

# TERRA

## Latinoamericana



Órgano Oficial de Divulgación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Abril • Junio de 2016 • Volumen 34 • Número 2 ISSN 2395 - 8030

# TERRA LATINOAMERICANA

ABRIL - JUNIO DE 2016 · VOLUMEN 34 · NÚMERO 2

<http://www.terralatinoamericana.org.mx>

<http://www.chapingo.mx/terra/>

**Terra Latinoamericana** es una publicación trimestral de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. y tiene como finalidad difundir la investigación edafológica generada en el ámbito latinoamericano.

**Terra Latinoamericana** está incluida en la Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal (REDALyC).

**Terra Latinoamericana** está indizada en AGRIS (FAO), AGRICOLA (USDA), CAB ABSTRACTS y PERIODICA.

# TERRA LATINOAMERICANA

## COMITÉ EDITORIAL

<b>EDITORA</b>	<b>Dra. Mariela Hada Fuentes Ponce</b> Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco
<b>COEDITOR</b>	<b>Dr. David Espinosa Victoria</b> Colegio de Postgraduados Campus Montecillo
<b>EDITORES ADJUNTOS</b>	<b>Dr. Jorge D. Etchevers Barra</b> Colegio de Postgraduados <b>Dr. Manuel Sandoval Villa</b> Colegio de Postgraduados <b>Dra. Claudia Hidalgo Moreno</b> Colegio de Postgraduados <b>Dr. Fernando De León González</b> Universidad Autónoma Metropolitana <b>Dra. Norma E. García Calderón</b> Universidad Nacional Autónoma de México <b>Dr. David Cristóbal Acevedo</b> Universidad Autónoma Chapingo <b>Dra. Elizabeth Hernández Acosta</b> Universidad Autónoma Chapingo
<b>EDITORA DE ESTILO EN INGLÉS</b>	<b>Diane Fumiko Miyoshi Udo</b>
<b>EDITORA DE FORMATO</b>	<b>Rosa María López Atilano</b>

---

### EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Eva Geraldina Vázquez Martínez

### WEBMASTER

Lic. Cristopher Escalera de la Rosa

### Fotografía Portada

M.C. Cristián Reyna (Mexcaltepec, Guerrero)

---

### EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

**Dr. Antonio Turrent Fernández**  
**Dr. Carlos Ortiz Solorio**  
**Dr. Enrique Palacios Vélez**  
**Dr. Gabriel Alcántar González**  
**Dr. Javier Z. Castellanos Ramos**  
**Dr. Juan José Peña Cabriales**  
**Dr. Manuel Anaya Garduño**  
**Dr. Oscar L. Palacios Vélez**  
**Dr. Ronald Ferrera Cerrato**

---

### EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

<b>Dr. Alberto Hernández</b>	<b>Cuba</b>
<b>Dr. Bernardo Van Raij</b>	<b>Brasil</b>
<b>Dr. Christian Prat</b>	<b>Francia</b>
<b>Dr. Daniel Buschiazzo E.</b>	<b>Argentina</b>
<b>Dr. Donald L. Suarez</b>	<b>EE. UU.</b>
<b>Dr. Eric S. Jensen</b>	<b>Dinamarca</b>
<b>Dr. Fernando Santibañez Q.</b>	<b>Chile</b>
<b>Dra. Floria Bertsch Hernández</b>	<b>Costa Rica</b>
<b>Dr. Hari Eswaran</b>	<b>EE. UU.</b>
<b>Dr. Héctor J. M. Morrás</b>	<b>Argentina</b>
<b>Dr. Jorge A. Delgado</b>	<b>EE. UU.</b>
<b>Dr. José Aguilar Ruiz</b>	<b>España</b>
<b>Dr. José M. Hernández Moreno</b>	<b>España</b>
<b>Dr. Juan F. Gallardo Lancho</b>	<b>España</b>
<b>Dr. Karl Stahr</b>	<b>Alemania</b>
<b>Dr. Narciso Pastor Saez</b>	<b>España</b>
<b>Dr. Rafael Villegas Delgado</b>	<b>Cuba</b>
<b>Dr. Renato Grez Z.</b>	<b>Chile</b>
<b>Dr. Walter Luzio Leighton</b>	<b>Chile</b>
<b>Dr. Winfried E. H. Blum</b>	<b>Austria</b>

# TERRA LATINOAMERICANA

## EDITORIAL COMMITTEE

<b>EDITOR</b>	<b>Dra. Mariela Hada Fuentes Ponce</b> Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco
<b>COEDITOR</b>	<b>Dr. David Espinosa Victoria</b> Colegio de Postgraduados Campus Montecillo
<b>ASSOCIATE EDITORS</b>	<b>Dr. Jorge D. Etchevers Barra</b> Colegio de Postgraduados <b>Dr. Manuel Sandoval Villa</b> Colegio de Postgraduados <b>Dra. Claudia Hidalgo Moreno</b> Colegio de Postgraduados <b>Dr. Fernando De León González</b> Universidad Autónoma Metropolitana <b>Dra. Norma E. García Calderón</b> Universidad Nacional Autónoma de México <b>Dr. David Cristóbal Acevedo</b> Universidad Autónoma Chapingo <b>Dra. Elizabeth Hernández Acosta</b> Universidad Autónoma Chapingo

<b>ENGLISH EDITOR</b>	<b>Diane Fumiko Miyoshi Udo</b>
<b>FORMAT EDITOR</b>	<b>Rosa María López Atilano</b>

---

<b>EDITORIAL STAFF</b>	<b>Eva Geraldina Vázquez Martínez</b>
<b>WEBMASTER</b>	<b>Lic. Christopher Escalera de la Rosa</b>
<b>Cover Photograph</b>	<b>M.C. Cristián Reyna (Mexcaltepec, Guerrero)</b>

## NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

**Dr. Antonio Turrent Fernández**  
**Dr. Carlos Ortiz Solorio**  
**Dr. Enrique Palacios Vélez**  
**Dr. Gabriel Alcántar González**  
**Dr. Javier Z. Castellanos Ramos**  
**Dr. Juan José Peña Cabriales**  
**Dr. Manuel Anaya Garduño**  
**Dr. Oscar L. Palacios Vélez**  
**Dr. Ronald Ferrera Cerrato**

## INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

<b>Dr. Alberto Hernández</b>	<b>Cuba</b>
<b>Dr. Bernardo Van Raij</b>	<b>Brasil</b>
<b>Dr. Christian Prat</b>	<b>Francia</b>
<b>Dr. Daniel Buschiazzo E.</b>	<b>Argentina</b>
<b>Dr. Donald L. Suarez</b>	<b>USA</b>
<b>Dr. Eric S. Jensen</b>	<b>Dinamarca</b>
<b>Dr. Fernando Santibañez Quezada</b>	<b>Chile</b>
<b>Dra. Floria Bertsch Hernández</b>	<b>Costa Rica</b>
<b>Dr. Hari Eswaran</b>	<b>USA</b>
<b>Dr. Héctor J. M. Morrás</b>	<b>Argentina</b>
<b>Dr. Jorge A. Delgado</b>	<b>USA</b>
<b>Dr. José Aguilar Ruiz</b>	<b>España</b>
<b>Dr. José M. Hernández Moreno</b>	<b>España</b>
<b>Dr. Juan F. Gallardo Lancho</b>	<b>España</b>
<b>Dr. Karl Stahr</b>	<b>Alemania</b>
<b>Dr. Narciso Pastor Saez</b>	<b>España</b>
<b>Dr. Rafael Villegas Delgado</b>	<b>Cuba</b>
<b>Dr. Renato Grez Z.</b>	<b>Chile</b>
<b>Dr. Walter Luzio Leighton</b>	<b>Chile</b>
<b>Dr. Winfried E. H. Blum</b>	<b>Austria</b>

# TERRA LATINOAMERICANA

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

## **MESA DIRECTIVA 2016-2018**

Presidente	<b>Dr. Enrique Troyo Diéguez</b>
Vicepresidente	<b>Dr. Juan Pedro Flores Margez</b>
Secretario General	<b>Dr. Félix Alfredo Beltrán Morales</b>
Tesorera	<b>Dra. Norma Eugenia García Calderón</b>
Secretario de Relaciones Públicas	<b>Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez</b>
Secretario Técnico	<b>Dr. Juan Manuel Cortés Jiménez</b>
Secretario de Eventos Nacionales e Internacionales	<b>M.C. Baltazar Corral Díaz</b>
Coordinador de Comité de Apoyo	<b>Dra. Catarina Loredo Osti</b>
Primer Vocal	<b>Dr. Armando Guerrero Peña</b>
Segundo Vocal	<b>Dra. Claudia Isabel Hidalgo Moreno</b>

