la dosis de 180 kg N ha⁻¹. A 33, 52, 66, 101 y 120 dds se cuantificó la relación isotópica $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ y el porcentaje de N total, y se calcularon los valores de N derivado del fertilizante, además de las variables de rendimiento de materia seca de tallos, hojas, espigas y grano. La eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado en los calendarios de riego fue similar y no superó 22%. La máxima tasa de asimilación de N fue menor que 40% y se presentó entre 52 y 66 dds. La suspensión del riego en etapas cercanas a la floración produjo un incremento en la absorción de N proveniente del fertilizante. La optimización del sistema de producción de cebada en "El Bajío" se logró con dos riegos y 180 kg N ha⁻¹.

Palabras clave: Fertilizante N, isótopo ^{15}N , riego, sonda de neutrones.

¹ CINESTAV-IPN, Unidad Irapuato, km 9.6 Libramiento Norte de la Carretera Irapuato-León, Apartado Postal 629, 36500 Irapuato, Gto., México. [†](jpena@ira.cinvestav.mx)

² Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP)-CAEB, Celaya, Gto., México.

Recibido: Enero de 2001. Aceptado: Septiembre de 2001.
Publicado en Terra 20: 57-64.

SUMMARY

The effect of three irrigation calendars: 0-46, 0-40-70, and 0-40-70-90 days after sowing (das) and three N fertilization rates: 120, 180, and 240 kg ha⁻¹ applied at sowing were studied using ^{15}N and neutron probe on barley (*Hordeum vulgare* L.). A split plot design with four replicates was used. The results showed that the efficiency use of N-fertilizer in the different irrigation calendars under study was similar (< 22%). The highest proportion of nitrogen derived from fertilizer was low (< 40%) and occurred between 52 to 66 das. Interestingly, eliminating irrigation during flowering stage resulted in an increase in N absorption from fertilizer. In conclusion, a management of these inputs, two irrigation periods and 180 kg N ha⁻¹ resulted in better management in barley production system.

Index words: N-fertilizer, ^{15}N isotope, irrigation, neutron probe moisture.

INTRODUCCION

La agricultura intensiva de "El Bajío Guanajuatense" se caracteriza por la rotación cereal-cereal, aplicación de altas dosis de fertilización nitrogenada y grandes láminas de riego en el ciclo agrícola otoño-invierno, para obtener alto rendimiento de grano. Este sistema de producción se ha relacionado con la disminución del contenido de materia orgánica del suelo (Grageda-Cabrera *et al.*, 2000) y el abatimiento promedio del nivel freático en el estado de Guanajuato de 3 a 5 m año⁻¹ (Vuelvas-Cisneros *et al.*, 1990). El cultivo de cebada para malta es una alternativa de producción durante el ciclo agrícola otoño-invierno, ya que requiere dosis de fertilización nitrogenada menores para satisfacer los estándares de N (1.6 a 1.8%) que

establece la industria maltera (Briggs, 1978) y un menor número de riegos por la precocidad de su ciclo de producción.

Estudios sobre dosis de fertilización nitrogenada (Agbede, 1987) y el régimen de agua (Clarke *et al.*, 1990) en cereales han demostrado que estos dos factores y su interacción influyen en la concentración de N en el grano, ya que es un buen indicador de otras características de calidad requeridas por la industria maltera, por ejemplo, la cantidad de extracto fermentable. Estudios de fertilización nitrogenada en cebada demuestran que el aumento de la dosis de fertilización nitrogenada incrementa el rendimiento, la concentración de N y la proteína en el grano (Agbede, 1987; Lauer y Partridge, 1990), en particular, durante la etapa de llenado de grano (Carreck y Christian, 1991). En Inglaterra, sólo 40% de los cultivos produjo grano de cebada aceptable para producción de malta (Withers y Dyer, 1990) cuando se aplicó la dosis de fertilización recomendada por la industria maltera. Experimentos realizados en Rothamsted, Inglaterra, demostraron que la concentración de N en el grano de cebada fue invariablemente más pequeña cuando la dosis de fertilización N se aplicó en etapas tempranas, como la siembra o después de la emergencia (Widdowson *et al.*, 1986), debido a que cuando el N está disponible rápidamente en etapas tempranas del ciclo de desarrollo de la planta, se promueve el crecimiento vegetativo (Carreck y Christian, 1991). Con base en estos trabajos sobre asimilación de nitrógeno, se ha demostrado que es posible, mediante diferentes prácticas de cultivo, obtener grano de cebada con calidad aceptable para la producción de malta. Sin embargo, en México, existe poca información sobre el efecto del manejo del agua de riego en relación con la absorción de N por este cereal. Debido a la cada vez más escasa disponibilidad de este recurso en "El Bajío", Guanajuato, es importante realizar estudios que permitan optimizar la aplicación del agua de riego, sin disminuir la calidad y el rendimiento de este cultivo. El objetivo del presente estudio fue evaluar tres calendarios de riego y tres dosis de fertilización nitrogenada sobre la calidad y producción de grano del cultivo de cebada. Asimismo, cuantificar la dinámica de la absorción de N por medio de la técnica de ^{15}N y la productividad del agua en el cultivo de cebada.

MATERIALES Y METODOS

Se sembró el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) variedad Esperanza a una dosis de 180 kg ha⁻¹ de semilla con 95% de germinación, aplicada a "chorrillo" en melgas de 5 x 9 m, en el campo agrícola experimental del INIFAP-CAEB en Celaya, Guanajuato (20°32' N, 100°49' O y a una altitud de 1765 m). Después de la emergencia, se establecieron en promedio 250 plantas m⁻². Además, se aplicó una dosis uniforme de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ como superfosfato de calcio triple a todos los tratamientos, según la guía para producción de cebada en "El Bajío" (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1992).

El suelo del lote experimental está clasificado como Vertisol (FAO, 1994) con un contenido de 54% de arcilla, pH (agua) 7.3, materia orgánica 1.2%, nitrógeno total 0.11%, fósforo, potasio, calcio y magnesio elemental de 18, 981, 7468 y 831 mg kg⁻¹, respectivamente. Las propiedades físico-hídricas del suelo experimental tienen una densidad aparente de 1.15 g cm⁻³, capacidad de campo de 45% y punto de marchitez permanente de 23% (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1994).

Condiciones Climáticas Durante el Desarrollo Experimental

Las variables climáticas de temperatura máxima y mínima, precipitación y evaporación de tanque clase "A" durante el desarrollo experimental se colectaron en la estación meteorológica del INIFAP. La temperatura máxima promedio mensual osciló entre 24.3 y 32.2 °C y la temperatura mínima fue de 6.5 y 14.8 °C para diciembre y mayo, respectivamente. Por otro lado, la precipitación pluvial promedio mensual osciló en el rango de 8.1 y 30.2 mm y la evaporación de 129.2 y 249.4 mm para el mismo período (Aguilar *et al.*, 1998).

Experimento Principal: Calendarios de Riego y Dosis de Fertilización N

Considerando las etapas fenológicas del cultivo de cebada var. Esperanza en el ciclo otoño-invierno (Vuelvas-Cisneros y Arreola-Tostado, 1991), se

evaluaron tres calendarios de riego: C1 = 0 y 46 días después de la siembra (dds); C2 = 0, 40 y 70 dds, y C3 = 0, 40, 70 y 90 dds. Con base en la carga del dren de riego ($\cong 10$ cm), número de sifones (10), tiempo de aplicación (50 min.) y gasto por sifón (0.65 L s^{-1}) se estimó la aplicación del riego "rodado o gravedad" en aproximadamente 0.15 m^3 agua m^{-2} riego $^{-1}$.

Para determinar la dinámica de humedad en el perfil del suelo de cada uno de los calendarios de riego, se instalaron tres tubos de aluminio de 1.20 m de longitud por repetición para el acceso de la sonda de neutrones (Troxler 3280). El monitoreo de humedad en el suelo, con base en el conteo relativo de neutrones atenuados, se realizó a cada 10 cm de profundidad cada dos días, antes y después del riego durante un minuto de conteo (Lascano *et al.*, 1986). Previamente, se realizó la calibración de la sonda de neutrones (Institute of Hydrology, 1976; Carneiro y De Jong, 1985). Con base en experimentos previos sobre curva de respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de cebada, se determinó evaluar tres dosis: F1 = 120, F2 = 180 y F3 = 240 kg ha^{-1} como sulfato de amonio, aplicado al momento de la siembra en combinación con los tres calendarios de riego y se generó un factorial 3×3 , equivalente a nueve tratamientos (Cuadro 1). El experimento se instaló con un arreglo de parcelas divididas con cuatro repeticiones en bloques al azar, para lo cual se asignaron los calendarios de riego a las parcelas grandes (135 m^2) y las dosis de fertilización nitrogenada a las parcelas chicas (45 m^2).

Experimento Isotópico con ^{15}N

Para la dosis de fertilización nitrogenada de 180 kg ha^{-1} y los diferentes calendarios de riego, se marcó una microparcela de 1 m^2 (Sánchez *et al.*, 1977; Follet *et al.*, 1991) con sulfato de amonio enriquecido a 1% ^{15}N átomos en exceso, aplicado en solución para estimar la absorción de ^{15}N proveniente del fertilizante.

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos experimentales en estudio.

Calendario de riego (C) (dds)	Dosis de fertilización (F)		
	F1=120	F2=180 [†]	F3=240
	----- kg N ha^{-1} -----		
C1 = 0, 46	C1F1	C1F2 [†]	C1F3
C2 = 0, 40, 70	C2F1	C2F2 [†]	C2F3
C3 = 0, 40, 70, 90	C3F1	C3F2 [†]	C3F3

[†]Aplicación de la dosis de fertilización con 1% ^{15}N átomos en exceso para la cuantificación del N derivado del fertilizante.

Para la determinación de la cinética de acumulación de materia seca, N total y la relación isotópica $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ en diferentes etapas fenológicas del cultivo de cebada, el número de microparcels se triplicó. Las etapas fenológicas muestreadas fueron: amacollamiento (33 dds), encañe (52 dds), floración (66 dds), llenado de grano (101 dds) y madurez fisiológica (120 dds); se separaron los diferentes componentes de la planta (hoja, tallo, espiga y grano) de un área de 0.5 m^2 y se realizó un cuarteo para obtener una submuestra (Axmann *et al.*, 1990), se dejó una microparcela isotópica (1 m^2) para el muestreo de madurez fisiológica. Con base en la cinética de acumulación de materia seca y la cantidad de agua aplicada, se determinó la productividad del agua.

La cuantificación de la relación isotópica $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ se realizó por espectrometría de emisión óptica y la determinación de N total por el método Kjeldahl (Axmann *et al.*, 1990) en cada uno de los componentes de la planta y etapas de muestreo. Con base en los indicadores anteriores se obtuvieron los parámetros isotópicos (Zapata, 1990). El experimento isotópico de ^{15}N se condujo con un diseño de bloques al azar.

RESULTADOS Y DISCUSION

Rendimiento de Grano

El rendimiento de grano fue estadísticamente diferente para los tres calendarios de riego y las tres dosis de fertilización nitrogenada en estudio (Cuadro 2). El rendimiento máximo de grano, 7514 kg ha^{-1} , se obtuvo con la dosis de 240 kg N ha^{-1} y el calendario de riego C3. Sin embargo, este rendimiento fue estadísticamente similar a la dosis de 180 kg N ha^{-1} y el calendario de riego C2. También se observó que el menor rendimiento se obtuvo con la dosis de fertilización de 120 kg N ha^{-1} y el calendario de riego C1. Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura, respecto a que el rendimiento de grano del cultivo de cebada se incrementa conforme se aumenta el número de riegos y la dosis de fertilización nitrogenada (Lauer y Partridge, 1990; Or y Hanks, 1992).

Acumulación de Materia Seca y N Total

La acumulación de materia seca en función de los calendarios de riego y etapas fenológicas del cultivo de

Cuadro 2. Producción de grano por el cultivo de cebada a tres calendarios de riego y tres dosis de fertilización nitrogenada.

Calendario	Dosis fertilización			Promedio
	F1	F2	F3	
	Rendimiento de grano			
	kg N ha ^{-1†}			
C1	3281±732	4189±692	3591±901	3687±775
C2	6031±1124	6434±1128	7072±882	6512±1045
C3	6258±1270	6719±519	7514±516	6830±768
Promedio	5190±1042	5780±780	6059±766	5676±863
CV (%):	11			
DMS (P ≤ 0.05)				
Calendario (C):	1421			
Fertilización (F):	555			
CxF:	NS			

† Promedio de cuatro repeticiones±desviación estándar.

Cuadro 3. Distribución y acumulación de materia seca durante el ciclo de desarrollo del cultivo de cebada a tres calendarios de riego.

Etapa (dds)	Calendario	Organo			Acumulación		
		Paja	Espiga	Grano	Total	Período	Día
		kg ha ^{-1†}					
33	C1	634±110	-	-	634±110	634	19.2
	C2	700±122	-	-	700±122	700	21.2
	C3	666±144	-	-	666±144	666	20.2
52	C1	2301±318	-	-	2301±318	1667	87.7
	C2	2098±387	-	-	2098±387	1396	73.5
	C3	2097±396	-	-	2097±396	1431	75.3
66	C1	3645±103	902±218	-	3547±286	1246	89.0
	C2	4365±418	2032±117	-	6397±507	4299	307.1
	C3	4286±191	2159±157	-	6445±342	4348	310.6
101	C1	3742±209	5509±172	-	9251±359	5704	163.9
	C2	4722±439	7775±108	-	12497±280	6052	172.9
	C3	5631±486	7682±120	-	13313±496	6868	196.2
120	C1	3655±303	-	4189±491	7844±464	-	-
	C2	4242±383	-	6434±885	10676±964	-	-
	C3	4869±455	-	6719±504	11588±863	-	-
CV (%):	15	16	12	14			
DMS (P ≤ 0.05)							
Calendario (C)	321	755	1204	546			
Etapa (E)	414	616	-	705			
CxE	717	NS	-	1221			

† Promedio de cuatro repeticiones±desviación estándar.

dds = días después de la siembra.

NS = no significativo; - = no determinado.

cebada se presentan en el Cuadro 3. La máxima acumulación de materia seca en hojas se presentó a 66 dds (floración) y 101 dds en tallos (llenado de grano). A 33 dds (amacollamiento), cuando los tres calendarios de riego habían recibido igual número de riegos, la acumulación de materia seca de hojas fue 54% mayor con respecto a los tallos (datos no reportados). La mayor producción de materia seca de paja ocurrió a 101 dds (llenado de grano). La mayor

tasa de acumulación de biomasa para los tres calendarios de riego en estudio se presentó a 66 dds, posteriormente hubo un decremento de la acumulación de materia seca total. Esto fue probablemente debido a la senescencia y removilización de nutrimentos por las hojas a la espiga o por pérdidas de N por parte de la planta (Campbell *et al.*, 1983), ya que en el calendario C1 el último riego de auxilio se aplicó a 46 dds, mientras que en los calendarios C2 y C3 se aplicó uno

y dos riegos más a 70 y 90 dds, respectivamente; aumentando así la disponibilidad de agua en el suelo para una mayor acumulación de biomasa. Sin embargo, se observó que la aplicación del riego en el calendario C1 a 46 dds (etapa muy cercana a la floración) permitió obtener una mayor producción de paja (aproximadamente 5%) en comparación con la aplicación del riego a 40 dds (calendarios de riego C2 y C3). Estos resultados concuerdan con los estudios que han demostrado que la eliminación del riego en la prefloración de la planta de cebada disminuyen la acumulación de materia seca en hojas (Lauer y Partridge, 1990; Pan y Hopkins, 1991), en forma proporcional al grado de deficiencia de agua. Se ha demostrado que la acumulación de materia seca en el cultivo de cebada depende directamente de la cantidad de agua acumulada y disponible en el suelo durante su ciclo de desarrollo (Tsegaye *et al.*, 1993) y que la producción del cultivo de cebada disminuye en relación directa con la sequía del suelo, pero la expresión del decremento depende de la etapa en la cual se presenta la sequía, y esto se relaciona con una disminución de la densidad de población, hojas y número de granos por

planta (Coles *et al.*, 1991). En este estudio, la eliminación del riego a 46 dds en el calendario C1 se reflejó en una disminución del rendimiento de grano (Cuadro 2) y materia seca de paja a la cosecha (Cuadro 3). Similar comportamiento a la acumulación de materia seca presentó la acumulación de N total, aunque no existió diferencia estadística significativa de esta variable a la cosecha (Cuadro 4). Los cambios en la cinética de la concentración de N total en la planta de cebada son similares a los reportados en otros estudios (Bauer *et al.*, 1987; Abreu *et al.*, 1993).