## **TERRA LATINOAMERICANA**

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.  
Abril - Junio de 2016 · Volumen 34 · Número 2  
**ISSN ELECTRÓNICO 2395-8030**

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 versión electrónica conforme a las Normas para Publicación en la Revista TERRA LATINOAMERICANA a:

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

**Oficina:** Edificio del Departamento de Suelos  
Universidad Autónoma Chapingo  
56230 Chapingo, estado de México.

**Teléfono y fax:** 01(595) 95 2 17 21  
**e-mail:** terralatinamericana@gmail.com

# TERRA LATINOAMERICANA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

## BOARD

President	<b>Dr. Enrique Troyo Diéguez</b>
Vicepresident	<b>Dr. Juan Pedro Flores Margez</b>
Secretary	<b>Dr. Félix Alfredo Beltrán Morales</b>
Treasurer	<b>Dra. Norma Eugenia García Calderón</b>
Public Relations	<b>Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez</b>
Technical Adviser	<b>Dr. Juan Manuel Cortés Jiménez</b>
National and International Events	<b>M.C. Baltazar Corral Díaz</b>
Coordinator Support Committee	<b>Dra. Catarina Loredo Osti</b>
Voters	<b>Dr. Armando Guerrero Peña</b> <b>Dra. Claudia Isabel Hidalgo Moreno</b>

## TERRA LATINOAMERICANA

Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science

April - June, 2016 · Volume 34 · Number 2

**ISSN 2395-8030 (Online)**

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 electronic version must be sent to:

Editor de la Revista TERRA LATINOAMERICANA, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, estado de México, México.

**Office address:** Soils Department building  
Universidad Autónoma Chapingo  
56230 Chapingo, estado de México.

**Telephone - fax:** +52 (595) 952 17 21

**e-mail:** terralatinamericana@gmail.com

# TERRA

# LATINOAMERICANA

ABRIL - JUNIO DE 2016 • VOLUMEN 34 • NÚMERO 2  
APRIL - JUNE, 2016 • VOLUME 34 • NUMBER 2

- 169** Componentes de produção e produtividade da cultura da soja submetida à inoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*.  
Components of production and yield of soybean inoculated with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum*.  
*Lucas Guilherme Bulegon, Leandro Rampim, Jeferson Klein, Débora Kestring, Vandeir Francisco Guimarães, Andre Gustavo Battistus, e Adriano Mitio Inagaki*
- 177** Inoculación bacteriana en el crecimiento y calidad del fruto de cinco variedades de fresa en suelos con pH contrastante.  
Bacterial inoculation of five strawberry varieties in contrasting soil pH: Effect on growth and fruit quality.  
*José Alberto Ortiz Texon, Julián Delgadillo Martínez, María de las Nieves Rodríguez Mendoza y Guillermo Calderón Zavala*
- 187** Discriminación de coberturas del suelo usando datos espectrales multi-angulares del sensor polder-1: Alcances y limitaciones.  
Discrimination of land cover classes using multi-angular spectral data with polder-1 sensor: Scopes and limitations.  
*Fernando Paz Pellat y Edgardo Medrano Ruedaflores*
- 201** Captación de amonio en zeolita al incubar gallinaza y residuos de codorniz.  
Ammonium uptake in zeolite during incubation of quail poultry manure.  
*Sarai Guadalupe Valerio Luna, Roberto Quintero Lizaola, Gustavo Adolfo de Jesús Baca Castillo y Anibal Griceldo Quispe Limaylla*
- 207** Cambio climático, ensalitramiento de suelos y producción agrícola en áreas de riego.  
Climate change, soil salinity and crop production in irrigation areas.  
*Leonardo Pulido Madrigal*

# TERRA

## LATINOAMERICANA

**219** Cloruro/aniones y sodio/cationes en soluciones nutritivas y composición mineral de cultivares de tomate.

Chloride/anions and sodium/cations ratios in the nutrient solution and mineral composition of tomato cultivars.

*Saúl Parra Terraza*

**229** Efecto del ozono sobre la población microbiana del suelo y el crecimiento de plantas de fresa.

Effect of ozone on soil microbial populations and growth of strawberry plants.

*Carlos Manuel Bucio Villalobos, Fidel René Díaz Serrano, Oscar Alejandro Martínez Jaime y Juan José Torres Morales*

### **Ensayo / Essay**

**239** Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México?.

Land degradation neutrality, a global aspiration. Is it possible to achieve in Mexico?.

*Armando López Santos*

Revisores de este número  
Reviewers of this number

**251**



# COMPONENTES DE PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA SUBMETIDA À INOCULAÇÃO DE *Bradyrhizobium* E *Azospirillum* Components of Production and Yield of Soybean Inoculated with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum*

Lucas Guilherme Bulegon<sup>1,‡</sup>, Leandro Rampim<sup>1</sup>, Jeferson Klein<sup>2</sup>, Débora Kestring<sup>1</sup>,  
Vandeir Francisco Guimarães<sup>1</sup>, Andre Gustavo Battistus<sup>1</sup>, e Adriano Mitio Inagaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Ciências Agrárias, Universidades Estadual do Oeste do Paraná-Unioeste. Rua Pernambuco 1777. CEP 85.960-000, Marechal Cândido Rondon, Paraná, Brasil.

<sup>‡</sup> Autor responsável (lucas\_bulegon@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná-PUCPR Avenida da União. 500 CEP 85.902-532 Toledo, Paraná, Brasil.

## RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar os componentes de produção e produtividade de dois genótipos de soja cultivados em casa de vegetação e submetidos à inoculação com bactérias diazotróficas do gênero *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*. Adotou-se delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições, em esquema fatorial 2×4; no fator 1 foram testados: dois genótipos de soja (BMX Turbo e Coodetec 250) e no fator 2 foram avaliadas quatro combinações de inoculação (sementes não inoculadas mas que receberam 200 kg ha<sup>-1</sup> de N na semeadura; sementes inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*; sementes inoculadas com *Azospirillum brasilense*; sementes com inoculação de *B. japonicum* e *A. brasilense*). No estágio R<sub>8</sub> foi avaliado as variáveis biométricas: diâmetro de coleto (DC); altura de planta (ALP); número de vagens (NVS); número de grãos por vagem (NGV); massa seca de parte aérea (MPA); massa seca de vagens (MSV); produtividade por planta (PPP); teor de N na parte aérea (TNA) e teor de N nos grãos (TNG). Foi observado resposta diferenciada dos genótipos de soja BMX Turbo e Coodetec 250 à inoculação de sementes com bactérias diazotróficas do gênero *B. japonicum* ou *A. brasilense* na altura de plantas e nitrogênio na parte aérea. A inoculação conjunta de *B. japonicum* e *A. brasilense* em sementes intensifica o desempenho produtivo da cultura da soja no genótipo BMX Turbo.

**Palavras chaves:** Glycine max; adubação nitrogenada; bactérias promotoras de crescimento; fixação biológica de nitrogênio.

## SUMMARY

This study aimed to evaluate the productivity and yield components of two soybean genotypes grown in a greenhouse and inoculated with diazotrophic bacteria of the genera *Bradyrhizobium* and *Azospirillum*. We adopted a complete randomized block design with four replications in a factorial 2 × 4; factor 1 was two genotypes of soybean (BMX Turbo and Coodetec 250) and factor 2 was four combinations of inoculation (seeds not inoculated but fertilized with 200 kg ha<sup>-1</sup> N at sowing, seed inoculation with *Bradyrhizobium japonicum*; seeds inoculated with *Azospirillum brasilense*; seeds inoculated with *B. japonicum* and *A. brasilense*). At stage R<sub>8</sub>, the following biometric variables were assessed: diameter collect (DIC); plant height (ALP); number of pods (NVS); number of seeds per pod (NGV); shoot dry mass (MPA); pod dry mass (MSV); yield per plant (PPP); N content in shoots (TNA) and N content in grains (TNG). Differential response of soybean genotypes BMX Turbo and Coodetec 250 and of seed inoculated with diazotrophic bacteria *B. japonicum* and *A. brasilense* in plant height and nitrogen in the shoots was observed. The combined inoculation of *B. japonicum* and *A. brasilense* seed enhanced the productive performance of soybean genotype in BMX Turbo.

**Index words:** Glycine max; nitrogen fertilization; growth promoting bacteria; biological nitrogen fixation.

### Como citar este artículo:

Bulegon, L. G., L. Rampim, J. Klein, D. Kestring, V. F. Guimarães, A. G. Battistus, e A. M. Inagaki. 2016. Componentes de produção e produtividade da cultura da soja submetida à inoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*. Terra Latinoamericana 34: 169-176.

Recibido: mayo de 2015. Aceptado: diciembre de 2015.

Publicado en Terra Latinoamericana 34: 169-176.

## INTRODUÇÃO

Com origem no extremo Oriente, a soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das oleaginosas mais cultivadas no mundo (Embrapa, 2011), sendo considerada base da alimentação de diversos povos, com expansão no Brasil a partir da década de 60 (Zancopé *et al.*, 2005).

No cenário mundial o Brasil nos últimos anos apresentou a segunda maior produção de grãos (USDA, 2015), sendo que a produtividade em 2010 atingiu 7% do produto interno bruto (PIB) brasileiro, e 30% do PIB agrícola (Embrapa, 2011).

Pode-se afirmar, que o crescimento da produção e o aumento da capacidade da soja está diretamente ligada com os avanços científicos e à disponibilização de tecnologias ao setor produtivo (Embrapa, 2011). Exemplo disso é apresentado por Hungria *et al.* (2001) como melhoramento genético associado à seleção de estirpes de bactérias fixadoras de nitrogênio (BFN). O nitrogênio (N) é responsável pelo acréscimo da produtividade e do teor de proteína das sementes da soja (Fagan *et al.*, 2007), além do papel fundamental no metabolismo vegetal, que demanda alta quantidade de N, nos processos de biossíntese de aminoácidos, clorofila, ácidos nucléicos e bases nitrogenadas (Crawford *et al.*, 2000).

Normalmente, para se alcançar elevada produtividade na cultura da soja utilizam-se fertilizantes minerais, aumentando os custos de produção e ocasionando maior impacto ambiental (Hungria *et al.*, 2005), sendo necessário entre 300 à 400 kg ha<sup>-1</sup> de N, produzido por meio do petróleo em processo com alto gasto de energia (Malavolta e Moraes, 2006). Após a descoberta do processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN) com estirpes responsivas associadas à seleção de cultivares susceptíveis as interações, a soja no Brasil dispensa adubação mineral (Döbereiner, 1997).

Atualmente, as bactérias diazotróficas que intensificam à produção de soja pertence ao gênero *Bradyrhizobium* (Silva *et al.*, 2011). Estes microrganismos infectam a planta formando, naturalmente, nódulos em suas raízes. Dentro estas raízes, essas bactérias possuem a capacidade de quebrar a tripla ligação do dióxido de nitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>), que não é utilizado pelas plantas, transformando-o em forma disponível (Taiz e Zieger, 2013; Malavolta e Moraes, 2006). Esse processo pode suprir toda a necessidade de N da planta, dispensando a adubação

mineral (Taiz e Zieger, 2013). No entanto, o gasto energético desprovido pelas bactérias neste processo é elevado, podendo levar a bactéria a não realizar este processo quando estiver presente o N mineral no solo, devido a redução da afinidade da leghemoglobina pelo oxigênio (Denison e Harter, 1995). Desta forma, buscam-se novas formas de melhorar a eficiência da utilização do N pela cultura da soja.

As novas pesquisas em FBN são realizadas com diferentes bactérias em diversas culturas como: milho (Novakowski *et al.*, 2011); trigo (Bécquer Granados *et al.*, 2012); cana-de-açúcar (Schultz *et al.*, 2012) ou até mesmo forrageiras para formação de pastagem (Moreira *et al.*, 2014). Porém, poucos são os trabalhos que tentam associar dois gêneros diferentes de FBN em cultivos da soja. Neste contexto, bactérias diazotróficas do gênero *Azospirillum* merecem atenção, pois além da FBN, podem produzir compostos promotores de crescimento ou estimular a produção endógena da planta desses compostos (Rodrigues *et al.*, 2012), sendo denominados associativas facultativas, pois proliferam-se na superfície das raízes, podendo penetrar no vegetal (Döbereiner e Baldani, 1982). Alguns destes compostos já foram detectados, produzidos na interação planta-microrganismo, tais como: a auxina ácido 3-indolacético (AIA) (Crozier *et al.*, 1988), citocininas (Cacciari *et al.*, 1989), ácido giberélico (Bottini *et al.*, 1989), além de outros compostos indólicos (Crozier *et al.*, 1988).

O aumento da quantidade de compostos promotores de crescimento pode auxiliar o desenvolvimento e produtividade das plantas (Vassilev *et al.*, 2006; Figueiredo *et al.*, 2010; Araujo *et al.*, 2012), pois, observou-se sistemas radiculares mais desenvolvidos em plantas de soja que receberam inoculação nas sementes com *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum brasilense* (Bárbaro *et al.*, 2009). Da mesma forma, maiores valores médios de massa seca de parte aérea foram verificados em plantas de feijão que receberam inoculação de *Azospirillum brasilense* nas sementes (Gitti *et al.*, 2012), enquanto que, a produtividade de plantas de milho (Lana *et al.*, 2012), feijão (Gitti *et al.*, 2012), e soja (Bárbaro *et al.*, 2009) foram incrementadas pela inoculação de sementes com *Azospirillum brasilense*.

Neste contexto, plantas de soja com maior nodulação apresentam valores mais elevados de compostos promotores de crescimento vegetal, pois auxinas e citocininas elevam o desempenho

dos nódulos (Anollés, 1997; Fei e Vessey, 2004). Contudo, informação de respostas de cada genótipo são escassos na literatura, necessitando estudos para cada espécie (Cassán *et al.*, 2009), principalmente nas particularidades relacionadas à promoção de crescimento pelo *Azospirillum brasilense* aliado a *Bradyrhizobium japonicum*. Ao considerar que alterações nos componentes biométricos e de produção podem ser indicativos do efeito da associação entre bactérias diazotróficas, ensaios em vaso podem acelerar a seleção de estirpes e cultivares responsivas a interação entre planta e microrganismo.

Desta forma, este trabalho teve por objetivo avaliar o desenvolvimento de dois genótipos de soja em casa de vegetação submetidos à inoculação de bactérias diazotróficas dos gêneros *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido entre outubro de 2011 à fevereiro de 2012, em casa de vegetação, na Estação de Horticultura e Cultivo Protegido “Prof. Dr. Mário César Lopes” pertencente ao Núcleo de Estações Experimentais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Marechal Cândido Rondon /PR. A estação experimental está localizada nas coordenadas geográficas 54° 22' W, 24° 46' S, com altitude média de 420 metros. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Cfa mesotérmico úmido subtropical de inverno seco, com chuvas bem distribuídas durante o ano e verões quentes. O trabalho foi avaliado apenas no estádio R8 escala de Ferh, sendo avaliado em três etapas, em planta no vaso, os componentes de produção e avaliações em laboratório.

Empregou-se delineamento experimental em blocos casualizados, aplicada a esquema fatorial  $2 \times 4$ , com quatro repetições. O primeiro fator foi composto por dois genótipos de soja [BMX Turbo e Coodetec 250 (CD250)]. A cultivar BMX Turbo apresenta porte médio, com hábito de crescimento indeterminado, e ciclo de 115 dias e a cultivar CD 250, possui porte médio, com crescimento indeterminado e ciclo de 110 dias. Já o segundo fator foi formado por nitrogênio (N) e bactérias do gênero *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum brasilense* isolados ou em associação [T1-testemunha sem inoculação e com N; T2 – inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* (Semias 5079 e 5080) sem N; T3 – inoculação com

*Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6) sem N; T4 – *Bradyrhizobium japonicum* (Semias 5079 e 5080) + *Azospirillum brasilense* (Ab-V5 + Ab-V6) sem N].

A dose de nitrogênio fornecido no T1 foi de 240 kg ha<sup>-1</sup> conforme recomendação de Hungria *et al.* (2001) para produção de 3000 kg ha<sup>-1</sup>, adicionando-se 40% da dose no momento da semeadura e o restante no estádio V<sub>2</sub> da cultura da soja.