Absorción y Eficiencia de N-Fertilizante

La máxima absorción de N total (Cuadro 4) y N-fertilizante se presentó a 66 dds (etapa de floración), y se obtuvo similar absorción para los calendarios de riego en estudio, siendo para el calendario C2, 62.9 kg N-fertilizante ha⁻¹ (equivalente 34.9% de eficiencia con base en 180 kg N ha⁻¹, aplicados en el momento de la siembra), 56.1 y 58.4 kg N-fertilizante ha⁻¹ lo cual representa 31.2 y 36.9% de eficiencia para los calendarios C1 y C3, respectivamente (Cuadro 5).

Cuadro 4. Distribución y acumulación de N total durante el ciclo de desarrollo del cultivo de cebada bajo tres calendarios de riego.

Etapa (dds)	Calendario	Organo			Acumulación		
		Paja	Espiga	Grano	Total	Período	Día
----- kg ha ⁻¹ -----							
33	C1	26.9±3.9	-	-	26.9±3.9	26.9	0.82
	C2	32.0±5.4	-	-	32.0±5.4	32.0	0.97
	C3	26.0±5.8	-	-	26.8±5.8	26.8	0.81
52	C1	63.0±7.7	-	-	63.0±7.7	36.1	1.9
	C2	61.8±2.8	-	-	61.8±2.8	29.8	1.6
	C3	54.4±9.7	-	-	54.4±9.7	27.6	1.5
66	C1	108.9±8.6	17.2±4.0	-	126.1±10.7	63.0	4.5
	C2	86.2±7.4	42.8±4.5	-	128.9±6.5	74.5	5.3
	C3	81.9±2.6	47.4±5.3	-	129.3±6.1	74.9	5.4
101	C1	32.8±6.5	64.4±8.1	-	105.3±3.3	-	-
	C2	31.6±7.8	83.9±6.7	-	115.6±6.7	-	-
	C3	38.4±3.1	102.0±3.1	-	140.5±4.1	11.2	0.3
120	C1	22.9±4.8	-	73.0±6.2	95.9±3.3	-	-
	C2	21.1±3.4	-	107.5±6.0	128.6±5.7	13.0	0.7
	C3	23.7±2.6	-	100.3±7.2	124.0±9.4	-	-
CV (%)		17	19	15			
DMS (P ≤ 0.05)							
Calendario (C)		NS	15	24			
Etapa (E)		7	12	-			
CxE		12	NS	-			

[†] Promedio de cuatro repeticiones±desviación estándar.

dds = días después de la siembra.

NS = no significativo; - = no determinado.

Cuadro 5. Absorción de nitrógeno proveniente del fertilizante durante el desarrollo del cultivo de cebada a tres calendarios de riego.

Etapa (dds)	Calendario de riego					
	C1		C2		C3	
	Paja ¹	E/G	Paja	E/G	Paja	E/G
	N-fertilizante					
	kg N ha ⁻¹					
33	7.1±2.1	-	6.9±1.8	-	6.1±1.8	-
52	25.4±4.4	-	21.7±6.9	-	18.8±5.1	-
66	45.8±8.6	7.6±2.3	42.1±4.3	20.8±2.6	31.1±6.1	17.3±4.5
101	9.6±2.0	20.3±3.7	12.5±5.1	31.8±7.9	12.9±2.0	29.0±4.3
120	8.9±2.9	28.6±0.5 [§]	7.6±1.1	39.1±8.6	7.4±1.0	34.0±9.1
CV (%)	19	17				
DMS (P ≤ 0.05)						
Calendario (C)	NS	NS				
Etapa (E)	4.7	-				
CxE	NS	-				

¹ Paja = hojas+tallo; E = espiga; G = grano. [†] Promedio de cuatro repeticiones±desviación estándar. [§] Sólo grano.
dds = días después de la siembra.

NS = no significativo; - = no determinado.

Se presentó diferencia estadística significativa, tanto para los calendarios, como para las etapas fenológicas del cultivo. En términos generales, estas eficiencias de recuperación pueden considerarse bajas, lo cual probablemente es debido a las aplicaciones únicas de N-fertilizante a la siembra (Vos *et al.*, 1993). Se han obtenido resultados contrastantes en el cultivo de trigo cuando la fertilización nitrogenada es fraccionada (Pilbeam *et al.*, 1997; Grageda-Cabrera *et al.*, 2000). Por otro lado, se observó una mayor absorción de N-fertilizante en paja para el calendario de riego C1 en la etapa de floración (Cuadro 5). Esto probablemente sea debido, como ya se discutió previamente, a la aplicación del riego a 46 dds (antesis) o a la disminución de las pérdidas de N-fertilizante (Matson *et al.*, 1998). Similarmente, se ha demostrado en el cultivo de trigo, que la mayor absorción de N-fertilizante se presenta durante las etapas vegetativas tardías o reproductivas tempranas (Mengel, 1996).

La eficiencia en la absorción de N-fertilizante a la cosecha fue baja (< 22%) en los tres calendarios de riego en estudio y no se presentó diferencia estadística significativa, lo cual osciló en el rango de 16 a 22% (Cuadro 6). Por otro lado, el órgano vegetativo con mayor contenido de N-fertilizante a la cosecha fue el tallo. Esto indica que el órgano vegetativo más eficiente en removilizar N-fertilizante es la hoja. En este sentido, el porcentaje de removilización de N-fertilizante de la paja al grano fue de 63, 87 y 78%

Cuadro 6. N-total, eficiencia de N-fertilizante y productividad del agua a la cosecha del cultivo de cebada a tres calendarios de riego.

Calendario	N-total	Eficiencia	Productividad agua
		- - - - % [†] - - - -	kg m ⁻³ [†]
C1	1.8±0.1	15.9±0.3	1.95±0.23
C2	1.7±0.1	21.7±4.8	2.43±0.33
C3	1.6±0.1	18.9±5.6	2.55±0.19
CV (%)	12	18	15
DMS (P ≤ 0.05)	NS	NS	0.48

[†] Promedio de cuatro repeticiones±desviación estándar.
NS = no significativo.

para los calendarios de riego C1, C2 y C3, respectivamente (datos no reportados); estos resultados demuestran que la aplicación del riego en etapas cercanas a la madurez fisiológica (calendarios de riego C2 y C3) del grano de cebada, incrementa la removilización de N, lo cual puede llegar a significar que el grano contenga un porcentaje de N total superior a los estándares establecidos por la industria maltera. Estos resultados no concuerdan con lo reportado en la planta de cebada, la cual es considerada como un cultivo no eficiente para removilizar N (Tillman *et al.*, 1991).

Almacenamiento de Agua en el Suelo

La ecuación de regresión lineal, generada para la estimación del contenido volumétrico de agua en el

suelo en relación con el contaje relativo de neutrones atenuados (CRN), fue

$$y = 0.72 \times \text{CRN} - 0.154$$

El patrón de almacenamiento de agua en 0 a 30 cm de suelo (zona de mayor densidad radical del cultivo de cebada) fue estadísticamente diferente en los tres calendarios de riego y los diferentes muestreos de neutrones durante el ciclo de desarrollo del cultivo de cebada (Figura 1). Además, el patrón de almacenamiento de agua en este estrato de suelo, para los tres calendarios de riego, mostró una dinámica constante y uniforme en relación con la aplicación del riego. Esto concuerda con los resultados que indican que el almacenamiento de agua en el perfil es una propiedad intrínseca del suelo y que sólo se altera cuando los riegos son aplicados por gravedad (Chopart y Vauclin, 1990) o cuando las condiciones ambientales presentan una alta evaporación potencial.

Productividad del Agua

Esta variable presentó una alta correlación ($r^2 = 0.92$) con la producción de materia seca de los diferentes órganos de la planta. Durante el desarrollo del cultivo de cebada, no se presentó precipitación

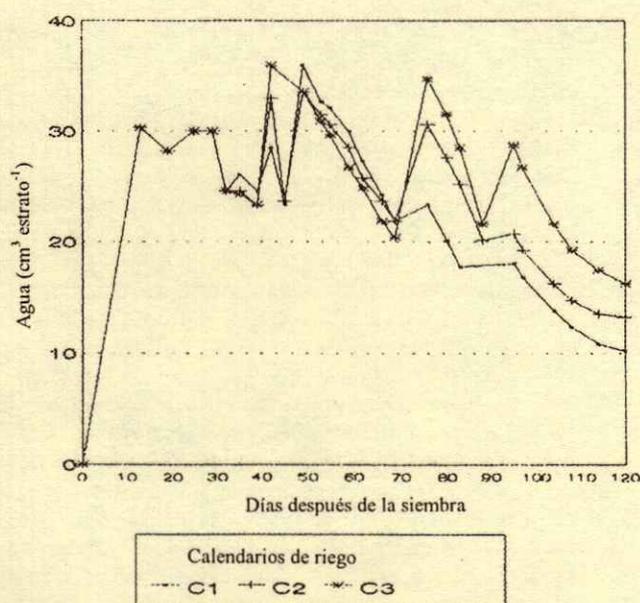


Figura 1. Perfiles del almacenamiento de agua en la capa arable de 0 a 30 cm del suelo experimental, sembrado con el cultivo de cebada a tres calendarios de riego.

pluvial y evaporación alta que afectarían la aplicación de los diferentes calendarios de riego en estudio. Asimismo, se presentaron diferencias estadísticas significativas para los calendarios de riego y etapas fenológicas del cultivo de cebada (Cuadro 6). La máxima productividad de agua en hojas se presentó a 66 dds, mientras que en los tallos a 101 dds (datos no reportados). Esto puede deberse a que las hojas se encuentran expuestas a factores ambientales adversos como la radiación solar y, por lo tanto, aumenta la evapotranspiración de agua, mientras que los tallos se encuentran en relación directa con la raíz, órgano a través del cual se realiza la absorción de la solución del suelo. Aunque la productividad del agua, tanto de grano como total a 120 dds, fue similar en los calendarios de riego, siendo estadísticamente iguales el calendario C2 y C3.

CONCLUSIONES

La eliminación del riego postfloración y el incremento en la disponibilidad de N en suelo no siempre determinan un alto contenido de nitrógeno en el grano de cebada. La removilización de N y la absorción de N-fertilizante postfloración responden en forma diferente a la aplicación de agua a través del riego, inclusive, los resultados de este estudio indican que la aplicación del riego en etapas cercanas a la madurez fisiológica aumenta la removilización de N al grano.

LITERATURA CITADA

- Agbede, O.O. 1987. Response of barley seedling to nitrogen and phosphorus rates on soils with various fertility levels. *Soil Sci.* 143: 192-197.
- Abreu, J.P. de M.E., I. Flores, F.M.G. De Abreu y M.V. Madeira. 1993. Nitrogen uptake in relation to water availability in wheat. *Plant Soil* 154: 89-96.
- Aguilar H., O.A., C. Mejía A. y H. García N. 1998. Elementos de clima en el Estado de Guanajuato. Publicación Especial 1. Junio de 1998. Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Centro de Investigación Regional Centro-Campo Experimental Norte de Guanajuato.
- Axmann, H., A. Sebastianelli y J. L. Arrillaga. 1990. Sample preparation techniques of biological material for isotope analysis. pp. 41-53. *In:* G. Hardarson (ed.). Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. Training course series 2. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria.
- Bauer, A., A.B. Frank y A.L. Black. 1987. Aerial parts of hard red spring wheat. II. Nitrogen and phosphorus concentration

- and content by plant development stage. *Agron. J.* 79: 852-858.
- Briggs, D.E. 1978. *Barley*. Chapman & Hall. London, UK.
- Campbell, C.A., H.R. Davidson y T.N. McCaig. 1983. Deposition of nitrogen and soluble sugars in Manitou spring wheat as influenced by N fertilizer, temperature and duration and stage moisture stress. *Can. J. Plant Sci.* 63: 73-79.
- Carneiro, C. y E. De Jong. 1985. *In situ* determination of the slope of the calibration curve of a neutron probe using a volumetric technique. *Soil Sci.* 139: 250-254.
- Carreck, N.L. y D.G. Christian. 1991. The effect of the previous crop on the growth nitrogen uptake and yield of winter barley intended for malting. *J. Sci. Food Agric. Soc. Chem. Ind./Elsevier Applied Science* 62: 137-145.
- Chopart, J.L. y M. Vauclin. 1990. Water balance estimation models: Field test and sensitivity analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1377-1384.
- Coles, G.D., P.D. Jamielson y R.M. Haslemore. 1991. Effect of moisture stress on malting quality in Triumph barley. *J. Cereal Sci.* 14: 161-167.
- Clarke, J.M., C.A. Campbell, H.W. Cutforth, R.M. DePauw y G.E. Winkleman. 1990. Nitrogen and phosphorus uptake, translocation, and utilization efficiency of wheat in relation to environment and cultivar yield and protein levels. *Can. J. Plant Sci.* 69: 1135-1147.
- FAO. 1994. World reference base for soil resources. O.C. Spaargaren (ed.). Rome., Italy.
- Follet, R.F., L.K. Porter y A.D. Halvorson. 1991. Border effects on Nitrogen-15 fertilized winter wheat microplots grown in the Great Plains. *Agron. J.* 83: 608-612.
- Grageda-Cabrera, O.A., F. Esparza-García, F. Zapata y J.J. Peña-Cabriales. 2000. Influence of sorghum crop residues management on the recovery ¹⁵N labelled fertilizer by wheat in Mexico. *J. Sustainable Agric.* 16: 75-91.
- Institute of Hydrology. 1976. Neutron probe practice. Institute of Hydrology/Natural Environment Research Council. Report 19. Wallingford, Oxon, England.
- Lascano, R.J., J.L. Hatfield y H.M. Van Bavel. 1986. Field calibration of neutron meters using a two-probe, gamma density gauge. *Soil Sci.* 141: 442-447.
- Lauer, J.G. y J.R. Partridge. 1990. Planting date and nitrogen rate effects on spring malting barley. *Agron. J.* 82: 1083-1088.
- Matson, P.A., R. Naylor e I. Ortiz-Monasterio. 1998. Integration of environmental agronomic, and economic aspects of fertilizer management. *Science* 280: 112-115.
- Mengel, K. 1996. Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. *Plant Soil* 181: 83-93.
- Or, D. y R.J. Hanks. 1992. Soil water and crop yield spatial variability induced by irrigation nonuniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 226-233.
- Pan, W.L. y A.G. Hopkins. 1991. Plant development and N and P use of winter barley. I. Evidence water stress-induced P deficiency in an eroded toposequences. *Plant Soil* 135: 9-19.
- Pilbeam, C.J., A.M. McNeil, H.C. Harris y R.S. Swift. 1997. Effect of fertilizer rate and form on recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to wheat in Syria. *J. Agric. Sci.* 128: 415-424.
- Sanchez, C.A., A.M. Blackmer, R. Horton y D.R. Timmons. 1977. Assessment of errors associated with plot size and lateral movement of N-15 when studying fertilizer recovery under field conditions. *Soil Sci.* 144: 344-351.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Centro de Investigaciones Agrícolas del Bajío-Campo Agrícola Experimental de El Bajío. 1992. Guía para cultivar cebada en El Bajío. Folleto para productores 7. Celaya, Gto., México.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Centro de Investigación Regional Centro-Campo Experimental Bajío-Patronato de la Investigación Agropecuaria y Forestal del Estado de Guanajuato A. C. 1994. Análisis físico-químico del suelo experimental.
- Tillman, B.A., W.L. Pan y S.E. Ullrich. 1991. Nitrogen use by northern-adapted barley genotypes under no till. *Agron. J.* 83: 194-201.
- Tsegaye, T., J.F. Stone y H.E. Reeves. 1993. Water use characteristics of wide-space furrow irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 240-245.
- Vos, J.M., B. Duquet, J.C. Vedy y J.A. Neyroud. 1993. The course ¹⁵N-ammonium nitrate in a spring barley cropping system. *Plant Soil* 150: 167-175.
- Vuelvas-Cisneros, M.A., F. Galvan, R. Chacon y J.M. Arreola-Tostado. 1990. Análisis de la problemática del agua y perspectivas para la modernización de su uso en la agricultura de Guanajuato. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Vuelvas-Cisneros, M.A. y J.M. Arreola-Tostado. 1991. Efecto de diferentes calendarios de riego sobre el rendimiento y calidad maltera de la cebada en Guanajuato. pp. 34-35. *In: Memorias XXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hidalgo, México.*
- Widdowson, F.V., R.J. Darvy, A.M. Derwar, J.F. Jenking, B.R. Kerry, D.W. Lawlor, R.T. Plumb, C.J.S. Ross, G.C. Scott, A.D. Todd y D.W. Wood. 1986. The effects sowing date and other factors on growth, yield and nitrogen uptake, and on incidence of pests and diseases of winter barley at Rothamsted from 1981-1983. *J. Agric. Sci. Camb.* 106: 551-574.
- Withers, P.G.A. y C. Dyer. 1990. The effect of applied nitrogen on the acceptability of spring barley for malting. *Aspects Appl. Biol.* 25 (Cereal Quality): 329-337.
- Zapata, F. 1990. Isotopic techniques in soil fertility and plant nutrition studies. pp. 61-127. *In: G. Hardarson (ed.). Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. Training course series 2. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria.*