A parcela experimental foi constituída de duas plantas cultivadas em um vaso de polietileno, cilíndricos, com 20 cm de altura e 10 cm de raio, com volume de 6 L<sup>-1</sup>, sendo utilizado como substrato 6 kg terra argilosa, proveniente de horizonte A de Latossolo Vermelho Eutroférico de textura muito argilosa (Embrapa, 2013), com as seguintes características químicas: pH (H<sub>2</sub>O): 5.00; P disponível (Mehlich<sup>-1</sup>): 11.78 mg dm<sup>-3</sup>; K (Mehlich<sup>-1</sup>): 0.26 cmolc dm<sup>-3</sup>; Ca<sup>+2</sup> (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>): 3.82 cmolc dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>+2</sup> (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>): 0.86 cmolc dm<sup>-3</sup> e Al<sup>+3</sup> (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>): 0.10 cmolc dm<sup>-3</sup>; H+Al (acetato de cálcio 0.5 mol L<sup>-1</sup>): 4.92 cmolc dm<sup>-3</sup>; saturação de bases: 4.94 cmolc dm<sup>-3</sup>; V: 50.10%, matéria orgânica: 16.40 g dm<sup>-3</sup>. O solo foi previamente peneirado para retirada de torrões e maiores impurezas.

O número total de parcelas foi 32 unidades experimentais, sendo que a correção do solo foi realizada 60 dias antes da semeadura, elevando-se a saturação de bases para 70%, segundo recomendação para a soja para o respectivo tipo de solo (Embrapa, 2011). A adubação de base foi realizada segundo a recomendação de Embrapa (2011).

As sementes de soja foram inoculadas duas horas antes da semeadura, ocorrida no dia 26 de outubro de 2011. A dose utilizada foi 60 mL do inoculante Simbiose Nod para cada 100 kg de sementes, sendo a mesma dosagem adotada para a inoculação de *Azospirillum brasilense*, utilizando o produto Graminante. A homogeneização dos tratamentos foi realizada em sacos de polietileno.

Realizou-se a semeadura acondicionando-se 10 sementes em cada vaso. Em seguida os vasos foram cobertos com feno, sendo irrigados diariamente. Após a emergência e estabelecimento da cultura foi realizado o desbaste, restando duas plantas por vaso para completar o ciclo de desenvolvimento. Foram mensuradas as seguintes variáveis: (I) biométricas, especificamente diâmetro de coleto (mm), altura de plantas (cm), massa da matéria seca de parte aérea e de vagens (g<sup>-1</sup>), conforme (Fioreze *et al.*, 2011); (II) componentes da produção, sendo número de vagens,

número de grãos por vagem e produtividade por planta ( $\text{g planta}^{-1}$ ), ambas avaliações realizadas no período de maturação plena da cultura correspondente ao estágio R<sub>8</sub> (Fehr e Caviness, 1977) e (III) amostras da parte aérea e dos grãos foram utilizadas para determinar os níveis de N, as quais foram submetidas à moagem em moinho do tipo Willey (tamanho e determinado pelo método da digestão sulfúrica e destilação em sistema semi-micro Kjeldahl (Embrapa, 2009).

A análise estatística dos resultados obtidos foi executada com auxílio do programa Sisvar (Ferreira, 2011), de modo que os dados foram submetidos à análise de variância e, no caso de efeito significativo, utilizou-se o teste Tukey a 5% de probabilidade para diferenciação das médias.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 se apresenta o diâmetro de coletor, altura de planta, massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de vagens (MS Vagens) de diferentes cultivares de soja, submetidos a inoculação com bactérias diazotróficas, em casa de vegetação. Constatou-se que houve efeito significativo da interação entre tratamento e cultivares para todas as variáveis avaliadas ( $P < 0.05$ ), com exceção de número de grãos por vagens (Tabelas 1, 2 e 3).

Para diâmetro de coletos diferentes tratamentos não apresentaram diferença entre si, apenas foi observado diferença entre as cultivares dentro do tratamento testemunha. O diâmetro de coletor é uma variável

importante, pois na região onde o trabalho foi realizado se tem grande incidência de ventos, podendo ocorrer tombamento das plantas, acarretando em perdas tanto durante o desenvolvimento da cultura, reduzindo a perda de flores e redução do enchimento de grãos devido ao maior auto sombreamento da população, quanto dificultando o processo de colheita devido ao contato do molinete com as plantas acamadas, levando a debulha precoce na plataforma, e perdas durante a alimentação da colhedora.

Quanto à altura de plantas houve efeito dos tratamentos, apenas para a cultivar Turbo, onde a testemunha apresentou menores média e os maiores valores médios nas plantas inoculadas com *A. brasilense*. Este resultado mostra que a atuação hormonal desse organismo é positiva (Crozier *et al.*, 1988; Reis Junior *et al.*, 2008). Contudo, os resultados não diferiram dos tratamentos com *B. japonicum* e associação entre as bactérias diazotróficas, o que pode ser considerado positivo, pois o resultado obtido se assemelha as tecnologias atualmente utilizadas no Brasil e no mundo. Bashan e Holguin (1997) relataram que fitormônios, principalmente o ácido indol-acético (AIA), excretados por *Azospirillum* desempenham papel essencial na promoção do crescimento de plantas em geral, principalmente ao apresentar-se superior à testemunha, a qual possui fornecimento de nitrogênio.

Na Tabela 1 também é possível observar os resultados encontrados para massa seca de parte aérea, sendo constatado resultado diferenciado entre as cultivares estudadas. Segundo Reis *et al.* (2000),

**Tabela 1. Diâmetro de Coletor, Altura de Planta, Massa Seca de Parte Aérea (MSPA) e Massa Seca de Vagens (MS Vagens) de diferentes cultivares de soja, submetidos a inoculação com diferentes bactérias diazotróficas, em casa de vegetação, no município de Marechal Cândido Rondon – PR, 2011/2012.**

Tratamentos	Diâmetro de coletor		Altura de planta		MSPA		MS vagens	
	Turbo	CD 250	Turbo	CD 250	Turbo	CD 250	Turbo	CD 250
	----- mm -----		----- cm -----		----- g -----			
Testemunha	10.399 aA	7.139 aB	46.667 bB	55.083 aA	8.407 bB	11.638 aA	7.084 aA	7.296 bA
<i>B. japonicum</i>	6.525 bA	6.973 aA	54.667 abA	54.667 aA	9.141 bA	9.083 abA	4.685 aA	6.424 bA
<i>A. brasilense</i>	6.503 bA	6.976 aA	56.167 aA	55.125 aA	9.944 abA	7.675 bA	4.364 aB	11.401 aA
<i>B. japonicum</i> + <i>A. brasilense</i>	6.998 bA	6.053 aA	54.500abA	60.500 aA	12.763 aA	7.207 bB	6.382 aA	5.667 bA
Média	7.19		54.67		9.48		6.66	
CV(%)	9.78		8.62		18.12		21.76	

Médias seguidas das mesma letras minúscula na coluna e maiúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; CV(%) = coeficiente de variação.

a ausência de resposta à inoculação das sementes com bactérias diazotróficas tem sido atribuída ao uso de linhagens inadequadas. Assim, a inoculação da cultivar Turbo com a associação de *B. japonicum* + *A. brasilense* obteve médias superiores. Reis Junior et al. (2008) atribuíram a maior massa seca de plantas as substâncias promotoras de crescimento produzidas pelas bactérias. Porém, efeito oposto foi observado na cultivar CD250, onde os tratamentos com presença de *A. brasilense* exibiu médias inferiores. O resultado apresentado pela cultivar CD250 é semelhante ao encontrado por Zilli et al. (2010a), onde a aplicação de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N produziram maior massa seca de parte aérea ao inocular com *B. japonicum*.

Para a massa seca de vagens, a cultivar Turbo apresentou média inferior no tratamento com *A. brasilense*. Entretanto, tal resultado não era esperado, uma vez que esta cultivar apresenta grãos normalmente de maior tamanho e peso (peso de mil sementes de 232 g<sup>-1</sup>, contra 149 g<sup>-1</sup> da CD 250) (Brasmax, 2012; Coodetec, 2011).

Na Tabela 2, tem-se os resultados da variável número de vagens, onde o tratamento *B. japonicum* obteve valores superiores quando inoculado na cultivar CD 250, esse fato pode estar ligado ao aporte de N e fornecimento pela simbiose, onde o mesmo é exigido em grande quantidade na manutenção e formação das vagens pela cultura da soja, visto que, normalmente nessa fase se tem redistribuição do N na planta (Ryle et al., 1979). Desta forma, plantas que apresentam condições fisiológicas e nutricionais adequadas, mantêm suas vagens; o que não ocorre em plantas que

não acumulam nutrientes suficientes, abortando vagens das partes mais deficiências de nitrogênio. Esse fato pode ser observado no acúmulo de N de parte aérea, sendo menor para o tratamento com maior número de vagens, diretamente relacionado à redistribuição do nitrogênio. Imsande e Schmidt (1998) também ressaltam que a partir do estágio de desenvolvimento de vagens ocorre decréscimo da concentração de N na fração vegetativa da planta, pois o N é remobilizado para as vagens e sementes. Para a cultivar Turbo, apenas a testemunha apresentou maior número de vagens e os demais tratamentos obtiveram médias inferiores.

O número de grãos por vagens não apresentou diferença significativa entre os tratamentos e cultivares. Tal resultado era esperado, uma vez que esta característica da soja é constante e semelhante para a maioria dos cultivares, devido ao grande melhoramento genético. Assim, como é uma característica definida durante o desenvolvimento da planta, diferentes tratamentos não proporcionam efeito.

No acúmulo de N na parte aérea das plantas, não foi identificado efeito significativo entre as cultivares como relatado na Tabela 2, sendo apenas contatado para o tratamento testemunha na cultivar Turbo, onde esse apresentou menor acúmulo de N na parte aérea, provavelmente relacionado com maior número de vagens obtido nesse tratamento, exigindo maior teor de nitrogênio. O mesmo efeito pode ser observado no acúmulo de N no grão onde a testemunha teve maior média para ambas as cultivares, porém sem diferenciar dos tratamentos com inoculação, mostrando que a fixação biológica é eficiente no suporte de N para as

**Tabela 2. Número de Vagens e de grãos por vagem, Nitrogênio de Parte Aérea e de Grãos de diferentes cultivares de soja, submetidos a inoculação com diferentes bactérias diazotróficas, em casa de vegetação, no município de Marechal Cândido Rondo – PR, 2011/2012.**

Tratamentos	Nº de vagens		Nº grãos por vagem		N parte aérea		N grãos	
	Turbo	CD 250	Turbo	CD 250	Turbo	CD 250	Turbo	CD 250
	----- g kg <sup>-1</sup> -----							
Testemunha	42.417 aA	29.396 abB	2.796 ns	2.841ns	1.453 bA	2.193 aA	66.924 aA	65.889 aA
<i>B. japonicum</i>	20.167 bB	34.333 aA	2.792	2.875	3.090 aA	3.425 aA	59.905 abB	67.355 aA
<i>A. brasilense</i>	27.540 bA	29.625 abA	2.875	2.906	3.109 aA	3.417 aA	60.739 abA	61.485 aA
<i>B. japonicum</i> + <i>A. brasilense</i>	25.833 bA	24.333 bA	2.833	2.875	3.810 aA	3.339 aA	58.036 bB	66.064 aA
Média	29.20		2.84		2.60		63.29	
CV(%)	15.55		6.21		20.56		6.85	

Médias seguidas das mesma letras minúscula na coluna e maiúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ns = não houve diferença significativa pelo teste de F ( $P < 0.05$ ); CV(%) = coeficiente de variação.

plantas. Este resultado corrobora com os encontrados por Zilli *et al.* (2010a,b). O efeito do *Azospirillum* é positivo, onde mesmo sem nodulação, supri a demanda de N da planta. Possivelmente este resultado esteja relacionado com o substrato utilizado, o qual não foi esterilizado, tendo a presença natural de *B. japonicum*, contribuindo com a FBN, sendo ponto expressivo pois a combinação em doses corretas pode maximizar a eficiência da fixação biológica.

A produção por planta se apresentam na Tabela 3. Os resultados não foram positivos por parte das bactérias do gênero *Azospirillum* no cultivar Turbo, porém na cultivar CD250 proporcionou médias superiores. Aguardava-se esta diferença entre cultivares, baseada na descrição de Reis *et al.* (2000), devendo-se buscar cultivares que sejam responsivas a associação com diazotróficos. A ausência de resposta da cultivar Turbo pode estar relacionada com o que é mencionado na literatura que mostra uma inconsistência dos resultados quando se utiliza a *A. brasilense* em soja, visto que essa se estabelece na superfície da raiz, e ocasionalmente penetra nas raízes. Assim a literatura reporta que o uso de bactérias que se estabelecem nas raízes gera resultados que podem ser muito variados, devido poder sofrer a ação de fatores externo do solo como outras bactérias que ali competem por recursos podem limitar as respostas da planta. Uma vez que bactérias do gênero *Azospirillum* podem sobreviver tanto em condições endofíticas como associativa próximas as raízes (Baldani *et al.*, 1997), assim Sturz e Nowak (2000) sugerem que, se as bactérias fossem somente

**Tabela 3. Produção por planta de diferentes cultivares de soja, submetidos a inoculação com diferentes bactérias diazotróficas, em casa de vegetação, no município de Marechal Cândido Rondo – PR, 2011/2012.**

Tratamentos	Produção	
	Turbo	CD 250
	- - - - g planta <sup>-1</sup> - - - -	
Testemunha	4.198 aA	3.698 abA
<i>B. japonicum</i>	2.272 bcB	3.919 abA
<i>A. brasilense</i>	1.626 cB	4.865 aA
<i>B. japonicum</i> + <i>A. brasilense</i>	3.138 abA	2.584 bB
Média	3.28	
CV(%)	22.68	

Médias seguidas das mesma letras minúscula na coluna e maiúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; CV(%) = coeficiente de variação.

endofíticas, a inconstância dos resultados seria menor, uma vez que não estariam expostas condições do solo e ambiente, ou também não estariam sujeitas à competição por nutrientes na rizosfera (Mariano, 2001).

## CONCLUSÕES

- A inoculação com bactérias diazotróficas eleva os valores de altura de planta, acúmulo de massa seca e aporte de N na parte aérea para a cultivar BMX Turbo, porém reduz a massa seca de parte aérea quando aplicada a cultivar Coodetec 250
- Genótipos de soja BMX Turbo e Coodetec 250 apresentam capacidade de resposta diferentes à inoculação de sementes com *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum brasilense*, sendo a BMX Turbo mais responsiva a associação com bactérias diazotróficas.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná, afiliada à Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior – SETI; CAPES/PNPD; CNPq e ao INCT pelo suporte financeiro.

## LITERATURA CITADA

- Anollés, C. G. 1997. Molecular dissection and improvement of the nodule symbiosis in legumes. *Field Crops Res.* 53: 47-68.
- Araujo, F. F., L. M. Guaberto, e I. F. da Silva. 2012. Bioprospecção de rizobactérias promotoras de crescimento em *Brachiaria brizantha*. *Rev. Bras. Zoo.* 41: 521-527.
- Bárbaro, I. M., P. C. Machado, L. S. Bárbaro Junior, M. Ticelli, F. B. Miguel, e J. A. A. Silva. 2009. Produtividade da soja em resposta à inoculação padrão e co-inoculação. *Colloquium Agrariae* 5: 1-7.
- Baldani, J., L. Caruso, V. L. D. Baldani, S. R. Goi, and J. Döbereiner. 1997. Recent advances in BNF with non-legume plants. *Soil Biol. Biochem.* 29: 911-922.
- Bashan, Y. and G. Holguin. 1997. *Azospirillum*-plant relationships: Environmental and physiological advances (1990-1996). *Can. J. Microbiol.* 43: 103-121.
- Bécquer Granados, C. J., G. Lazarovits, L. Nielsen, M. Quintan, M. Adesina, L. Quigley, I. Lalin y C. Ibbotson. 2012. Efecto de la inoculación con bacterias rizosféricas en dos variedades de trigo. Fase II: Invernadero. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3: 985-997.
- Bottini, R., M. Fulchieri, D. Pearce, and R. P. Pharis. 1989. Identification of gibberellins A1, A3 and iso-A3 in cultures of *Azospirillum lipoferum*. *Plant Physiol.* 90: 45-47.