ABSORCION DE NITROGENO (^{15}N) Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA POR EL CULTIVO DE FRESA (*Fragaria x ananasa*) EN "EL BAJIO", MEXICO

Nitrogen (^{15}N) Uptake and Water Productivity by Strawberry (*Fragaria x ananasa*) in "El Bajío", Mexico

J. Monroy¹, J.A. Vera-Núñez², M.A. Carrera¹, O.A. Grageda-Cabrera³ y J.J. Peña-Cabriales^{2*}

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue cuantificar la cinética de absorción de nitrógeno proveniente del fertilizante por el cultivo de fresa con irrigación por gravedad por medio de la técnica isotópica de ^{15}N , asimismo, cuantificar la productividad del agua en términos de masa (kg) m^{-3} agua aplicada. Se estableció un experimento con fresa var. Chandler, fertilizado con una dosis de 300 kg N ha^{-1} fraccionada en tres aplicaciones de 100 kg N ha^{-1} a 30, 91 y 157 días después del transplante (ddt), para lo cual se utilizó una fuente de sulfato de amonio enriquecida con 1% ^{15}N átomos en exceso. Se realizaron muestreos de material vegetal de hoja (H), raíz/estolones (R+E) y fruta (F) a 64, 91, 128, 157, 188 y 219 ddt. Los resultados indican que en la etapa vegetativa (transplante a 91 ddt) se presentó una proporción similar de materia fresca, seca y porcentaje de nitrógeno derivado del fertilizante (22%) en H y R+E. En las etapas reproductivas, de 118 a 157 ddt, el porcentaje de nitrógeno total fue dos veces mayor en H en comparación con R+E, lo cual se reflejó en el rendimiento del fertilizante nitrogenado y, por lo tanto, en una mayor eficiencia de recuperación del N-fertilizante. Por otra parte, la eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado total más baja se presentó del transplante a 64 ddt (7%). El órgano de la planta de fresa con la más baja eficiencia de recuperación del N-fertilizante, a lo largo del ciclo de desarrollo, fue el fruto (< 1%). La máxima eficiencia de recuperación de N-fertilizante se presentó de

64 a 91 ddt (26%). Con respecto al manejo del agua, los resultados mostraron una baja productividad del agua; se obtuvo la máxima productividad en la etapa de 157 a 188 ddt, debido a la máxima acumulación de H, R+E y F. La productividad del agua más baja se presentó en el período de transplante a 128 ddt debido a las condiciones climáticas de la zona. Los datos de humedad gravimétrica en el perfil del suelo mostraron que el mayor contenido de humedad se encuentra después de 40 cm de profundidad, zona del perfil de suelo que no es explotada por el sistema radical de la planta de fresa. Los resultados de este trabajo indican que las etapas de máxima absorción de N-fertilizante son 64-91, 128-157 y 188-219 ddt. Durante el desarrollo del cultivo se observó una baja productividad del recurso agua ($1.6 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ fruto). Por consiguiente, es fundamental continuar con estudios para optimizar el uso de estos insumos y así reducir el impacto ecológico y económico de la producción de fresa en esta zona del país.

Palabras clave: ^{15}N isótopo, N-eficiencia, sonda de neutrones.

SUMMARY

In Irapuato, Guanajuato, Mexico, strawberry crops represent an important source of jobs for many people, particularly women. Traditionally, the crop is fertilized with high a rate of N ($350\text{-}500 \text{ kg N ha}^{-1}$). Thus, the objectives in this study were 1) to quantify the nitrogen uptake derived from fertilizer by the crop through the ^{15}N isotopic technique, and 2) to quantify the water productivity. A strawberry crop cv. Chandler was transplanted to the field and fertilized with 300 kg N ha^{-1} as ammonium sulphate 1% ^{15}N atoms excess. The fertilization was split in three applications of 100 kg N ha^{-1} at 30, 91 and 157 days after transplanting (dat). The lowest N-efficiency occurred in the period 0-64 dat (7%). The berries always showed the lowest N-efficiency (< 1%). The

¹ Universidad De La Salle Bajío. Escuela de Agronomía.

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-IPN, Unidad Irapuato. Apartado Postal 629, Irapuato, Guanajuato.

* (jpena@ira.cinvestav.mx).

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Campo Experimental Bajío/Celaya.

N-efficiency occurred in stage 64-91 dat. The highest N uptake from fertilizer occurred during the periods 64-91, 128-157, and 188-219 dat. In relation to water, the results indicate "poor" water productivity. The highest value observed occurred between 157-188 dat and is directly related to peak biomass accumulation. The calculated value of water productivity is $1.6 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ fruit. Our data illustrate the need to continue with studies focused on the optimization the N-fertilizer and water.

Index words: ^{15}N isotope, N-efficiency, neutron probe.

INTRODUCCION

La necesidad de elevar el rendimiento y la calidad de la fresa de cuyo cultivo se siembran 3500 a 5000 ha en la región de "El Bajío", Irapuato, México (Dávalos, 1999) ha demandado un aumento en las dosis de los principales insumos que limitan la producción: fertilización nitrogenada y agua. El manejo deficiente de estos insumos está ligado al deterioro del recurso agua y al aumento en los costos de producción. Debido a que la investigación al respecto, en esta región, es escasa, generalmente, el agricultor realiza un manejo empírico de estos insumos, aplicando hasta $500 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ y $2 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ agua ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ (Dávalos, 2000). Aun cuando los trabajos han demostrado que la planta de fresa incrementa muy poco la absorción de N a dosis mayores que 168 kg N ha^{-1} e inclusive la asimilación de P y K, nutrimentos relacionados con la calidad del fruto, se relaciona inversamente con el aumento de la fertilización nitrogenada (Voth *et al.*, 1968). Por lo anterior, es de vital importancia realizar investigación enfocada a promover un uso más eficiente del N y del agua para disminuir el impacto ambiental y aumentar la productividad y sustentabilidad del sistema de producción de fresa. El objetivo del presente estudio fue cuantificar la cinética de absorción de nitrógeno proveniente del N-fertilizante por el cultivo de fresa, con irrigación por gravedad por medio de la técnica ^{15}N , asimismo, cuantificar la productividad del agua en términos de masa (kg m^{-3} agua aplicada). Los resultados permitirán determinar las etapas de mayor demanda de N y hacer un diagnóstico del uso del agua en este sistema de producción, datos que servirán como base para la siguiente fase del proyecto.

MATERIALES Y METODOS

Durante septiembre de 1998, se transplantó una huerta de fresa var. Chandler a una densidad de 1.7×10^5 plantas ha^{-1} , en surcos de 1 m de ancho a doble hilera, en una parcela del "Sistema Producto Fresa", denominado "Rancho San Carlos" del municipio de Irapuato, Gto. Este sitio se ha cultivado con fresa durante los últimos cinco años; los suelos del predio experimental son Vertisoles (FAO, 1994), típicos de la región. Los tratamientos evaluados fueron el fraccionamiento de la dosis total de N (300 kg N ha^{-1}) en tres aplicaciones de 100 kg N ha^{-1} a 30 (establecimiento a producción baja-latencia), 91 (latencia a producción media) y 157 (producción alta) días después del transplante (ddt). Para realizar el seguimiento de la absorción de nitrógeno proveniente del fertilizante se aplicó, en cada una de las etapas, ^{15}N -fertilizante en microparcels de $2.0 \times 1.5 \text{ m}$ con una fuente de sulfato de amonio enriquecida con 1% ^{15}N átomos en exceso. El ensayo se realizó en un sistema de irrigación por gravedad o rodado, principal forma de riego utilizado en el cultivo de fresa en esta zona, usando un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones (12 surcos de 12 m de largo repetición $^{-1}$). Todas las demás prácticas de cultivo se realizaron de acuerdo con el agricultor, incluyendo la irrigación. Por cada microparcels isotópica se realizaron dos muestreos de material vegetal (cuatro plantas muestreo $^{-1}$) de hoja (H) y raíz+estolones (R+E) a 64 y 91, 128 y 157, y 188 y 219 ddt, y muestreos intermedios de fruta (F). El rendimiento de fruto por corte se cuantificó en un área de 100 m^2 (10 surcos de 10 m de largo). Para el análisis isotópico de las muestras vegetales se utilizó el proceso muestra-submuestra previo a la determinación de la relación isotópica $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ por espectrometría de emisión (NOI-6EPC, Mca. FAN) y N total por el método Kjeldahl (Axmann *et al.*, 1990), para posteriormente calcular el porcentaje de N derivado del fertilizante y el rendimiento de N total (Zapata, 1990). La cantidad de agua aplicada por riego se calculó con base en la carga del dren principal ($\cong 14.3 \text{ cm}$), gasto del sifón (0.93 L s^{-1}), número de sifones (1 sifón surco $^{-1}$) y tiempo de aplicación del riego ($\cong 4.6 \text{ h riego}^{-1}$) para enseguida calcular la productividad del agua. Por otro lado, para determinar la dinámica de humedad en el perfil del suelo se instalaron tres tubos de aluminio de 1.20 m de longitud

por repetición para el acceso de la sonda de neutrones (Sonda CPN 503DR). El monitoreo de humedad en el suelo, con base en el conteo relativo de neutrones atenuados, se realizó durante un minuto de conteo a cada 15 cm de profundidad cada dos días, antes y después del riego (Lascano *et al.*, 1986). Previamente, se realizó la calibración de la sonda de neutrones (Carneiro y De Jong, 1985; Institute of Hydrology, 1976).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados indican que en la etapa vegetativa del transplante a 91 ddt se presentó similar proporción de materia fresca, seca y porcentaje de nitrógeno derivado del fertilizante (22%) en hojas (H) y raíz+estolones (R+E) (Cuadro 1), asimismo, en las etapas reproductivas de 118 a 157 ddt, el porcentaje de nitrógeno total fue dos veces mayor en H en comparación con el observado en R+E (datos no reportados), lo cual se reflejó en el rendimiento del

fertilizante nitrogenado y, por lo tanto, en una mayor eficiencia de recuperación del N-fertilizante. Asimismo, se observó que los órganos de mayor demanda de nitrógeno son las H y R+E, lo cual es debido a que el fruto es en mayor proporción agua (aproximadamente 94%), esto es de gran importancia, ya que estos órganos pueden considerarse como indicadores de respuesta a la fertilización nitrogenada en la formulación de programas de nutrición con nitrógeno en el cultivo de fresa.

Por otra parte, la eficiencia de recuperación del N-fertilizante total (hojas, raíz+estolones) más baja se presentó del transplante a 64 ddt (7%). El órgano de la planta de fresa con la más baja eficiencia de recuperación del N-fertilizante, a lo largo del ciclo de desarrollo, fue el fruto (< 1%). La máxima eficiencia de recuperación de N-fertilizante se presentó de 164 a 91 ddt, siendo en promedio 26% (Cuadro 2). Es importante destacar que el fruto de fresa se comporta como un órgano cuya demanda para remover N, tanto del fertilizante como del suelo, es muy limitada;

Cuadro 1. Acumulación de biomasa y rendimiento de nitrógeno total durante el ciclo de desarrollo del cultivo de fresa en la región de "El Bajío"-Irapuato, Guanajuato, México.

Etapa (ddt)	Rendimiento						
	Fresco [†] F	Seco		Nitrógeno [‡]			
		H	R+E	F	H	R+E	F
	----- kg ha ⁻¹ -----						
64	-	516±99	409±145	-	14.7±2.5	5.6±1.9	-
86	215±38	-	-	18±5	-	-	0.20±0.02
91	267±63	866±112	599±173	24±3	21.6±3.6	8.4±2.5	0.36±0.03
94	432±67	-	-	36±6	-	-	0.46±0.10
111	808±42	-	-	92±17	-	-	0.92±0.08
114	650±33	-	-	111±34	-	-	1.08±0.12
118	97±13	-	-	11±3	-	-	0.12±0.03
126	468±58	-	-	55±11	-	-	0.88±0.20
128	-	890±90	849±160	-	20.4±1.7	10.3±1.8	-
157	73±21	745±143	529±74	7±1	16.5±2.9	7.9±0.9	0.12±0.04
160	138±60	-	-	14±4	-	-	0.30±0.13
168	1402±226	-	-	137±17	-	-	2.35±0.14
174	306±46	-	-	28±4	-	-	0.51±0.05
182	1402±220	-	-	135±14	-	-	2.25±0.11
185	757±170	-	-	75±28	-	-	1.34±0.37
188	1218±117	1134±84	764±210	112±12	21.2±1.4	10.7±3.3	1.92±0.50
194	5608±400	-	-	561±30	-	-	10.0±2.00
198	1600±300	-	-	144±67	-	-	2.60±0.50
202	4005±600	-	-	360±42	-	-	6.16±2.00
209	400±76	-	-	37±14	-	-	3.48±0.72
219	-	614±117	1091±254	-	11.5±1.3	11.8±3.2	-

[†] = Rendimiento fresco de fruto obtenido de un área de 100 m².

[‡] = Rendimiento de nitrógeno obtenido con base en el porcentaje de N total de cuatro plantas muestreadas de la microparcela isotópica.

H = Hoja, R+E = Raíz+Estolones, F = Fruto, ddt = días después del transplante.

Cuadro 2. Eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado en diferentes etapas de producción del cultivo de fresa en la región de "El Bajío"-Irapuato, Guanajuato, México.

Epoca de fertilización	Etapas de muestreo	Eficiencia	Análisis de sensibilidad [†]
ddt	ddf	%	ddt
30	34	7.1±1.96	-
	61	25.7±2.34	91±17
91	37	16.9±0.05	-
	66	19.4±0.06	157±9
157	31	17.4±0.90	-
	62	17.6±0.36	219±8

[†] Tiempo en el cual no cambia la N-eficiencia con una D.E ≤ 5%.
ddt = días después del transplante; ddf = días después de la fertilización.

esta baja eficiencia probablemente esté relacionada, por un lado, con las condiciones de poco desarrollo radical en las etapas inmediatas al transplante, así como a la propiedad intrínseca de la planta de fresa, cuyo sistema radical es muy raquítrico (Larson, 2000). Además, la cantidad excesiva de agua que se aplica al suelo no permite que la solución nutritiva llegue a donde se encuentra la mayor actividad radical del cultivo de fresa. Aparentemente, se propician fugas de nitrógeno del sistema, probablemente por volatilización, pues de 300 kg N ha⁻¹ aplicados sólo se recuperaron 52 kg N ha⁻¹ (17% promedio), o bien, en algunos casos, como lo sugiere Ciuberkis (1997), existe una residualidad del nutrimento considerable, lo cual se observa en la salinización del suelo. En este caso, la fertirrigación por goteo debe considerarse de gran utilidad, ya que permite que la disponibilidad de nutrimentos se localice en una área muy cercana a la zona de máxima actividad y desarrollo radical del cultivo de fresa.

Las etapas de máxima absorción de N-fertilizante se presentaron a 64-91, 128-157 y 188-219 ddt, siendo ésta de 26, 19 y 18% N-fertilizante, respectivamente (Cuadro 2). Estos resultados son de gran importancia para el agricultor, ya que le permitirá incorporarlos dentro de su programa de fertilización y, por lo tanto, redundará en una optimización del insumo y, como consecuencia, en un decremento del impacto ambiental que genera el uso inadecuado del nitrógeno en la agricultura.

Referente al riego, es conocido la baja eficiencia de uso del agua en el sistema de irrigación rodado o por gravedad; la literatura reporta que la eficiencia oscila en un rango de 50 a 60% (Doorenbos y Pruitt, 1986; Burt *et al.*, 1995); sin embargo, debido a la baja

infraestructura de otros sistemas de irrigación, el riego por gravedad es el más ampliamente utilizado en el cultivo de fresa en esta región del país. Una consideración empírica para aplicar estas grandes cantidades de agua en este sistema de irrigación, por parte del productor, es disminuir la incidencia de la araña roja (*Tetranychus* spp.), una de las principales plagas que dañan a este cultivo. En términos generales, los resultados de este trabajo indican una baja productividad del agua (Cuadro 3); el máximo valor se alcanzó en la etapa de 157 a 188 ddt. En este periodo ocurrió también la máxima acumulación de material vegetativo (H y R+E) y fruto (F). La productividad del agua más baja se presentó de 64 a 157 ddt como resultado de las condiciones climatológicas que se presentaron en este periodo, principalmente heladas.

En términos promedio, la productividad del agua fue 1.6 m³ kg⁻¹ fruto, este resultado es 24% mayor que lo reportado para la variedad Chandler en esta misma zona (Dávalos, 2000). Es de llamar la atención esta baja productividad del agua que indica una alarmante fuga de este recurso de la zona, que puede ser explotada por el sistema radical de la fresa, similar sugerencia propuso Jones (1990) en Florida, EUA. En este sentido, los datos de humedad gravimétrica en el perfil del suelo mostraron que el mayor contenido de humedad se encuentra después de 40 cm de profundidad, lo cual reafirma lo anterior, ya que el sistema radical de la fresa sólo explora los primeros 30 a 40 cm. Finalmente, los resultados de este trabajo indican una baja eficiencia en el uso del nitrógeno y el agua en este sistema de producción, por lo que es necesario continuar con estudios para optimizar el uso de estos insumos que permitan reducir el impacto ecológico y económico de la producción de fresa en esta zona del país, similar sugerencia se propuso en el

Cuadro 3. Productividad del agua en el cultivo de fresa durante el ciclo de desarrollo en la región de "El Bajío"-Irapuato, Guanajuato, México.

Etapas	Rendimiento fruto período ⁻¹		Productividad agua
	Fresco	Seco	
ddt	kg ha ⁻¹		m ³ kg ⁻¹ fruto
0-64	0	0	-
65-91	482±101	42±8	2.3
92-128	2455±213	305±71	1.2
129-157	73±21	7±1	2.8
158-188	5223±839	501±79	0.8
189-219	11613±1376	1102±153	1.1

último simposio internacional sobre fresa (Castellanos y Guerra, 2000), lo cual se tiene contemplado realizar dentro de este proyecto.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo permiten concluir que las etapas de máxima absorción de N-fertilizante se presentan a 64-91, 128-157 y 188-219 ddt, siendo 26, 19 y 18% N-fertilizante, respectivamente. Por otro lado, la productividad del agua en este sistema de producción es muy baja ($1.6 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$). Por lo anterior, deberán de realizarse esfuerzos de investigación prioritarios enfocados a optimizar el uso de estos insumos, a través de tecnologías como la fertirrigación, riego por goteo y evaluación fuentes de nitrógeno.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos muy cumplidamente al OIEA-ARCAL XXII por el apoyo que están brindando para la consecución del presente proyecto, asimismo al SIHGO-CONACYT por el apoyo económico que destinaron para la realización del presente estudio.

LITERATURA CITADA

- Axmann, H., A. Sebastianelli y J.L. Arrillaga. 1990. Sample preparation techniques of biological materials for isotopes analysis. pp. 51-69. *In*: G. Hardarson (ed.). Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. International Atomic Energy Agency. Viena, Austria.
- Burt, C., K. O'Connor y T. Ruehr. 1995. Riego por goteo y microaspersión para árboles, vides y cultivos transitorios. Irrigation Training and Research Center. Davis, CA.
- Carneiro, C. y E. De Jong. 1985. *In situ* determination of the slope of the calibration curve of a neutron probe using a volumetric technique. *Soil Sci.* 139: 250-254.
- Castellanos, J.Z. y F. Guerra O'Hart. 2000. Memorias Simposium Internacional Fresa, Zamora 2000. Zamora, Michoacán.
- Ciuberkis, S. 1997. Ecological significance of long term fertilization with farmyard manure and soil reaction on weed flora. pp. 184-187. *In*: Integrated plant protection: Achievements and problems. Proceedings of the scientific conference devoted to the 70th anniversary plant protection science in Lithuania. Dotnova-Akademija, Lituania.
- Dávalos, P. 1999. Producción de fresa en el Edo. de Guanajuato. Folleto para productores de fresa. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Celaya, Guanajuato, México.
- Dávalos, P. 2000. Situación de la fresa en México y propuestas de investigación. pp. 151-159. *In*: J.Z. Castellanos y F. Guerra O'Hart (eds.). Memorias Simposium Internacional Fresa, Zamora 2000. Zamora, Michoacán.
- Doorenbos, J. y W.O. Pruitt. 1986. Las necesidades de agua por los cultivos. FAO. Riego y drenaje. Roma, Italia.
- FAO. 1994. World reference base for soil resources. O.C. Spaargaren (ed.). Rome, Italy.
- Institute of Hydrology. 1976. Neutron probe practice. Institute of Hydrology/Natural Environment Research Council. Report 19. Wallingford, Oxon, England.
- Jones, H.G. 1990. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortSci.* 25: 19-26.
- Larson, K.D. 2000. Comportamiento y manejo de la fresa: Desarrollo de programas de producción para máxima calidad y rendimiento en México. pp. 7-21. *In*: J.Z. Castellanos y F. Guerra O'Hart (eds.). Memorias Simposium Internacional Fresa, Zamora 2000. Zamora, Michoacán, México.
- Lascano, R.J., J.L. Hatfield y H.M. van Bavel. 1986. Field calibration of neutron meters using a two-probe, gamma density gauge. *Soil Sci.* 141: 442-447.
- Voth, V., K. Uriu y R.S. Bringhurst. 1968. Effect of high nitrogen application on yield, earliness fruit quality and leaf composition of California strawberries. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 91: 249-256.
- Zapata, F. 1990. Técnicas isotópicas en estudios sobre la fertilidad del suelo y la nutrición de plantas. pp. 79-171. *In*: G. Hardarson (ed.). Uso de técnicas nucleares en estudios de la relación suelo-planta. International Atomic Energy Agency. Viena, Austria.

MOMENTO DE APLICACION DE NITROGENO: EFECTO EN EFICIENCIA DE USO DEL FERTILIZANTE, RENDIMIENTO Y CONCENTRACION PROTEICA EN GRANO DE CEBADA CERVECERA EN URUGUAY

Effect of Timing of Nitrogen Application on Fertilizer Use Efficiency, Yield and Grain Protein Concentration of Malting Barley in Uruguay

O. Otegui¹, J. Zamalvide², C. Perdomo², R. Goyenola¹ y A. Cerveñanasky²

RESUMEN

En Uruguay, el cultivo de cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) se destina, en su mayoría, a la exportación y ese mercado requiere un grano con concentración de proteína entre 10.5 y 11.5%. El manejo del nitrógeno (N) no sólo afecta el rendimiento, sino también el contenido proteico del grano y la variabilidad de situaciones de suelo, clima y manejo existentes justifican ajustar la dosis de N en cada sitio. Este ajuste se hace con base en índices de diagnóstico de planta en el estadio de Zadoks Z30 y de suelo a la siembra y en Z22. Sin embargo, no se dispone aún de información sobre la eficiencia de uso del fertilizante (EUF) de cada uno de estos momentos de aplicación. Esta información es importante, ya que una alta EUF implica menores pérdidas económicas y menor riesgo de afectar la calidad del ambiente. Con el objetivo de evaluar, en forma conjunta, el efecto del momento de aplicación del N en la EUF nitrogenado, el rendimiento y la concentración de proteína del grano, durante 1997 y 1998 se realizaron tres ensayos de fertilización nitrogenada en la zona de Colonia, Uruguay. Los tratamientos consistieron en aplicar una misma dosis (30 kg de N ha⁻¹) en diferentes momentos: a la siembra (sólo 1997), en Z22, Z30 ó Z39. La EUF se determinó mediante técnica isotópica con ¹⁵N. Los resultados de este trabajo muestran, que el momento óptimo de aplicación de N es en los estadios de siembra y Z22. El diagnóstico en Z30 sería recomendable si también se lograra fertilizar cerca de este estadio, ya que normalmente las aplicaciones posteriores de N no incrementan el rendimiento pero aumentan el riesgo de obtener grano con excesiva concentración de proteína. Sin embargo, la EUF

nitrogenado tiende a aumentar con el retraso en la aplicación de N desde la siembra hasta Z39.

Palabras clave: ¹⁵N, manejo del N, índices de respuesta al N.

SUMMARY

In Uruguay, malting barley (*Hordeum vulgare* L.) is produced mainly for the export market, which requires a grain protein concentration between 10.5 and 11.5%. Nitrogen (N) management affects not only yield but also grain protein concentration, and the variability of soil, weather and management conditions justifies site-specific N recommendations. N rates are adjusted using a plant test at Zadoks 30 (Z30) and soil tests at pre-planting and at Z22. However, there is a lack of information about the effects of these different moments of N application on N fertilizer use efficiency (FUE). This information is important, because a high FUE would result in economic gains for the farmers and less risk of contamination for the environment. With the objective of evaluating the overall effect of timing of N application on yield, grain protein concentration and N-FUE, three experiments were set up between 1997 and 1998 in the area of Colonia, Uruguay. The treatments consisted of different moments of N-fertilization (30 kg ha⁻¹), applied at planting (only in 1997), Z22, Z30, or Z39. The FUE was evaluated using ¹⁵N. The result of this study shows that the best time for checking the N status of the crop and for N application seems to be a combination of planting and Z22. The diagnosis at Z30 would be recommended only when N can be applied in the vicinity of this physiological stage, because applications at a later stage can increase the risk of excessive grain protein concentration. However, N FUE tend to increase with the delay of N fertilization from planting to Z39.

¹ Dirección Nacional de Tecnología Nuclear. Mercedes 1041, Montevideo, Uruguay.

² Facultad de Agronomía. Garzón 780, Montevideo, Uruguay. (chperdom@fagro.edu.uy)

Index words: ^{15}N , N management, N-response indexes.

INTRODUCCION

El cultivo de cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) es uno de los más importantes de Uruguay y la mayor parte de la producción se exporta como malta o grano. Actualmente, el mercado demanda que el grano tenga una concentración entre 105 y 115 g de proteína kg^{-1} (16.8 y 18.4 g de N kg^{-1}) y el resto de la producción, que no cumpla con esta norma, recibe un precio menor. El manejo del N es fundamental en este cultivo, ya que éste afecta no sólo el rendimiento, sino también el contenido proteico del grano. Además, en las condiciones en que se siembra cebada en Uruguay es difícil ajustar la fertilización nitrogenada de forma generalizada, ya que existe variabilidad climática, de fechas de siembra, de cultivos antecesores y de formas de laboreo.

La necesidad de contar con indicadores objetivos de la capacidad de suministro de N por el suelo, para ajustar la dosis de N, ha llevado en Uruguay al desarrollo de sistemas de recomendación basados en el análisis de planta en Z30 (Baetghen, 1992) y de NO_3^- en el suelo a la siembra y a Z22 (Hoffman *et al.*, 1999; Perdomo *et al.*, 1999). Estos índices pueden usarse solos o en combinación, lo que proporciona una gran flexibilidad al sistema de recomendación de fertilización. Un problema asociado con el uso de estos índices es, que frecuentemente el momento de fertilización es posterior al estadio de diagnóstico. El efecto de este retraso nunca se ha evaluado en la investigación y el estadio que, en principio, se vería más afectado sería Z30, debido a que ésta sería la última etapa en la cual la aplicación de N podría aumentar, en forma importante, el rendimiento (Alley *et al.*, citados por Baetghen, 1992). Existen, además, numerosos estudios que muestran que cuando se retrasa el momento de aplicación del N con respecto a la siembra, tiende a aumentar el contenido de proteína del grano (Doyle y Shapland, 1991; Bulman y Smith, 1993). En condiciones de producción sería también de esperar que los retrasos fueran más frecuentes en Z30 ya que, en las condiciones de Uruguay, el cultivo permanece en este estadio por un corto período (cerca de una semana). En esas condiciones, el atraso de la fertilización en relación con el momento de diagnóstico está, muchas veces, determinado por el tiempo que transcurre entre la toma de la muestra y el reporte del resultado del análisis.

El momento de aplicación del fertilizante nitrogenado puede afectar también la eficiencia de su uso. Este es un parámetro importante, ya que una aplicación ineficiente de N significa no sólo una pérdida económica para el productor, sino que puede deteriorar la calidad del medio ambiente, tanto en lo que respecta a la contaminación de aguas subterráneas o al efecto invernadero (Smith *et al.*, 1997; Raun y Johnson, 1999). Por consiguiente, todas las prácticas que tiendan a aumentar la eficiencia de uso del N, tienden a reducir estos efectos negativos. Actualmente, no se dispone de información para Uruguay, acerca de la eficiencia de uso del N en cada uno de estos estadios del cultivo, pero la información en trigo proveniente de otras regiones indica que, a medida que se retrasa el momento de aplicación desde la siembra hasta el macollaje, tiende a aumentar la eficiencia de uso del N (FAO, 1980; Raun y Johnson, 1995).

Con base en la información anterior, parece razonable suponer que para las condiciones del cultivo de cebada cervecera en Uruguay debería existir un período óptimo de aplicación de N, en el cual se concilien la obtención de alto rendimiento con una aceptable cantidad de proteína y una alta eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado. Sin embargo, en Uruguay no existen estudios en cebada que evalúen el efecto del momento de aplicación de N sobre estos tres parámetros, por lo que el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de distintos momentos de aplicación del N en la eficiencia de uso del mismo, así como en el contenido proteico y en el rendimiento de grano. La razón de esta evaluación radica en que se considera que la selección del momento más adecuado de diagnóstico y de aplicación de N se debería realizar, considerando el efecto del momento en los tres parámetros mencionados.

MATERIALES Y METODOS

En 1997, se realizó un ensayo en la zona de Playa Fomento y, en 1998, en dos sitios: Colonia Suiza y Tarariras. Estos sitios se encuentran en el departamento de Colonia, al suroeste de Uruguay. Los ensayos se instalaron dentro de campos destinados a la producción de cebada comercial y, excepto por la fertilización nitrogenada, el resto de las prácticas agrícolas fueron las usadas por los agricultores en sus predios (Cuadro 1).

Los ensayos consistían en parcelas de tipo convencional, donde se evaluaba el efecto de los

tratamientos en el rendimiento de materia seca (MS), y otras donde se aplicaba ^{15}N y se evaluaban los parámetros isotópicos. Las parcelas convencionales tenían un área de 4 m^2 , mientras que las isotópicas eran de 2 m^2 . Dentro de cada año, las parcelas de tipo convencional e isotópico tuvieron los mismos tratamientos. El tratamiento testigo fue común en ambos años y consistió en una dosis basal de $30\text{ kg de N ha}^{-1}$, aplicada normalmente a la siembra por los agricultores. Los otros tratamientos recibieron, además de esa dosis de N basal, una segunda dosis de $30\text{ kg de N ha}^{-1}$, aplicada en distintos momentos. En 1997, el N se aplicó en cuatro momentos: a la siembra, en Z22, Z30 ó Z39, respectivamente. En 1998, sólo se aplicaron tres tratamientos adicionales al testigo y se eliminó el de la siembra. La eliminación de este tratamiento, en 1998, se debió a sugerencias de agrónomos de las empresas malteras y cerveceras, quienes consideraron que el ajuste de la dosis de N a la siembra es poco relevante en la práctica, ya que la dosis es generalmente constante, cercana a $30\text{ kg de N ha}^{-1}$. Además, se facilitó la instalación de los ensayos en el segundo año, ya que éstos se establecieron en Z22 sobre campos ya sembrados.