- BRASMAX. 2012. Características e posicionamento - cultivares Brasmax. On-line. Disponível em: <[http://www.brasmaxgenetica.com.br/archivos/manejo/manejo\\_20.pdf](http://www.brasmaxgenetica.com.br/archivos/manejo/manejo_20.pdf)>. (Consulta: agosto 30, 2012).
- Cacciarri, I, D. Lippi, T. Pietrosanti, and W. Pietrosanti. 1989. Phytohormone-like substances produced by single and mixed diazotrophic cultures of *Azospirillum* and *Arthrobacter*. *Plant Soil* 115: 151-153.
- Cassán, F., D. Perrig, V. Sgroj, O. Masciarelli, C. Penna, and V. Luna. 2009. *Azospirillum brasilense* Az39 and *Bradyrhizobium japonicum* E109, inoculated singly or in combination, promote seed germination and early seedling growth in corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.). *Eur. J. Soil Biol.* 45: 28-35.
- COODETEC (Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola). 2011. Guia de produtos sul, soja 2011. On-line. Disponível em: <<http://restrita.coodec.com.br/baixar/guia%20soja%20sul.pdf>>. (Consulta: agosto 30, 2012).
- Crawford, N. M., M. L. Kahn, T. Leustek, and S. R. Long. 200. Nitrogen and sulfur. pp. 711-768. *In*: B. B. Buchanan, W. Gruissem, and R. L. Jones. (eds.). *Biochemistry and molecular biology of plants*. Willey. Rockville, MD, USA.
- Crozier, A., P. Arruda, J. M. Jasmim, A. M. Monteiro, and G. Sandberg. 1988. Analysis of indole-3-acetic acid and related indoles in culture medium from *Azospirillum lipoferum* and *Azospirillum brasilense*. *Appl. Environ. Microbiol.* 54: 2833-2837.
- Denison, R. F. and B. L. Harter. 1995. Nitrate effects on nodule oxygen permeability and leghemoglobin: Nodule oximetry and computer modeling. *Plant Physiol.* 107: 1355-1364.
- Döbereiner, J. 1997. Biological nitrogen fixation in the tropics: Social and economic contributions. *Soil Biol. Biochem.* 29: 771-774.
- Döbereiner, J. e J. I. Baldani. 1982. Bases científicas para uma agricultura biológica. *Ciênc. Cult.* 34: 869-881.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 2009. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Embrapa Informações Tecnológica. Brasília, BR.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 2011. Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2012 e 2013. Embrapa Soja. Londrina, BR.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa - SPI/Embrapa – Solos. Brasília/Rio de Janeiro, BR.
- Fagan, E. B., S. L. P. Medeiros, P. A. Manfron, D. Casaroli, J. Simon, D. D. Neto, Q. J. Lier, O. S. Santos, e L. Müller. 2007. Fisiologia da fixação biológica do nitrogênio em soja-revisão. *Rev. FZVA* 14: 89-106.
- Fei, H. and J. K. Vessey. 2004. Further investigation of the roles of auxin and cytokinin in the  $\text{NH}_4^+$  -induced stimulation of nodulation using white clover transformed with the auxin-sensitive reporter GH3:gusA. *Physiol. Plant.* 121: 674-681.
- Fehr, W. R. and C. E. Caviness. 1977. Stages of soybean development. Cooperative Extension Service, Agriculture and Home Economics Experiment Station, Iowa State University, Ames, IA, USA.
- Ferreira, D. F. 2011. Sisvar: A computer statistical analysis. *Ciênc. Agrotec.* 35: 1039-1042.
- Figueiredo, M. V. B., L. Seldin, and F. F. Araujo. 2010. Plant growth promoting rhizobacteria: Fundamentals and applications. pp. 21-43. *In*: D. K. Maheshwari (ed.). *Plant growth and health promoting bacteria*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin.
- Fioreze, S. L., L. G. Pivetta, A. Fano, F. R. Machado, e V. F. Guimarães. 2011. Comportamento de genótipos de soja submetidos a déficit hídrico intenso em casa de vegetação. *Revista Ceres* 58: 342-349.
- Gitti, D. C., O. Arf, F. H. Kaneko, R. A. F. Rodrigues, S. Buzetti, J. R. Portugal, e D. C. D. C. Corsini. 2012. Inoculação de *Azospirillum brasilense* em cultivares de feijões cultivados no inverno. *Rev. Agrar.* 5: 36-46.
- Hungria, M., R. J. Campo, e I. C. Mendes. 2001. Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja. Embrapa Soja: Circular Técnica. Londrina, BR.
- Hungria, M., J. C. Franchini, R. J. Campo, and P. H. Graham. 2005. The importance of nitrogen fixation to soybean cropping in South America. pp. 25-42. *In*: D. Werner and W. E. Newton (eds.). *Nitrogen fixation in agriculture: Forestry ecology and environment*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, NL.
- Imsande, J. and J. M. Schmidt. 1998. Effect of N source during soybean pod filling on nitrogen and sulfur assimilation and remobilization. *Plant Soil* 202: 41-47.
- Lana, M. C., J. Dartora, D. Marini, and J. E. Hann. 2012. Inoculation with *Azospirillum*, associated with nitrogen fertilization in maize. *Rev. Ceres* 59: 399-405.
- Malavolta, E. e M. F. Moraes. 2006. Serie estudos e documentos - O nitrogênio na agricultura brasileira. CETEM. Rio de Janeiro, BR.
- Mariano, R. L. R. 2001. Potencial de bactérias endofíticas para utilização na agricultura. pp. 7-24. *In*: Reunião de controle biológico de fitopatógenos, 7. Bento Gonçalves, 1991. Anais. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho. Bento Gonçalves, RS, Brasil.
- Moreira, C. D., D. H. Pereira, R. A. Coimbra, e D. A. Moreira. 2014. Germinação de gramíneas forrageiras em função da inoculação de bactérias diazotróficas germination of grasses due to inoculation diazotrophic bacteria. *Sci. Elec. Archi.* 6: 90-96.
- Novakowski, J. H., E. I. Sandini, M. K. Falbo, A. Moraes, J. H. Novakowski, e N. C. Cheng. 2011. Efeito residual da adubação nitrogenada e inoculação de *Azospirillum brasilense* na cultura do milho. *Semina: Ciênc. Agrár.* 32: 1687-1698.
- Reis Junior, F. B., C. T. T. Machado, A. T. Machado, e L. Sodek. 2008. Inoculação de *Azospirillum amazonense* em dois genótipos de milho sob diferentes regimes de nitrogênio. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 32: 1139-1146.
- Reis, V. M., J. I. Baldani, V. L. Baldani, and J. Döbereiner. 2000. Biological dinitrogen fixation in gramineae and palm trees. *Crit. Rev. Plant Sci.* 19: 227-247.
- Rodrigues, A. C., J. E. L. Antunes, V. V. Medeiros, B. G. F. Barros, e M. V. B. Figueiredo. 2012. Resposta da co-inoculação de bactérias promotoras de crescimento em plantas e *Bradyrhizobium* sp. em caupi. *Biosci. J.* 28: 196-202.
- Ryle, G. J. A., C. E. Powell, and A. J. Gordon. 1979. The respiratory costs of nitrogen fixation in soybean, cowpea, and white clover. II. Comparisons of the cost of nitrogen fixation and the utilization of combined nitrogen. *J. Exp. Bot.* 30: 145-153.

- Schultz, N., R. F. Morais, J. A. Silva, R. B. Baptista, R. P. Oliveira, J. M. Leite, W. Pereira, J. B. Carneiro Júnior, B. J. R. Alves, J. V. Baldani, R. B. Boddey, S. Urquiaga, e V. M. Reis. 2012. Avaliação agronômica de variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio. *Pesq. Agropec. Bras.* 47: 261-268.
- Silva, A. F., M. A. C. Carvalho, E. L. Schoninghe, S. Monteiro, G. Caione, e P. A. Santos. 2011. Doses de inoculante e nitrogênio na semeadura da soja em área de primeiro cultivo. *Biosci. J.* 27: 404-412.
- Sturz, A. V. And J. Nowak. 2000. Endophytic communities of rhizobacteria and the strategies required to create yield enhancing associations with crops. *Appl. Soil Ecol.* 15: 183-190.
- Taiz, L. e E. Zieger. 2013. *Fisiologia vegetal*. Sinauer Associates, Sunderland, MA, USA.
- USDA (United States Departmente of Agriculture). 2015. World agricultural supply and demand estimates. Washington, DC, USA.
- Vassilev, N., M. Vassileva, and I. Nikolaeva. 2006. Simultaneous P-solubilizing and biocontrol activity of microorganisms: Potentials and future trends. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 71: 137-144.
- Zancopé, G. J., J. M. Nasser, e M. V. P. Moraes. 2005. O Brasil que deu certo: A saga da soja brasileira. Triade. Curitiba, BR.
- Zilli, J. E., R. J. Campo, e M. Hungria. 2010a. Eficácia da inoculação de *Bradyrhizobium* em pré-semeadura da soja. *Pesq. Agropec. Bras.* 45: 335-338.
- Zilli, J. É., V. Gianluppi, R. J. Campo, J. R. C. Rouws, e M. Hungria. 2010b. Inoculação da soja com *Bradyrhizobium* no sulco de semeadura alternativamente à inoculação de sementes. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 34: 1875-1881.



# INOCULACIÓN BACTERIANA EN EL CRECIMIENTO Y CALIDAD DEL FRUTO DE CINCO VARIEDADES DE FRESA EN SUELOS CON pH CONTRASTANTE

## Bacterial Inoculation of Five Strawberry Varieties in Contrasting Soil pH: Effect on Growth and Fruit Quality

José Alberto Ortiz Texon<sup>1</sup>, Julián Delgadillo Martínez<sup>1,‡</sup>,  
María de las Nieves Rodríguez Mendoza<sup>1</sup> y Guillermo Calderón Zavala<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Postgrado en Edafología, <sup>2</sup> Postgrado en Fruticultura, Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (juliandm@colpos.mx)

### RESUMEN

En un primer experimento se determinó el crecimiento de cinco variedades de fresa en dos suelos con pH contrastante (4.4 y 8.8). La producción de materia seca de la parte aérea, área foliar, volumen radical y concentración de N, P, K en la parte aérea se determinaron 125 días después del trasplante (ddt). Las plantas de todas las variedades cultivadas en pH 4.4 superaron a las cultivadas en pH 8.8 en todas las variables. Las variedades CP-06-15 y Festival fueron las que mejor se adaptaron a las condiciones de pH alcalino. En un segundo experimento se determinó la función de la inoculación con rizobacterias solubilizadoras de fosfatos en la reducción de los efectos negativos del pH alcalino en las variedades de fresa. Dos tipos de inoculación al momento del trasplante fueron comparadas: aplicación con pipeta de precisión e inmersión de las raíces en la suspensión bacteriana; además del testigo (sin inoculación). Se determinó crecimiento de las plantas y la producción y calidad de los frutos. La inoculación bacteriana no tuvo efecto en el crecimiento de la parte aérea y la raíz de las plantas, excepto en la variedad más sensible al pH alcalino (CP-LE-07) inoculada por inmersión de la raíz. También, esta fue la única variedad en la que la inoculación bacteriana aumentó el número de frutos producidos. De acuerdo al promedio de todas las variedades, la inoculación bacteriana, en ambas de sus formas, redujo el número y peso de los frutos producidos.

**Palabras clave:** *rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal; sólidos solubles totales; grados Brix.*

#### Como citar este artículo:

Ortiz Texon, J. A., J. Delgadillo Martínez, M. N. Rodríguez Mendoza y G. Calderón Zavala. 2016. Inoculación bacteriana en el crecimiento y calidad del fruto de cinco variedades de fresa en suelos con pH contrastante. *Terra Latinoamericana* 34: 177-185.

### SUMMARY

The first of two experiments was conducted to determine the effect of bacterial inoculation on five varieties of strawberry growing on two soils with contrasting pH (4.4 and 8.8). Shoot dry matter production, leaf area, root volume and shoot N, P and K contents were evaluated 125 days after transplanting. All varieties grown in pH 4.4 exceeded those grown in pH 8.8 in all variables. The varieties CP-06-15 and Festival were best adapted to alkaline pH conditions. A second experiment was established to compare two inoculation methods (direct application or root immersion) with phosphate solubilizing rhizobacteria in reducing the negative effects of alkaline pH on plant growth and fruit production and quality of the five strawberry varieties. Bacterial inoculation had no effect on shoot or root growth, with the exception of the variety least adapted to high soil pH (CP-LE-07) inoculated by root immersion in a bacterial suspension. Only in this variety, did inoculation increase fruit production. The averages of all varieties revealed that both types of bacterial inoculation reduced fruit number and weight.

**Index words:** *plant-growth promoting rhizobacteria; total soluble solids; Brix grades.*

### INTRODUCCIÓN

México cuenta con una superficie sembrada de fresa de 9248 ha con un rendimiento promedio de 45 Mg ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2013). Algunas zonas productoras no expresan su máximo potencial, debido mayormente a deficiencias de algunos elementos importantes para

Recibido: mayo de 2015. Aceptado noviembre de 2015.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 177-185.

que la planta complete su ciclo de vida, afectando finalmente la producción de frutos. La salinidad afecta negativamente a la mayoría de los cultivos agrícolas (Shrivastava y Kumar, 2015). En fresa, el pH del suelo óptimo es entre 4.6 y 6.5 (Milosevic *et al.*, 2009). La producción de frutos puede ser inversamente proporcional a la calidad de los mismos (Cardeñosa *et al.*, 2014; Dumas *et al.*, 2003; Giuffrida *et al.*, 2001; Keutgen y Pawelzik, 2008; Li *et al.*, 2013). Los problemas edáficos en el centro de México, se deben principalmente a suelos alcalinos, los cuales representan hasta un tercio de la superficie del país. Estos suelos se encuentran, normalmente, en zonas de baja precipitación (< 500 mm año<sup>-1</sup>), razón por la cual los cationes como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> no son lixiviados. Tales suelos tienen altas concentraciones de iones OH<sup>-</sup> y concentraciones altas de bicarbonatos o carbonatos. En algunas ocasiones también presentan altos niveles de sodio, que a partir de pH 8.5 se presenta en su forma intercambiable. Bajos contenidos de materia orgánica en estos suelos provocan antagonismos con otros elementos, lo que dificulta la absorción de P, Fe, Zn y Mn (Navarro, 2010).

El estudio de microorganismos promotores del crecimiento vegetal ha cobrado importancia a nivel mundial debido a las múltiples ventajas que estos representan. Algunos proporcionan una mejor nutrición de las plantas a través de mecanismos directos o indirectos (Couillerot *et al.*, 2009; Richardson *et al.*, 2009). Las bacterias pueden promover el crecimiento vegetal vía producción de fitohormonas (auxinas y giberelinas) o la regulación de la producción de promotores de crecimiento por parte de la planta. Además, incrementan la resistencia de estas a factores ambientales, ya que pueden inducir o suprimir la expresión de una amplia gama de genes relacionados con adaptación ambiental (Tsavkelova *et al.*, 2006). Así mismo, pueden afectar la disponibilidad de nutrientes por la intervención directa en los ciclos biogeoquímicos, tal es el caso de la fijación biológica de nitrógeno o la solubilización de fosfatos. Esta última debido a la secreción de ácidos orgánicos o de fosfatasas (Camelo *et al.*, 2011). Los mecanismos indirectos de promoción del crecimiento vegetal se centran principalmente en la interacción de microorganismos benéficos con fitopatógenos, con lo que se aminoran los daños en la planta (Díaz *et al.*, 2001). Los estímulos indirectos incluyen la producción y secreción de sideróforos, compuestos que secuestran el Fe disponible en la rizosfera y como resultado

previene que cualquier patógeno vecino proliferen. También incluyen la producción de compuestos antimicrobianos que inhiben el crecimiento (Ongena *et al.*, 2005) e hidrólisis de la pared celular de hongos fitopatógenos. En específico, la destrucción de ácido fusárico, agente químico causante de daños en plantas infectadas con *Fusarium* (Sarabia *et al.*, 2010). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue determinar el crecimiento de variedades de fresa en suelos alcalinos y el efecto protector de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Efecto del pH del Suelo en Variedades de Fresa

El experimento se estableció en un invernadero tipo capilla de 4.5 m de altura central y 3 m de altura lateral. Cubierta de malla sombra del 40% de reflectancia, estructura de acero galvanizado, orientación norte-sur. Este se encuentra en Montecillo, Estado de México a 19° 29' N y 98° 53' O y 2260 m de altitud. Se cultivaron plantas de fresa de las variedades CP-Zamorana, CP-Jacona, Festival, líneas avanzadas CP-LE-7 y CP-06-15. Se establecieron dos tratamientos correspondientes a dos tipos de suelo con pH contrastante para cada una de cinco variedades. El primero es un suelo de invernadero de la Comunidad de San Diego y el segundo un suelo agrícola de Montecillo, ambos del Municipio de Texcoco, Estado de México. Las características de ambos suelos se presentan en el Cuadro 1.