En este trabajo, los tratamientos se identificaron por la dosis total, seguida por el momento de la segunda aplicación de N, así, por ejemplo, el Tratamiento 60-Z22 significa la combinación de 30 N a la siembra y 30 N a Z22. A su vez, el Tratamiento 60-S significa la aplicación de 60 N a la siembra. En los dos años, la fuente de N utilizada fue urea y en los ensayos isotópicos se usó urea- ^{15}N marcada a 4% átomos abundancia.

En 1997, en las parcelas isotópicas se cosechó la parte aérea de plantas en Z22, Z30, Z39 y madurez fisiológica, aunque estos momentos difirieron entre tratamientos. Para el Tratamiento 30-S, sólo se cosechó a madurez fisiológica. En cambio, para la dosis total de $60\text{ kg de N ha}^{-1}$, los momentos de cosecha fueron todos los posteriores al de aplicación.

Por ejemplo, para 60-S, los momentos de cosecha fueron Z22, Z30, Z39 y madurez fisiológica. En cambio, para 60-Z39, sólo se cosechó a madurez fisiológica. En 1998, la cosecha de los ensayos sólo se realizó a madurez fisiológica. En ambos años, el diseño utilizado fue de bloques al azar y el número de repeticiones, en 1997 y 1998, fueron 4 y 3, respectivamente.

Previo a la siembra, se tomaron muestras de los primeros 20 cm del suelo y se determinaron C orgánico por el método Walkley-Black, P por Bray I y pH en agua por potenciometría, para lo cual se utilizó una relación suelo:solución de 1:2.5. Los cortes de plantas se realizaron en forma manual; en el ensayo convencional se muestreó un área de 2 m^2 por parcela, mientras que en el isotópico, el área de muestreo fue de 0.5 m^2 . En el último corte, se separó el grano del resto de la planta (paja) con una trilladora estacionaria. En todos los cortes, el material cosechado se secó a $65\text{ }^\circ\text{C}$ por más de 24 h , hasta alcanzar peso constante, y se determinó rendimiento de MS, N total por el método Kjeldahl y la relación isotópica $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ por espectrometría de emisión óptica. La EUF se calculó dividiendo la cantidad de N absorbida por la planta derivada del fertilizante entre 30, la dosis de N marcado con ^{15}N . La concentración de proteína en grano se estimó multiplicando el valor de concentración de N en grano por 6.25, debido a que éste es el factor que utilizan las empresas malteras y cerveceras en Uruguay para realizar este cálculo. Para el análisis estadístico se utilizó el procedimiento GLM del programa SAS (SAS Institute, 1988). Los datos se analizaron por análisis de varianza (Anova), para lo cual se separaron los efectos de los tratamientos en contrastes ortogonales y por análisis de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSION

En 1997, las lluvias de julio (Cuadro 2) determinaron un atraso de la siembra, prevista para la

Cuadro 1. Resumen de las características químicas, tipo de suelo y fecha de siembra de los ensayos.

Sitio	Tipo de suelo	Carbono orgánico %	pH en H_2O	P Bray II mg kg^{-1}	Fecha de siembra
Playa Fomento	Typic Hapludert, esmectítico	2.9	6.7	9	12 ago 1997
Colonia Suiza	Typic Arguidoll, esmectítico-illítico	1.9	6.6	2	19 ago 1998
Tarairas	Typic Arguidoll, esmectítico-illítico	2.0	6.7	9	21 sep 1998

primera quincena de julio. Esto, posteriormente, limitó el rendimiento.

En 1998, la diferencia principal entre los sitios fue la fecha de siembra, mientras que en Colonia Suiza fue una siembra normal; en Tarariras la siembra fue tardía. Este año fue marcadamente más seco que 1997 (Cuadro 2).

Evolución de la producción de MS y Absorción de N por el Cultivo en 1997

Durante el crecimiento del cultivo se observaron cambios importantes en la tasa de producción de MS y de absorción de N (Figura 1A y 1B). Entre siembra y Z30, la tasa de crecimiento y de absorción de N fue relativamente baja. Luego de Z30 ocurrió un marcado incremento en la tasa de crecimiento del cultivo, lo cual coincidió con el aumento en la tasa de absorción de N. A partir de Z39, si bien continuó la acumulación de MS, ya no aumentó más la cantidad de N absorbido. Este efecto se observa más claramente cuando se considera el N absorbido por la planta derivado del fertilizante (Nddf), donde luego de

Cuadro 2. Datos climatológicos para las dos estaciones de crecimiento de este trabajo correspondientes a la Estación Experimental "La Estanzuela", ubicada en el Departamento de Colonia, Uruguay.

	Año	
	1997	1998
Evapotranspiración total (mm)		
Junio	28 (-8) †	23 (-13)
Julio	48 (11)	22 (-15)
Agosto	57 (-2)	39 (-20)
Septiembre	71 (-10)	72 (-10)
Octubre	98 (-13)	115 (3)
Noviembre	127 (-17)	131 (-13)
Precipitación total (mm)		
Junio	85 (15)	27 (-43)
Julio	46 (-26)	57 (-15)
Agosto	86 (13)	12 (-61)
Septiembre	47 (-33)	63 (-17)
Octubre	115 (10)	30 (-75)
Noviembre	72 (-39)	111 (0)
Anual	1071 (-43)	884 (-231)
Temperatura media diaria (°C)		
Junio	11 (-0.4)	11 (-0.4)
Julio	12 (+1.8)	12 (+1.5)
Agosto	13 (+1.7)	11 (-0.3)
Septiembre	13 (-0.4)	13 (-0.5)
Octubre	16 (-0.0)	17 (+1.1)
Noviembre	18 (-0.3)	19 (+0.1)

† Los números entre paréntesis indican la desviación de la evapotranspiración (Penman), la precipitación y la temperatura con respecto a los valores promedio correspondientes al período 1961 a 1990.

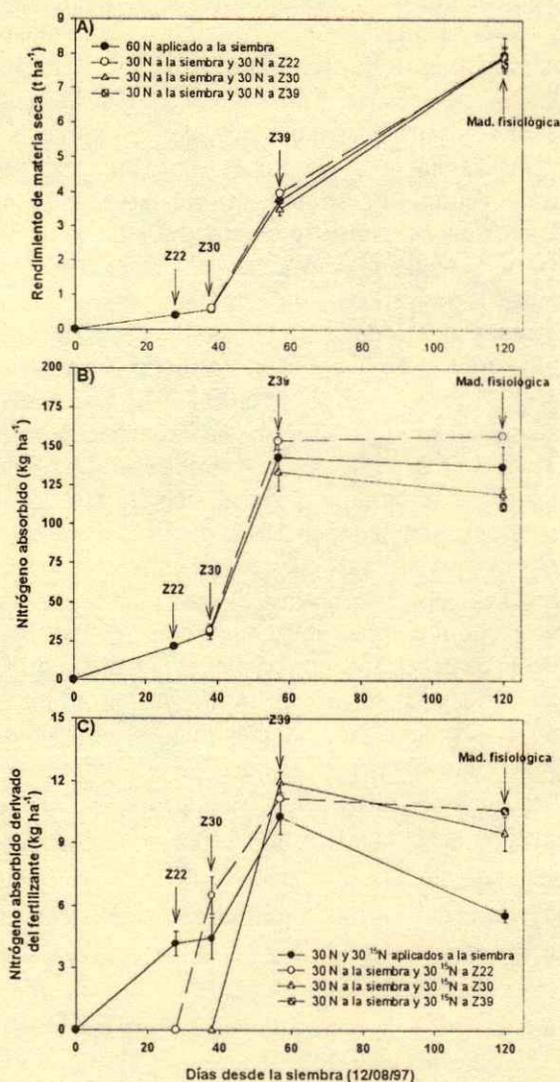


Figura 1. Evolución de la producción total de materia seca y de la absorción de N total y derivada del fertilizante en el ensayo de 1997.

Z39 la cantidad absorbida de esta fuente pareció decrecer en algunos tratamientos (Figura 1C). Esta aparente estabilidad o pequeña disminución en la absorción de N puede ser también el resultado del balance entre la absorción y las pérdidas de N. Algunos de los posibles mecanismos de pérdida de N por el cultivo son la caída de hojas y otros materiales vegetales, así como la excreción de N de la planta en forma gaseosa (Daigger *et al.*, 1976; Harper *et al.*, 1987). Este adelanto observado en la absorción de N respecto a la producción de MS (más de 90% del N ya se absorbió en Z39) indicaría que si se asegura una correcta nutrición nitrogenada en los estadios previos

a Z39, sería poco probable que se produzcan deficiencias en estadios posteriores. La alta tasa de absorción de N, posteriormente a Z30, lleva además a que el N aplicado cerca de este estadio esté poco sujeto a pérdidas y, por lo tanto, sea utilizado por las plantas con una alta eficiencia.

El momento de la segunda aplicación de N no afectó, de forma considerable, la producción de MS y se observó sólo una menor producción cuando el N se aplicó en Z30 (Figura 1A; Cuadro 3). La absorción total de N tampoco se afectó. En cambio, la absorción de Nddf en Z30 fue mayor cuando la aplicación de N se realizó en Z22 con respecto a la siembra (Cuadro 3). En relación con la tasa de absorción de Nddf evaluada hasta Z39, se observa que ésta tendió a aumentar cuando el N se aplicó en Z22 ó Z30 con respecto a la siembra (Figura 1C). Esto determinó que en Z39 las cantidades de Nddf absorbidas fueron similares para los tres momentos de aplicación de la segunda aplicación de N.

La concentración de N en la planta tendió a disminuir a lo largo del ciclo del cultivo (Cuadro 4). Este resultado simplemente refleja el hecho de que la absorción de N antecedió a la producción de MS. Los tratamientos no afectaron este parámetro (Cuadro 4). También se observó que cuanto mayor fue el tiempo transcurrido entre la aplicación de fertilizante marcado y el momento de muestreo, menores fueron los valores de Nddf, obtenidos en cada muestreo (Cuadro 4). Este resultado puede explicarse asumiendo que a lo largo del ciclo el N mineral, derivado del fertilizante, cada vez representa una proporción menor del N mineral total, debido, en parte, a la mineralización de N del suelo y a la inmovilización y absorción del N mineral derivado del fertilizante. Esto implica que, a medida que nos alejamos del momento de la segunda aplicación de N,

Cuadro 3. Resultados del Anova para materia seca, nitrógeno y Nddf en dos momentos de muestreo.

Momento de muestreo	Parámetro evaluado	Anova	Contraste		CV
			Siembra vs Resto	Z22 vs Z30	
		- - - - Valor de P - - - -			%
Z30	MS [§]	NS [†]	NC [‡]	NC	6.8
	N	NS	NC	NC	5.0
	Nddf	0.03	NC	NC	8.2
Z39	MS	0.06	NS	0.02	6.0
	N	NS	NS	NS	11.8
	Nddf	NS	NS	NS	11.0

[†] NS = no significativo (P > 0.10). [‡] NC = no corresponde. [§] MS = materia seca; N = nitrógeno; Nddf = nitrógeno derivado del fertilizante.

Cuadro 4. Evolución de la concentración de N y Nddf en dos momentos de muestreo.

Momento de muestreo	Tratamiento	N y Nddf	
		N	Nddf [†]
		- - - - % - - - -	
Z22	60-S	5.1	19.2
Z30	60-S	5.3	15.8
	60-Z22	5.2	20.3
	Valor de P	NS [†]	0.02
	CV (%)	3.1	5.1
Z39	60-S	3.8	7.2
	60-Z22	3.9	7.2
	60-Z30	3.8	9.3
	Valor de P	NS	NS
	CV (%)	6.5	23.1
	Contrastes	- - Valor de P - -	
Siembra vs Resto		NS	NS
Z22 vs Z30		NS	NS

[†] Nddf = nitrógeno derivado del fertilizante.

[‡] NS = no significativo (P > 0.10).

la planta absorbe N en relaciones isotópicas ¹⁵N:¹⁴N más próximas a la abundancia natural. Los tratamientos afectaron el Nddf sólo en el muestreo de Z30, donde se observó una mayor proporción de Nddf cuando el N se aplicó en Z22 que a la siembra.

Resultados al Momento de la Cosecha para 1997 y 1998

Los resultados no isotópicos del ensayo de Playa Fomento, de 1997, se presentan en el Cuadro 5. El rendimiento en grano en este sitio fue bajo debido, en parte, a que la época de siembra fue tardía. Este sitio tuvo, además, un alto coeficiente de variación en el rendimiento de grano, debido, en parte, a la variabilidad en la profundidad del horizonte A, una característica natural de este tipo de suelos en Uruguay. En todos los tratamientos, se observaron problemas sanitarios y vuelco, esto es el desplazamiento inelástico del cultivo hacia el suelo. Estos dos fenómenos también se observaron en el testigo. No existieron diferencias significativas en el rendimiento de grano ni de MS en paja. Hubo sí un aumento significativo del contenido de N en grano con la dosis, pero no existió respuesta al momento de aplicación (el contraste 30 vs 60 fue el único significativo). Sin embargo, este aumento no fue determinante de la calidad industrial del grano, ya que todos los tratamientos, incluyendo el testigo, presentaban un contenido de N en grano superior al límite crítico de calidad. Tampoco hubo un efecto importante de los tratamientos en la cantidad de N

Cuadro 5. Resultados no-isotópicos del sitio Playa Fomento de 1997.

Tratamiento	MS	MS	N	N	N	N
	Grano	Paja	Grano	Paja	Grano	Paja
	kg ha ⁻¹				%	
30-S	2392	5808	50.7	73.2	2.1	1.2
60-S	2584	5398	62.6	66.9	2.4	1.2
60-Z22	1976	6082	47.5	88.8	2.4	1.5
60-Z30	2200	5743	50.2	63.7	2.3	1.1
60-Z39	1890	5814	44.2	72.1	2.3	1.2
Valor de P	NS [†]	NS	NS	ND [‡]	0.09	ND
CV (%)	21.1	12.6	22.1	ND	5.9	ND
Contrastes	Valor de P					
30 vs 60	NS	NS	NS	ND	0.01	ND
60-Z39 vs Resto-60	NS	NS	NS	ND	NS	ND
60-S vs 60-(Z22 yZ30)	NS	NS	0.07	ND	NS	ND
60-Z22 vs 60-Z30	NS	NS	NS	ND	NS	ND

[†] NS = no significativo (P > 0.10).

[‡] ND = No hay datos suficientes para realizar análisis de varianza (algunas muestras de paja se perdieron).

MS = materia seca.

absorbida por el grano; pero dentro de los tratamientos que recibieron 60 N, la aplicación de N en la siembra provocó mayor absorción de este nutrimento que la de Z22 ó Z30. No hubo un efecto significativo de los tratamientos, ni en la concentración ni en la cantidad de N absorbida en la paja.

En este sitio, el análisis estadístico de los resultados isotópicos sólo se realizó en los parámetros de grano (Cuadro 6), debido a que durante el secado se perdió material de algunas muestras de paja. Tanto la proporción como la cantidad de Nddf del grano aumentó con las aplicaciones tardías de la segunda aplicación de 30 N. La EUF también tendió a aumentar con el retraso del momento de aplicación de N, pero los valores de eficiencia fueron siempre menores que 40%.

En el sitio Colonia Suiza, de 1998, el rendimiento alcanzado fue alto (Cuadro 7). La época de siembra fue normal y no se presentaron problemas sanitarios ni de sequía. No existieron diferencias significativas entre tratamientos ni para el rendimiento de grano ni de MS de paja. Si hubo diferencias significativas para la concentración de N en grano, la cual aumentó con la dosis y con el retraso del momento de la segunda aplicación de 30 N. La aplicación de 30 N en la siembra o de 60 N cuando la segunda aplicación de 30 N se agregó en Z39, resultó en un contenido de proteína del grano por debajo y por encima de la norma, respectivamente. La cantidad de N absorbida en el grano, así como la concentración y la cantidad de N absorbida en la paja aumentaron con la dosis, pero no hubo respuesta al momento de aplicación.

Cuadro 6. Resultados isotópicos del sitio Playa Fomento de 1997.

Momento de aplicación del ¹⁵ N	Nddf [†]	Nddf	Nddf	Nddf	Nddf	EUR [‡]
	Grano	Paja	Grano	Paja	Planta	
	kg ha ⁻¹				%	
Siembra (S)	3.0	2.8	5.0	4.2	4.5	19.2
Z22	3.4	6.1	7.2	6.9	7.0	31.6
Z30	4.0	5.0	8.1	7.8	7.9	30.1
Z39	4.4	7.2	10.0	9.9	9.9	38.5
Valor de P	NS [§]	ND [¶]	< 0.01	ND	ND	ND
CV (%)	20.8	ND	11.0	ND	ND	ND
Contrastes	Valor de P					
Z39 vs S, Z22 y Z30	0.06	ND	< 0.01	ND	ND	ND
S vs Z22 y Z30	NS	ND	< 0.01	ND	ND	ND
Z22 vs Z30	NS	ND	NS	ND	ND	ND

[†] Nddf = nitrógeno derivado del fertilizante. [‡] EUR = eficiencia de uso del fertilizante. [§] NS = no significativo (P > 0.10).

[¶] ND = No hay suficientes datos para realizar análisis de varianza (algunas muestras de paja se perdieron).

Cuadro 7. Resultados no-isotópicos del sitio Colonia Suiza de 1998.

Tratamiento	MS	MS	N	N	N	N
	Grano	Paja	Grano	Paja	Grano	Paja
	----- kg ha ⁻¹ -----				----- % -----	
30-S	5220	4385	85.0	12.6	1.6	0.3
60-Z22	5291	4333	94.5	18.5	1.8	0.4
60-Z30	5612	4980	102.4	20.5	1.8	0.4
60-Z39	5279	4390	100.9	18.3	1.9	0.4
Valor de P	NS	NS	NS	NS	0.04	NS
CV (%)	7.1	11.4	9.7	28.4	3.0	23.1
Contrastes	----- Valor de P -----					
30 vs 60	NS [†]	NS	0.06	0.10	0.01	0.07
60-Z39 vs Resto-60	NS	NS	NS	NS	0.03	NS
60-Z22 vs 60-Z30	NS	NS	NS	NS	NS	NS

[†] NS = no significativo (P > 0.10).

Para los parámetros isotópicos (Cuadro 8), sólo se observaron efectos significativos en la cantidad de Nddf en el grano y en la concentración de Nddf en la planta (promedio ponderado de grano + paja). En ambos casos, el aumento significativo sólo se observó para el momento de fertilización más tardío (Z39). Los valores de EUF, obtenidos en este ensayo, fueron altos y también tendieron a incrementarse con los momentos de fertilización más tardíos.

El rendimiento de grano en el sitio Tarariras, de 1998, fue relativamente alto (Cuadro 9), a pesar de ser ésta una siembra tardía. Los tratamientos no tuvieron un efecto significativo en el rendimiento; excepto que la segunda aplicación de 30 N en Z30 provocó un rendimiento menor que la misma dosis aplicada en Z22. Resultados similares se observaron para el rendimiento de MS en paja. Al igual que en el sitio Colonia Suiza, la concentración de N en grano se incrementó con la aplicación tardía en Z39, lo cual superó la norma de calidad. Una tendencia similar se observó para la cantidad absorbida de N por el grano. No se observaron efectos significativos de los

tratamientos en la concentración y en la cantidad absorbida de N en la paja.

En este sitio, los únicos parámetros isotópicos afectados por los tratamientos fueron: la concentración y cantidad de Nddf en el grano y la EUF, todos ellos se incrementaron con la aplicación de N en Z39 (Cuadro 10). Los valores de EUF observados en este sitio, aunque algo menores que los de Colonia Suiza, también pueden considerarse elevados.

En la Figura 2, se presenta, para los tres sitios, la relación entre el momento de la segunda aplicación de 30 N con tres parámetros del cultivo elegidos por su importancia agronómica. Estos parámetros: rendimiento de grano, concentración de proteína del grano y EUF, pueden ser usados para evaluar las ventajas relativas de cada momento de aplicación de la segunda fertilización con N. El análisis de la Figura 2 considera el momento de la segunda aplicación como una variable cuantitativa y, por lo tanto, difiere del análisis presentado en los Cuadros 5 al 10, donde esta variable se considera en forma cualitativa (Anova).

Cuadro 8. Resultados isotópicos del sitio Colonia Suiza de 1998.

Momento de aplicación del ¹⁵ N	Nddf [†]	N ddf	N ddf	N ddf	N ddf	EUF [‡]
	Grano	Paja	Grano	Paja	Planta	
	----- kg ha ⁻¹ -----			----- % -----		
Z22	15.1	1.9	16.0	14.7	14.7	56.3
Z30	17.3	2.8	17.0	15.0	15.1	67.3
Z39	18.0	2.8	18.0	14.0	16.3	69.3
Valor de P	NS [§]	NS	NS	NS	0.05	NS
CV (%)	12.6	23.9	5.4	7.2	3.5	12.3
Contrastes	----- Valor de P -----					
Z39 vs Z22 y Z30	0.08	NS	NS	NS	0.02	NS
Z22 vs Z30	NS	NS	NS	NS	NS	NS

[†] Nddf = nitrógeno derivado del fertilizante. [‡] EUF = eficiencia de uso del fertilizante. [§] NS = no significativo (P > 0.10).

Cuadro 9. Resultados no-isotópicos del sitio Tarariras de 1998.

Tratamiento	MS	MS	N	N	N	N
	Grano	Paja	Grano	Paja	Grano	Paja
	kg ha ⁻¹				%	
30-S	4921	3173	86.4	10.4	1.8	0.3
60-Z22	5264	3422	89.5	11.6	1.7	0.3
60-Z30	4703	2877	86.4	11.9	1.8	0.4
60-Z39	5036	3174	101.8	11.9	2.0	0.4
Valor de P	NS [†]	NS	NS	NS	0.05	NS
CV (%)	5.7	8.0	10.4	23.8	6.2	22.9
Contrastes	Valor de P					
30 vs 60	NS	NS	NS	NS	NS	NS
60-Z39 vs Resto-60	NS	NS	0.08	NS	0.02	NS
60-Z22 vs 60-Z30	0.05	0.04	NS	NS	NS	NS

[†] NS = no significativo (P > 0.10).

Uno de los efectos que resulta significativo en este nuevo análisis es la depresión del rendimiento del grano al retrasarse el momento de aplicación de N en el sitio Playa Fomento (Figura 2A). Este resultado, poco frecuente, puede explicarse si se asume que la aplicación del N a la siembra posibilitó un aumento de la tasa de macollaje y una mayor exploración radicular. Las lluvias presiembra de ese año pudieron haber lavado parte del N mineral, ubicándose el mismo a cierta profundidad de la superficie. Por lo tanto, las plantas que se fertilizaron con dosis mayores en la siembra tuvieron mayor capacidad de explorar el perfil del suelo, mientras que los tratamientos que recibieron este segundo incremento de 30 N en etapas posteriores se afectaron en su desarrollo temprano, perdiendo así la capacidad de absorber el N del suelo en etapas más tardías. En los otros sitios, en cambio, no habría existido una deficiencia importante de N en la siembra y, por lo tanto, el momento de aplicación no tuvo un efecto significativo en el rendimiento de grano.

En la Figura 2B, se observa que la concentración de proteína del grano aumentó en forma significativa con el retraso del momento de aplicación en sólo un sitio (Tarariras). Sin embargo, de acuerdo con el Anova, en el sitio Colonia Suiza había existido un incremento significativo de la proteína con la aplicación de N en Z39 (Cuadro 7). Por lo tanto, en dos de los sitios de este estudio se observó que el retraso del momento de la segunda aplicación de N hasta el estadio de Z39 resultó en concentraciones de proteína del grano por encima de la norma requerida por la industria. Esta tendencia observada está de acuerdo con Vaughan *et al.* (1990), quienes reportaron que, a medida que se retrasa el momento de aplicación más allá de Z30, una proporción cada vez mayor de este nutrimento es transportado directamente al grano, pero sin incrementar el rendimiento. En el sitio Playa Fomento, el contenido de proteína estuvo por encima de la norma en todos los tratamientos, aun en el testigo, resultado que se explica por el bajo rendimiento y la siembra tardía del ensayo. Por otra

Cuadro 10. Resultados isotópicos del sitio Tarariras de 1998.

Momento de aplicación del ¹⁵ N	Nddf [†]	Nddf	Nddf	Nddf	Nddf	EUF [‡]
	Grano	Paja	Grano	Paja	Planta	
	kg ha ⁻¹		%			
Z22	13.1	1.6	14.7	14.0	14.6	49.0
Z30	12.6	1.3	15.0	11.3	14.3	46.3
Z39	17.0	1.2	16.7	10.3	15.8	60.7
Valor de P	0.03	NS [§]	0.1	NS	NS	0.03
CV (%)	9.4	25.3	5.7	15.2	6.6	8.5
Contrastes	Valor de P					
Z39 vs Z22 y Z30	0.02	NS	0.04	NS	NS	0.01
Z22 vs Z30	NS	NS	NS	NS	NS	NS

[†] Nddf = nitrógeno derivado del fertilizante. [‡] EUF = eficiencia de uso del fertilizante. [§] NS = no significativo (P > 0.10).

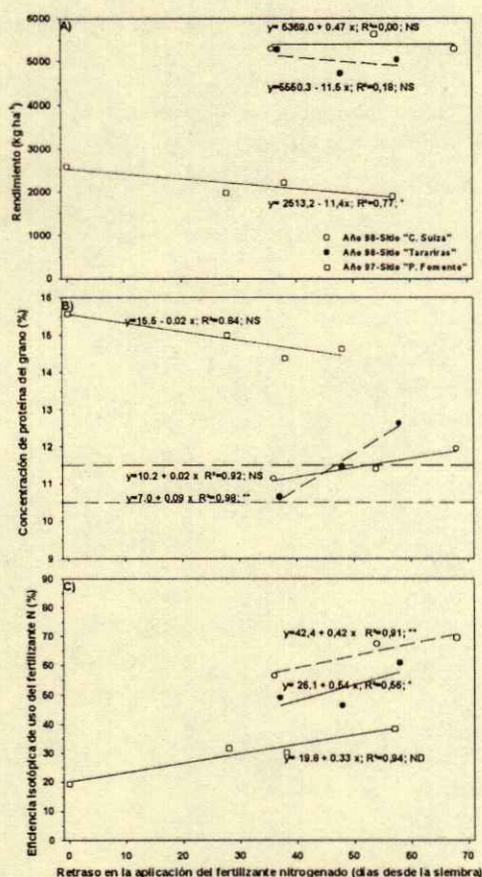


Figura 2. Relación entre el rendimiento, la concentración de proteína del grano y la EUF con el momento de aplicación del segundo incremento de fertilización de 30 kg ha⁻¹ de N. En las gráficas se incluye la ecuación de regresión, el valor de R² para el promedio en la gráfica y la significación estadística (* = P ≤ 0.1, ** = P ≤ 0.05, NS = no significativo, ND = no hay datos para el análisis). La banda rayada de la gráfica b) es el rango de concentración de proteína del grano requerido por la industria.

parte, como ya se señaló, la aplicación de 30 N en la siembra provocó en el sitio Colonia Suiza un contenido proteico del grano por debajo de la norma.

En cuanto a la EUF, en todos los sitios se observó una tendencia creciente de este parámetro, a medida que se retrasaba la segunda aplicación de N, aunque la significación estadística de esta relación no pudo evaluarse en el sitio Playa Fomento. Este resultado concuerda con lo reportado por Raun y Johnson (1999). Además, la menor EUF nitrogenado obtenida en 1997 puede explicarse por el bajo rendimiento de grano del sitio Playa Fomento en relación con los sitios de 1998.

CONCLUSIONES

Para las condiciones de Uruguay, la aplicación de N sólo en la siembra puede determinar bajos valores de EUF y, en algunas situaciones, concentraciones de proteína del grano por debajo de la norma. Los momentos óptimos de aplicación de N que concilian la obtención de rendimiento y proteína del grano aceptable, con un uso eficiente de este fertilizante serían los estadios de siembra y Z22. El diagnóstico en Z30 sería recomendable siempre que se logre fertilizar cerca de este estadio. Esto es debido a que, a medida que se retrasa la época de refertilización con N, más allá de Z30, disminuye la posibilidad de incrementar el rendimiento y aumenta el riesgo de que la concentración de proteína del grano supere la norma; aunque, por otro lado, este manejo tiende a aumentar la EUF. Por lo tanto, cuando los cultivos presentan deficiencias de N, las aplicaciones fraccionadas de este nutrimento en siembra y Z22 ó Z30 puede resultar no sólo en beneficios económicos para el productor y la industria, sino también en beneficios para el medio ambiente, ya que la relativamente alta EUF obtenida con este manejo de la fertilización implicaría un riesgo menor de contaminación del agua y de la atmósfera.

LITERATURA CITADA

- Baetghen, W. 1992. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. Serie Técnica 24. INIA La Estanzuela.
- Bulman, P. y D. Smith. 1993. Grain protein response of spring barley to high rates and post-anthesis application of fertilizer nitrogen. *Agron. J.* 87: 1109-1113.
- Daigger, L.A., D.H. Sander y G.A. Peterson. 1976. Nitrogen content of winter wheat during growth and maturation. *Agron. J.* 68: 815-818.
- Doyle, A.D. y R.A. Shapland. 1991. Effect of split applications on the yield and protein content of dryland wheat in Northern New South Wales. *Aust. J. Exp. Agric.* 31: 85-92.
- FAO. 1980. Maximizing the efficiency of fertilizer use by grain crops. *Fertilizer Bulletin* 3. FAO. Rome.
- Harper, L.A., R.R. Sharpe, G.W. Langdale y G.E. Giddens. 1987. Nitrogen cycling in wheat crop: Soil, plant and aerial nitrogen transport.
- Hoffman, E., C. Perdomo, M. Pastorini y C. Pons. 1999. Indicadores de manejo de la fertilización nitrogenada en cebada cervecera. EMBRAPA. XIX Reunión Anual de Pesquisa de Cevada. Passo, Fundo, Brasil.
- Perdomo, C., E. Hoffman, C. Pons y M. Pastorini. 1999. Relación entre la concentración de nitrato del suelo en siembra y Zadoks-22 y la respuesta al N en cebada cervecera. III Congreso Latinoamericano de Cebada, Colonia, Uruguay.
- Raun, W.R. y G.V. Johnson. 1995. Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous wheat. *Agron. J.* 87: 827-834.

- Raun, W.R. y G.V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91: 357-363.
- SAS Institute. 1988. SAS/STAT user's guide. Version 6.03. SAS Institute. Cary, NC.
- Smith, K.A., I.P. McTaggart y H. Tsuruta. 1997. Emissions of N₂O and NO associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation. *Soil Use Manage.* 13: 296-304.
- Vaughan, B., K.A. Barbarick, D.G. Westfall y P.L. Chapman. 1990. Tissue nitrogen levels for dryland hard red winter wheat. *Agron. J.* 82: 561-565.

ACTIVIDADES ENZIMATICAS Y CONTRIBUCION DE RESIDUOS DE COSECHA DE MAIZ AL NITROGENO DEL SUELO EN SISTEMAS DE LABRANZA, EN LOS LLANOS CENTRALES, VENEZUELA

Enzymatic Activities and Contribution of Corn Residues to Soil Nitrogen under Tillage Practices in the Central Plains, Venezuela

Mingrelia España¹, Belkys Rodríguez¹, Evelyn Cabrera B.¹ y Brunello Cecanti²

RESUMEN

La liberación de nutrimentos de los residuos orgánicos depende de sus propiedades químicas y físicas, así como de las condiciones ambientales y las poblaciones microbianas. Con el objetivo de determinar la actividad enzimática relacionada con la mineralización del N y estimar la contribución de los residuos de cosecha al N del suelo en diferentes sistemas de labranza del cultivo de maíz en los llanos centrales, Venezuela, se incorporaron residuos de maíz marcados con ¹⁵N en un ensayo donde se evaluaron tres sistemas de labranza: siembra directa (SD), siembra directa previo un pase de cincel (CSD) y labranza convencional (LC). La cantidad de nitrógeno liberado por el residuo de cosecha y el ΔN fue mayor en LC con respecto a SD y CSD. La actividad enzimática se concentró en el estrato superficial del suelo (0 a 10 cm) y se observaron diferencias significativas para las enzimas (proteasa y ureasa) en la profundidad de 10 a 20 cm, en LC se presentó la mayor actividad. Estos resultados sugieren que la aplicación de residuos de cosecha con relación lignina:N y C:N baja, a suelo con relación C:N también baja, es de esperar que ocurra una descomposición más acelerada de los residuos, probablemente debido a un aumento de la actividad biológica del suelo (mayor proliferación de microorganismos ureolíticos y proteolíticos), lo cual se estaría manifestando con una mayor contribución de N proveniente de los residuos al N del suelo.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias-Instituto de Investigaciones en Recursos Agroecológicos (CENIAP-IRA). Apartado 4684, Maracay, Venezuela. (mingrelia@hotmail.com)

² Consejo Nacional de Investigaciones (CNR). Instituto para Química del Terreno (ICT). Pisa, Italia.

Recibido: Enero de 2001. Aceptado: Diciembre de 2001.
Publicado en Terra 20: 81-86.

Palabras clave: Ureasa, proteasa, nitrógeno, isótopo ¹⁵N, labranza.

SUMMARY

The nutrient release from organic residues depends on the chemical and physical properties, as well as the environmental conditions and microbial population in the soil system. The objectives of the present study were to determine the enzymatic activities related to N mineralization, and to estimate the contribution of crop residues on soil N under different tillage practices using corn residues in the Central Plains, Venezuela. In a field experiment, corn residues labelled with ¹⁵N were incorporated in soil to evaluate three tillage practices: Direct planting (SD), direct planting after a chisel pass (CSD), and conventional tillage (LC). The amount of N released from crop residues and the ΔN were larger with the LC treatment than with SD and CSD treatments. Enzymatic activity was concentrated in the topsoil layer (0 to 10 cm), and there were significant differences between the two enzymes (protease and urease) in soil at 10 to 20 cm deep, where LC treatment had more enzymatic activity. These results suggest that the application of crop residues with low lignin:N and C:N ratios in a soil with a low C:N ratio, the decomposition rate of crop residues will be faster, probably because of the increase in biological activity of the soil (larger proliferation of ureolytic and proteolytic organisms), which could have shown up through an increase in soil N with N released from crop residues.

Index words: Urease, protease, nitrogen, isotope ¹⁵N, tillage.

INTRODUCCION

En Venezuela, los suelos con alta capacidad productiva constituyen aproximadamente 2% de la

superficie nacional, el resto presenta limitaciones por aridez, drenaje, fertilidad y relieve (Comerma y Paredes, 1977). Los cultivos anuales mecanizados, en principio cereales, están ubicados fundamentalmente en la altiplanicie de los llanos centrales y occidentales de Venezuela; en donde se intensifica el uso de prácticas costosas e insumos para recuperar la productividad o se incorporan nuevas áreas a la producción agrícola con suelos de mayor susceptibilidad a la degradación (Pla, 1988; 1993). Una proporción importante de estas extensiones están sometidas a uso continuo con prácticas de manejo inadecuadas, conduciendo a una degradación progresiva de los suelos, lo cual se refleja en un descenso del rendimiento e incremento en las cantidades de insumos agrícolas utilizados (Rodríguez, 1997).

Grandes cantidades de nutrimentos se pierden de los agrosistemas por la extracción que realizan las cosechas o como resultado de los procesos de lixiviación y de erosión (Labrador, 1996). La incorporación de los residuos de cosecha al suelo constituye una alternativa para reponer parte de estas pérdidas y disminuir el efecto de la erosión. Sin embargo, en general estos residuos no corresponden en cantidad ni en calidad con lo extraído.

La liberación de nutrimentos a partir de residuos orgánicos depende de sus características químicas y físicas, así como de las condiciones ambientales y las poblaciones microbianas. Cadisch *et al.* (1998) señalaron que con condiciones climáticas similares, dichas características determinan la tasa de liberación de N.

Los parámetros de calidad bioquímica de los residuos orgánicos que se han correlacionado con la mineralización de N son las relaciones C:N y lignina:N, además, de los contenidos de N, lignina y celulosa (Bending y Turner, 1999).

Las poblaciones microbianas se encargan de descomponer la materia orgánica (MO) del suelo y transforman formas complejas a compuestos simples; igualmente, mineralizan los constituyentes de los restos orgánicos y resintetizan sustancias a través de su metabolismo (aminoácidos, proteínas y aminoazúcares) que participan como unidades estructurales (Labrador, 1996). Los microorganismos producen enzimas que catalizan la transformación de compuestos específicos y, por lo tanto, juegan un papel importante en la descomposición de restos orgánicos (Dilly y Munch, 1996).

La mineralización de N orgánico se refiere a la degradación de proteínas, aminoazúcares y ácidos nucleicos a NH_4^+ . Este proceso es producto de reacciones catalizadas por enzimas específicas (Paul y Clark, 1989; Nannipieri *et al.*, 1990).

El objetivo de este trabajo fue determinar las actividades enzimáticas relacionadas con la mineralización del N y estimar la contribución de los residuos de cosecha al N del suelo con diferentes sistemas de labranza en el cultivo de maíz en los llanos centrales, Venezuela.

MATERIALES Y METODOS

En un ensayo de campo, establecido en 1997, ubicado en el municipio Urdaneta del estado Aragua (precipitación media anual 870 mm, temperatura promedio 26.9 °C), en un suelo vertisol, clasificado como Typic Haplusterts, donde se están evaluando tres sistemas de labranza: siembra directa (SD), siembra directa previo un pase de cincel (CSD) y labranza convencional (LC), se incorporaron residuos de cosecha (1998), de maíz marcados con ^{15}N y posteriormente se realizaron muestreos de suelo, cada 5 cm hasta 20 cm de profundidad, a 35, 105, 135 y 265 días después de la aplicación del residuo.

Obtención y Aplicación de Residuos Marcados

Dentro de las parcelas establecidas, en cada sistema de labranza se demarcaron dos sub-parcelas de 5.4 m²; en una sub-parcela se aplicaron 150 kg ha⁻¹ de N, como urea 10% átomos en exceso (at. exc.) ^{15}N (parcela A) y a la otra urea normal (parcela B), al final del ciclo de cultivo, los residuos de cosecha marcados de la parcela A se aplicaron en la parcela sin marcar B. En el Cuadro 1 se presentan las cantidades de residuos de cosecha y maleza aplicadas en cada caso.

Caracterización de los Residuos de Cosecha

Los residuos de cosecha se analizaron utilizando el método de fibra de detergente ácido para lignina y celulosa (Van Soest y Wine, 1968).

Previo a la incorporación de los residuos, se determinaron las condiciones iniciales del suelo, para eso se realizaron análisis de N-total por el método de Kjeldahl y C-orgánico por digestión con dicromato (Nelson y Sommers, 1982).

Cuadro 1. Cantidad de residuo y nitrógeno aplicado.

Labranza	Residuo aplicado	at.exc. ^{15}N	N aplicado
	kg ha $^{-1}$	%	kg ha $^{-1}$
SD	4646	3.050	88.2
CSD	4604	2.914	89.8
LC	4315	3.124	85.6

Determinación de N Mineral y ^{15}N

El N mineral de los residuos se determinó antes y a 265 días después de la incorporación (ddi); las concentraciones de NO_3^- y NH_4^+ se determinaron colorimétricamente por inyección de flujo continuo (Bremner, 1965).

El ^{15}N se analizó a 35, 105, 135 y 265 ddi; por espectrometría de emisión óptica (OIEA, 1987).

Recuperación de ^{15}N -Residuo por el Cultivo Indicador

En el ciclo de siembra de 1999, se sembró maíz (Cargill 580) con una densidad de 6.6 plantas m $^{-2}$, cada parcela contenía cuatro hilos de siembra. A madurez fisiológica se muestrearon los dos hilos centrales, separando grano y resto vegetal; posteriormente se secaron a 70 °C para obtener peso constante. Sub-muestras se molieron a < 0.1 mm para determinar N-total por Kjeldahl y ^{15}N por espectrometría de emisión óptica (OIEA, 1987).

Actividades Enzimáticas

Se determinó la actividad de la proteasa y ureasa a 35, 105 y 135 ddi de los residuos.

Para la proteasa se tomaron 2 mL de amortiguador de fosfato (pH 7) y 0.5 mL de N- α benzoil L-argininamide (proteasa BAA) 0.03 M como sustrato, se añadieron a 0.5 g de suelo; la mezcla se incubó a 37 °C durante 90 min y se diluyó a 10 mL con agua destilada. La liberación de amonio después de la adición de 0.1 mL de NaOH 10 M se midió usando un electrodo selectivo de amonio (ORION 95-12) (Nannipieri *et al.*, 1980).

La ureasa se determinó igual que la proteasa con la diferencia del sustrato, en este caso se utilizó urea a 6.4 % (Nannipieri *et al.*, 1980).

Cálculos

La contribución del residuo al N del suelo y planta se calculó mediante estimación directa utilizando las siguientes ecuaciones (OIEA, 1990; Hood *et al.*, 2000):

Porcentaje de nitrógeno derivado del residuo:

$$\text{Nddr (\%)} = \frac{\text{at.exc. \% } ^{15}\text{N en suelo ó planta}}{\text{at.exc. \% } ^{15}\text{N residuo marcado}} \times 100$$

Cantidad de nitrógeno derivado desde el residuo:

$$\text{Nddr (kg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\% \text{ Nddr}}{100} \times \text{N total (kg ha}^{-1}\text{)}$$

Porcentaje de nitrógeno recuperado del residuo:

$$\text{N recuperado desde el residuo (\%)} = \frac{\text{Nddr (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{N aplicado como residuo (kg ha}^{-1}\text{)}} \times 100$$

El diseño estadístico utilizado fue bloques al azar con tres repeticiones; la prueba utilizada para la comparación múltiple de medias fue la mínima diferencia significativa ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSION

Las condiciones del suelo en el momento de incorporar los residuos mostraron diferencias estadísticas para C-orgánico. La macroporosidad resultó mayor en CSD con respecto a LC y SD. En relación con N-total, C:N y humedad no se evidenciaron diferencias estadísticas. Sin embargo, SD presentó el contenido mayor de N-total, LC menor relación C:N y CSD mayor contenido de humedad (Cuadro 2).

El contenido de N de los residuos de cosecha incorporados varió en los sistemas de labranza evaluados, en LC fue donde ocurrió la mayor concentración de N (1.41%), lo cual trae como consecuencia que las relaciones lignina:N y C:N, sean menores para LC en comparación con SD y CSD (Cuadro 3). Esto indica que desde el punto de vista de calidad, el residuo incorporado en LC podría ser más fácilmente descompuesto, tomando en cuenta que la relación lignina:N es uno de los factores predominantes que determinan la descomposición y liberación de nutrientes del residuo de cosecha (Kachaka *et al.*, 1993).

La actividad enzimática presentó variaciones con los sistemas de labranza y la profundidad. La ureasa y

Cuadro 2. Condiciones iniciales del suelo en el momento de aplicar el residuo.

Labranza	C-orgánico	N Total	C:N	Humedad	Macroporosidad
	----- % -----			----- % -----	
SD	1.91±0.04 a	0.16±0.02 a	12.31±1.60 a	20.44±1.77 a	6.27±2.64 b
CSD	1.79±0.08 ab	0.15±0.02 a	11.77±1.28 a	23.38±1.07 a	14.96±4.59 a
LC	1.66±0.13 b	0.15±0.02 a	10.87±0.36 a	20.89±0.38 a	10.72±1.08 ab

Medias ± desviaciones estándar.

Medias seguidas de la misma letra en las columnas no son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$).**Cuadro 3. Caracterización del residuo de maíz incorporado.**

Labranza	Proteína	Lignina	Carbono	Nitrógeno	Lignina:N	C:N
	----- % -----					
SD	5.64±0.76 a	9.96±1.60 a	34.69±3.26 a	1.01±0.22 b	9.69±0.51 a	34.89±3.83 a
CSD	6.78±0.97 a	9.42±0.50 a	34.59±3.70 a	1.14±0.16 b	8.36±0.79 b	30.71±4.04 a
LC	5.97±0.51 a	9.61±0.22 a	35.93±2.88 a	1.41±0.14 a	6.87±0.79 c	25.73±4.18 a

Medias ± desviaciones estándar.

Medias seguidas de la misma letra en las columnas no son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

proteasa en magnitud evidenciaron una mayor actividad en el estrato superficial (0 a 10 cm) en comparación con el estrato sub-superficial (10 a 20 cm). Esto sugiere que la actividad de estas enzimas se concentra en la superficie del suelo. En el estrato superficial, la ureasa no presentó diferencias estadísticas entre los sistemas de labranza, contrario a lo que ocurrió con la proteasa donde LC y SD presentaron mayor actividad con relación a CSD, y en el estrato sub-superficial LC presentó mayor actividad y fue estadísticamente diferente a CSD y SD (Cuadro 4). Kandler *et al.* (1999) presentaron resultados similares, encontraron mayor cantidad de N mineralizado y aumento de la actividad enzimática (proteasa), en labranza convencional con respecto a labranza reducida y mínima, después de 10 cm de profundidad y plantearon que la labranza modifica la distribución de MO en el perfil del suelo y que, por lo tanto, LC presenta una mejor distribución de los residuos orgánicos que la reducida o mínima.

La actividad de las enzimas determinadas después de la aplicación de los residuos de cosecha en los primeros 20 cm, se presenta en la Figura 1. La proteasa aumentó al inicio y después disminuyó, mientras que la ureasa se mantuvo en incremento a través del tiempo. En términos generales, la actividad de ureasa fue mayor que la de proteasa, lo cual es de esperarse si tomamos en cuenta que sustratos, tipo urea, son productos intermedios en la degradación de otros compuestos nitrogenados como, por ejemplo, las amidas y los ácidos nucleicos (Nannipieri *et al.*, 1990) y son estos sustratos los que inducen la síntesis de la ureasa.

La cantidad de N liberado a partir de los residuos de cosecha (Cuadro 5) fue para LC de 49.61 kg ha⁻¹, lo que representa 52.33 y 43.75% mayor cantidad con relación a SD y CSD, respectivamente. Asimismo, la diferencia en el contenido de N mineral a 265 días y antes de la aplicación de los residuos (Cuadro 6) fue mayor en LC en relación con SD en 50.42% y en

Cuadro 4. Actividad enzimática en diferentes sistemas de labranza.

Enzimas	Profundidad cm	Labranza		
		SD	CSD	LC
Ureasa ($\mu\text{g NH}_3 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	0-10	32.84±3.94 a	30.97±2.75 a	32.56±4.60 a
	10-20	17.46±1.38 b	20.18±4.14 ab	23.29±2.37 a
Proteasa ($\mu\text{g NH}_3 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	0-10	14.46±0.50 a	11.90±0.94 b	13.43±0.09 a
	10-20	7.41±0.92 ab	6.45±1.31 b	8.99±1.04 a

Medias ± desviaciones estándar.

Medias seguidas de la misma letra en las filas, no son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

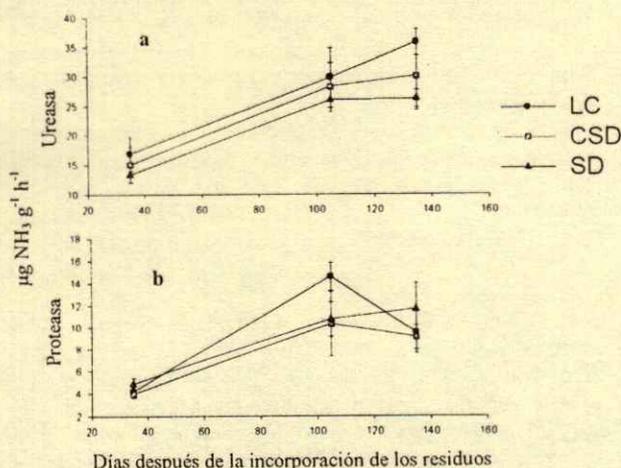


Figura 1. Actividad enzimática después de la incorporación de los residuos de cosecha. a) ureasa; b) proteasa.

41.42% para CSD. Estos resultados sugieren que el N del residuo pudiera estar contribuyendo en gran medida al N del suelo.

Al correlacionar el N derivado del residuo con algunas variables determinadas, se encontró que el N proveniente del residuo tiene una correlación negativa con la relación lignina:N de los residuos aplicados y una correlación positiva con ΔN y la actividad de la ureasa en 10 a 20 cm de profundidad (datos no presentados). Kachaka *et al.* (1993) encontraron que la relación lignina:N es un factor predominante que determina la descomposición y liberación de nutrientes del residuo de planta y sugieren que en predicciones de corto plazo, el potencial de liberación de nutrientes dependerá de factores restrictivos, como la relación lignina:N de los residuos.

La relación entre el ¹⁵N en la planta y el N en el suelo proveniente de la descomposición de los residuos marcados con ¹⁵N se presenta en la Figura 2. LC, con el más alto contenido de N del residuo en el suelo, mostró los menores valores de recuperación de ¹⁵N-residuo por la planta, mientras SD fue el

Cuadro 5. Estimación de nitrógeno derivado del residuo.

Labranza	Nddr kg ha ⁻¹	N recup. del residuo %
SD	33.56±5.79 b	38.05±6.56 b
CSD	36.21±6.85 ab	40.32±7.63 ab
LC	49.61±4.87 a	57.96±10.54 a

Medias ± desviaciones estándar.

Medias seguidas de la misma letra en las columnas no son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 6. Contenido de NO₃⁻ y NH₄⁺ en suelo, antes y a 265 días después de la incorporación de los residuos.

Labranza	N mineral		ΔN
	Inicial	265 días	
	----- kg ha ⁻¹ -----		
SD	24.53±1.57 a	48.59±13.03 a	24.06 a
CSD	23.82±1.18 a	49.41±9.84 a	25.59 a
LC	21.71±3.76 a	57.90±8.81 a	36.19 a

ΔN = diferencia del N mineral (N mineral a 265 - N mineral antes de la aplicación de los residuos).

Medias ± desviaciones estándar.

Medias seguidas de la misma letra en las columnas no son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

tratamiento con mayor valor de ¹⁵N en la planta proveniente del residuo. Estos resultados pueden ser explicados con los valores obtenidos de pérdidas de N en estos sistemas de labranza, donde en LC ocurren aparentemente las mayores pérdidas, alcanzando 61.3% en comparación a 45.8%, presentado en SD (Cabrera de Bisbal *et al.*, 2001).

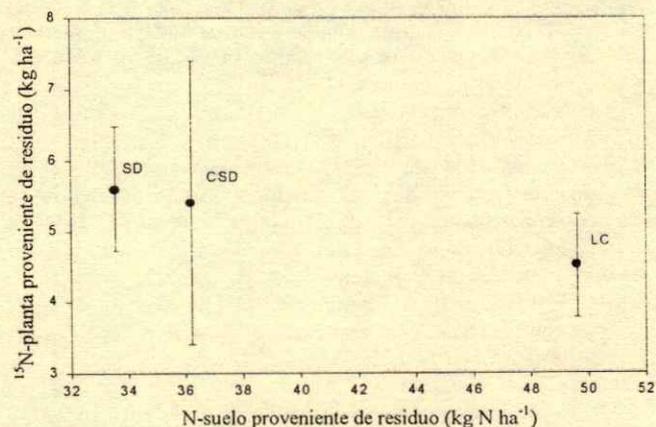


Figura 2. Relación entre el nitrógeno en la planta y el nitrógeno en el suelo proveniente de la descomposición de los residuos de cosecha marcados con ¹⁵N.

CONCLUSIONES

La aplicación de residuos de cosecha con relaciones de C:N y lignina:N bajas, en suelos con condiciones adecuadas de humedad-aireación, favorece una descomposición más acelerada de los residuos, probablemente debido a un aumento de la actividad biológica del suelo (mayor proliferación de microorganismos ureolíticos y proteolíticos), lo cual representa una mayor contribución del N proveniente de los residuos al N del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas, CONICIT (S1 9500649 y PI 98000327) y por el Organismo Internacional de Energía Atómica-ARCAL XXII.

Al Consejo Nacional de Investigaciones (CNR), Pisa, Italia, por el apoyo prestado en la realización de los análisis de las actividades enzimáticas.

LITERATURA CITADA

- Bending, G. y M. Turner. 1999. Interaction of biochemical quality and particle size of crop residues and its effect on the microbial biomass and nitrogen dynamics following incorporation into soil. *Biol. Fertil. Soils* 29: 319-327.
- Bremner, J. 1965. Inorganic forms of nitrogen. pp. 1179-1237. *In*: C. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Cabrera de Bisbal, E., M. España y B. Rodríguez. 2001. Nitrogen use and ^{15}N -fertilizer fate in maize under conservation tillage systems in a tropical semiarid region of Venezuela. *In*: 11th International nitrogen workshop. September. Reims, Francia.
- Cadisch, G., E. Handayanto, C. Malama, F. Seyni y K.E. Giller. 1998. N recovery from legume prunings and priming effects are governed by the residue quality. *Plant Soil* 205: 125-134.
- Comerma, J. y R. Paredes. 1977. Principales limitaciones y potencial agrícola de las tierras de Venezuela. Mimeografiado. CENIAP-IIAG. Maracay, Venezuela.
- Dilly, O. y J.C. Munch. 1996. Microbial biomass content, basal respiration and enzyme activities during the course of decomposition of leaf litter in a black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn) forest. *Soil Biol. Biochem.* 28: 1073-1081.
- Hood, R., R. Merckx, E. Jensen, D. Powlson, M. Matijevic y G. Hardarson. 2000. Estimating crop N uptake from organic residues using a new approach to the ^{15}N isotope dilution technique *Plant Soil* 223: 33-44.
- Kachaka, S., B. Vanlauwe y R. Merckx. 1993. Decomposition and nitrogen mineralization of prunings of different quality. pp. 199-208. *In*: Mulongoy y Merckx (eds.). *Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture*. Wiley-Sayce, UK.
- Kandeler, E., D. Tscherko y H. Spiegel. 1999. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a chernozem under different tillage management. *Biol. Fertil. Soils* 28: 343-351.
- Labrador, J. 1996. La materia orgánica en los agrosistemas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa. Madrid.
- Nannipieri, P., B. Ceccanti, S. Cervelli y E. Matarese. 1980. Extraction of phosphatase, urease, protease, organic carbon and nitrogen from soil. *Agron. J.* 44: 1011-1016.
- Nannipieri, P., G. Stefano y B. Ceccanti. 1990. Ecological significance of the biological activity soil. pp. 293-355. *In*: J.-M. Bollag y G. Stotzky (eds.). *Soil biochemistry* V.6. Marcel Dekker. New York.
- Nelson, D.W. y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 539-579. *In*: A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis*, Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- OIEA. Organismo Internacional de Energía Atómica. 1987. Manual de laboratorio. Métodos para análisis de ^{15}N FAO/OIEA: Curso interregional de entrenamiento sobre el uso de ^{15}N en ciencias de suelos, nutrición vegetal y biotecnología agrícola. Academia de Ciencias de la RDA. Leipzig, RDA.
- OIEA. Organismo Internacional de Energía Atómica. 1990. Use of techniques in studies of soil-plant relationships. Training courses serie 2. IAEA, Vienna, Austria.
- Paul, E.A. y F.E. Clark. 1989. *Soil microbiology and biochemistry*. Academic Press. London.
- Pla, I. 1988. Desarrollo de índices y modelos para el diagnóstico y prevención de la degradación de suelos agrícolas en Venezuela. Premio Agropecuario Banco Consolidado.
- Pla, I. 1993. Evaluación y diagnóstico de propiedades físicas del suelo en relación a la labranza. pp. 42-51. *In*: Memorias de la II Reunión Bienal de la Red Latinoamericana de Labranza Conservacionista. Guanare-Acarigua.
- Rodríguez, B. 1997. Sustentabilidad del sistema de producción de maíz con diferentes prácticas de labranza, sistemas de cultivos y manejo de residuos. Mimeografiado CENIAP-IIIRA. Maracay, Venezuela.
- Sákala, W., G. Cadisch y K. Giller. 2000. Interactions between residues of maize and pigeon pea and mineral N fertilizers during decomposition and N mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 32: 679-688.
- Van Soest, P.J. y R.H. Wine. 1968. Determination of lignina and cellulose in acid-detergent fibre with permanganate. *J. Assoc. Off. Agric. Chem.* 51: 780-785.

RESEÑA DE LIBROS

Presentación

En la Revista Terra, se pretende dar a conocer la obra literaria que generan los edafólogos latinoamericanos, para que sea promovida y consultada por nuestros lectores.

Los libros que incluyen temas de la ciencia del suelo y editados en español, además de ser escasos, son muy poco difundidos, situación que limita que se conviertan en libros de consulta y de texto para estudiantes, técnicos e investigadores. Por tal motivo, ahora en Reseña de Libros publicaremos comentarios a libros que sean expresados tanto por autores, como lectores y colegas, para que contribuyan a su divulgación y motiven su lectura.

Esperamos lograr el cometido y que, en cada número de Terra, aparezca la sección de Reseña de Libros.

Los comentarios que ahora se incluyen corresponden al libro:

Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (Tepetates). 1998. Editores: Hermilio Navarro Garza, Henri Poupon, Ma. Antonia Pérez Olvera. Colegio de Postgraduados, Montecillo, estado de México y ORSTOM. ISBN 968-839-249-9.

El libro es una excelente colección de trabajos acerca de los suelos endurecidos de cenizas volcánicas. Los artículos presentados son actuales y de importancia para resolver la problemática de estos suelos.

Las cenizas volcánicas se encuentran a lo largo de todo el eje Neovolcánico en la República Mexicana, los suelos derivados de este material tienen una problemática semejante, por lo que se hace necesario encontrar soluciones. La investigación sobre suelos derivados de ceniza volcánica comenzó hacia finales de los años setentas con trabajos de descripción de problemas, años después se avanzó hacia la solución de ellos. El presente libro describe opciones de uso, manejo así como el replanteamiento del acercamiento a la problemática. Los trabajos son resultado de la investigación básica y aplicada sobre suelos derivados de cenizas volcánicas.

Es un libro obligado para el investigador interesado en los suelos de ceniza volcánica.

No se podría haber hecho mejor homenaje al **Dr. Claude Zebrowski** como el que significa esta publicación.

Luis Velázquez Ramírez

Es una compilación de trabajos de investigación sobre los TEPETATES, término que se da en Mesoamérica a los materiales endurecidos que subyacen al suelo productivo y que aparecen cuando el suelo se ha perdido por causa de la erosión, ocasionada principalmente por el mal uso y manejo que se le dio. Estos materiales en su mayoría son de origen volcánico, sin embargo, sus composiciones y características son variables, y adquieren importancia

agronómica cuando el hombre en su afán de hacerlos productivos se enfrenta a grandes retos físicos, químicos, microbiológicos y económicos para lograrlo.

El libro en sus siete capítulos presenta y cubre la mayor parte de la temática sobre los Tepetates: la problemática, su génesis, su fertilidad, su erodabilidad, sus características y propiedades físicas, químicas y biológicas, y sus potencialidades.

Es un trabajo que aporta los frutos de la investigación y el conocimiento de sus autores desde los 60's hasta el fin de los 90's, resumiendo así 40 años de experiencia en el tema.

En sí, el lector que se adentre en sus páginas tendrá un panorama muy completo de los suelos y de las tobas endurecidas llamadas tepetates.

Juan Estrada Berg Wolf

Es un libro de muy buen contenido científico y técnico en lo referente a tepetates. Actualiza y profundiza a buen nivel la problemática física, química y social de los tepetates.

Creo conveniente que se investigue a profundidad sobre el aspecto biológico de estos duripanes, pues si bien se menciona dentro del texto del libro, no hay ningún trabajo al respecto.

Asimismo, es muy conveniente que para cada método de rehabilitación de los tepetates se presente un análisis de costos, ya que de esta forma se orienta mejor al campesino para que seleccione la obra más acorde con sus posibilidades económicas.

M.C. Jaime A. Rey Contreras

En el marco del proyecto de colaboración con la unión Europea se establece el interés de Europa por establecer un vínculo con México en materia de cooperación tecnológica y científica. Lo cual se ha cristalizado en proyectos como es el de **Recuperación de los Suelos Volcánicos Endurecidos**, en este el Instituto ORSTOM, se ha erigido como el líder científico y de promoción financiera.

En la **Introducción**, se establece que la extensión en superficie de este tipo de suelos es lo que motiva al estudio y proyectos a escala Latinoamérica y México. Asimismo, se plantea; una interrelación con el desarrollo rural regional, una descripción por apartados en los cuales no es muy claro los campos de acción de la investigación planteada en esta forma de apartados.

En **orientación y problemática científica para la regeneración y conservación de suelos volcánicos endurecidos y estériles**, son señalados los alcances y objetivos del proyecto de investigación en cooperación. Se hace referencia a procedimientos, técnicas, metodologías, sistematización de información y ciertos resultados obtenidos en los mismos. Se muestra un marco de referencia general para posteriores investigaciones.

En la **fertilidad de los tepetates del eje neovolcánico en los Estados de México y Tlaxcala**, se parte de una definición o delimitación confusa de los "tepetates", lo cual es importante para estudios de fertilidad. Un tepetate en condiciones naturales es un suelo somero con limitación hacia la profundidad de material ígneo consolidado o cementado; sin embargo en el documento se tiene la impresión de que se degradan principalmente por acción antropogénica. Asimismo, es necesario resaltar que el muestreo se lleva a efecto en el substrato endurecido, es decir, en los suelos someros "tepetates", para los fines de determinar su grado de fertilidad. Por lo que corresponde a su caracterización química y de fertilidad, es correctamente conducida. Cabe señalar que no se profundiza en la medición o estimación de la actividad microbiológica dentro de este tipo de suelos.

En **potencialidades agronómicas**. En características de estos suelos volcánicos endurecidos, se maneja que una vez que se roturan se obtienen agregados grandes, siendo esto confuso porque la estructura es masiva o no hay estructura, es más correcto referir que se obtienen fragmentos grandes. También aquí se señala que los rasgos heredados y edafológicos de los tepetates son la causa de la esterilidad de los materiales; con baja porosidad y baja conductividad hidráulica.

En **modelos matemáticos de erosión hídrica para la optimización de la rehabilitación de tepetates con fines agrícolas**, se realiza un manejo adecuado de conceptos describiendo la importancia y ocurrencia del proceso erosivo de los "tepetates".

Se establece que la mayor afectación de la erosión sobre la productividad de los "tepetates" es probablemente la pérdida en la capacidad de retención de agua disponible para la planta; la producción de sedimentos responde a la cantidad de escurrimiento y energía cinética total de la lluvia, asimismo se plantea que la roturación, remoción de agregados y razamiento con maquinaria pesada es el único medio para hacerlos productivos.

En el capítulo **erosión de una toba volcánica endurecida en proceso de rehabilitación**, se ubica correctamente el material del suelo bajo estudio y los objetivos generales del mismo, relacionados a estudiar el proceso erosivo en "tepetates" roturados; en la metodología se señalan ocho tratamientos y las dimensiones de las terrazas, se describe como fueron obtenidos los escurrimientos y sedimentos además de que determinaciones físicas, químicas y biológicas les realizaron.

Sobre el apartado de **elementos metodológicos y estudios socioeconómicos en suelos volcánicos endurecidos**, se plantea analizar la utilización de los "tepetates" incluyendo los aspectos socioeconómicos para que de esta forma la degradación pueda ser explicada holísticamente. Una propuesta metodológica es de naturaleza social, e implica analizar las relaciones que se dan entre el grupo social de los campesinos con el resto de la sociedad estructural, para explicar el impacto de ésta en el aprovechamiento de los recursos naturales.

Honorio Espinoza Espinoza



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

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos;
km 38.5 Carr. México -Texcoco; Tel:01 595 95 460 24; Fax01 595 95 480 76
(correo ordinario: Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Méx.)

FORMA DE SUSCRIPCION A LA REVISTA TERRA

La revista Terra es publicada trimestralmente. Todas las suscripciones son anuales e incluyen un volumen con cuatro números. El costo de la suscripción es de \$ 500.00 en el país y \$ 60.00 Dls. en el extranjero (incluye costos de envío en ambos casos).

Enviar suscripción a:

Nombre: _____

Empresa: _____

Dirección: _____

Colonia: _____

Código Postal: _____

Ciudad: _____

Estado: _____

País: _____

e-mail: _____

Teléfono: _____

Fax: _____

Usted podrá depositar el monto de la suscripción en una cuenta bancaria que describimos en la parte inferior de esta forma.

**HOY ES EL MEJOR MOMENTO PARA COLABORAR CON LA REVISTA TERRA, INSCRIBETE Y
RECIBIRAS LOS CUATRO NUMEROS DEL VOLUMEN 20.**

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
Cuenta 1837448-8
Bancomer Número de Plaza 001
Sucursal 24, Texcoco, Estado de México.