Cada unidad experimental consistió en una planta de fresa cultivada en una bolsa de plástico negro calibre 400 de 8 L de capacidad conteniendo 12 kg de suelo. Cada tratamiento contó con ocho unidades experimentales (repeticiones). Se aplicaron riegos tres veces por semana. A los 125 días después del trasplante (ddt) se cosecharon las plantas, se separó la raíz de la parte aérea y se evaluaron las siguientes variables: 1) área foliar, la cual se determinó con ayuda de un integrador foliar LI-3000 (LI.COR, EE.UU.). 2) Volumen radical por el método de volumen de agua desplazado por raíz y corona en una probeta de 500 mL. 3) Peso seco de la parte aérea, se secó a 70 °C durante 72 h y se pesó en balanza analítica. 4) Concentración de N, P, y K en la parte aérea. El material seco se molió en mortero y se determinó N por método micro-Kjeldahl, P y K por digestión del

**Cuadro 1. Características químicas de los suelos utilizados.**

	Unidades	Suelo 1	Suelo 2	Métodos empleados
pH		4.4	8.8	1:2 en agua
CE	dS m <sup>-1</sup>	0.2	0.5	1:5 en agua
MO	%	39.4	1.5	Walkley y Black
N	%	1.97	0.07	Calculado de % de MO
P	mg kg <sup>-1</sup> de suelo	27	13	Olsen
		29	n.d.	Bray y Kurtz
K	meq 100 g <sup>-1</sup> de suelo	0.6	4.1	
Ca	meq 100 g <sup>-1</sup> de suelo	4.5	27.9	NH <sub>4</sub> OAc 1N pH=7
Mg	meq 100 g <sup>-1</sup> de suelo	1.7	9.2	
Na	meq 100 g <sup>-1</sup> de suelo	0.3	1.3	
N-NO <sub>3</sub>		60	11	KCl 2N
N-NH <sub>4</sub>		77	2	
Fe	mg kg <sup>-1</sup> de suelo	150	2	
Cu	mg kg <sup>-1</sup> de suelo	1	0.4	1:4 en DTPA
Zn	mg kg <sup>-1</sup> de suelo	5	1	
Mn	mg kg <sup>-1</sup> de suelo	59	6	

CE = conductividad eléctrica; MO = materia orgánica; n.d. = no detectado.

material vegetal en ácido nítrico y perclórico y lectura en el ICP-OES (Mulgrave-Australia Agilent). Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SAS (StatisticalAnalysisSystem) versión 9.0 en los cuales se aplicó un análisis de varianza y se hizo una prueba de comparación de medias (Tukey  $\alpha = 0.05$ ) de los dos tipos de suelo (pH 4.4 contra pH 8.8).

### Inoculación Bacteriana en Variedades de Fresa

Se cultivaron plantas de fresa de las mismas variedades del primer experimento y se establecieron tres tratamientos: 1) sin inoculación, 2) inoculación por aplicación de 5 mL de suspensión bacteriana y 3) inoculación por inmersión de las raíces en la suspensión bacteriana. Cuatro cepas bacterianas promotoras del crecimiento vegetal se utilizaron por su capacidad de solubilización de fosfatos (*Pseudomonas tolaasi* A46 y P61, *Paenibacillus polymyxa* BPS1.1 y *Bacillus pumilus* R-44), las cuales fueron proporcionadas por el laboratorio de Microbiología de Suelos del Colegio de Postgraduados. Las cepas se propagaron en caldo nutritivo en incubadora con agitación rotatoria (New Brunswick Scientific Edison) a 180 rpm durante cuatro días a 28 °C, hasta obtener una concentración de 10<sup>9</sup> células mL<sup>-1</sup>, de acuerdo

con la escala de McFarland (McFarland, 1970). La inoculación se realizó al momento del trasplante. Las plantas se cultivaron en el suelo pH 8.8 utilizado en el primer experimento y con manejo similar. Seis repeticiones se establecieron. Los frutos producidos se cortaron semanalmente y evaluaron de los 134 a los 227 ddt. Frutos de fresa en estado de madurez comercial (3/4 del total de la superficie del fruto con coloración roja) fueron muestreados. La firmeza en frutos se determinó con un penetrómetro de mano (Marca QA Supplies) y los datos se expresaron en g cm<sup>-2</sup>. Los sólidos solubles totales del fruto se midieron con un refractómetro portátil (Marca Atago N-1a Alfa) y los datos se expresaron en grados Brix. Las plantas se cortaron a los 227 ddt y se determinó peso seco de la materia seca, área foliar, volumen radical y concentración de N, P y K de la parte aérea del mismo modo que en el primer experimento. La producción acumulada de frutos por planta (número y peso de los frutos) se calculó adicionalmente. La población de bacterias solubilizadoras de fosfatos en la rizosfera de las plantas de fresa se estimó por el método de diluciones decimales de macerados radicales (Mattos *et al.*, 2008) y siembra en medio de cultivo Pikovskaya (PVK). Las colonias que presentaban un halo transparente, lo que indica la solubilización del

fosfato tricálcico, se cuantificaron como positivas. Los datos fueron analizados con el programa estadístico SAS (StatisticalAnalysisSystem) versión 9.0 en los cuales se aplicó un análisis de varianza y se hizo una prueba de comparación de medias (Tukey  $\alpha = 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efecto del pH del Suelo en Variedades de Fresa

La producción de materia seca fue superior en el suelo con pH 4.4 comparado con el suelo pH 8.8, en todas las variedades de fresa (Cuadro 2).

Las variedades CP-Zamorana y CP-Jacona fueron las que mostraron mayor producción de materia seca en el suelo pH 4.4; mientras que la línea CP-06-15 y la variedad Festival fueron las que mayor producción de materia seca tuvieron en el suelo con pH 8.8, es decir, las que mejor se adaptaron a las condiciones de alcalinidad. La fresa, al ser un cultivo de suelos ácidos (Garriga *et al.*, 2014), reduce su crecimiento en suelos con pH alto ( $>8$ ), lo cual fue evidente en este trabajo. La reducción en la producción de materia seca promedio de todas las variedades al variar el pH del suelo fue de 66%, con valores de 19.44 en pH 4.4 reduciéndose a 6.49 g planta<sup>-1</sup> en suelo con pH 8.8. Las variedades más afectadas por el pH alto del suelo fueron CP-Zamorana, se redujo 75% su producción de materia seca y CP-Jacona 74% de reducción respecto al suelo con pH 4.4, mientras que las menos afectadas

por el aumento en el pH del suelo fueron CP-06-15 con una reducción de 54% y Festival con una reducción del 56% en la materia seca producida.

El área foliar presentó la misma tendencia que la materia seca. En todas las variedades el área foliar fue mayor en el suelo con pH 4.4 que en suelo con pH 8.8. Las variedades CP-Zamorana y CP-Jacona fueron las que mostraron mayor área foliar en el suelo pH 4.4; mientras que la línea CP-06-15 y la variedad Festival fueron las que mejor se adaptaron a las condiciones de alcalinidad. La reducción en el área foliar promedio de todas las variedades fue de 63%, con valores de 1292 en pH 4.4 y 478 cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup> en suelo con pH 8.8.

El volumen radical presentó la misma tendencia que área foliar y peso seco de la parte aérea, ya que en todas las variedades el volumen radical fue mayor en suelo con pH 4.4 que en suelo con pH 8.8. En el suelo con pH 4.4, las variedades CP-Zamorana y CP-06-15 fueron las que presentaron mayor crecimiento de la raíz, mientras que en suelo con pH 8.8, la variedad CP-06-15 se destacó sobre las variedades restantes. La disminución en el crecimiento de la raíz respecto al tipo de suelo, de ácido a alcalino, en la variedad CP-06-15 fue de 53%, mientras que en el promedio de todas las variedades fue de 67%.

Así mismo, la concentración de N, P y K en la parte aérea en todas las variedades evaluadas fue mayor en suelo con pH 4.4 que en suelo con pH 8.8. En el suelo con pH 4.4 las variedades con mayor contenido de

**Cuadro 2. Efecto del pH del suelo en variables relacionadas con el crecimiento y la acumulación de macronutrientes en cinco variedades de fresa.**

Variedad	pH	Materia seca g planta <sup>-1</sup>	Área foliar cm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup>	Volumen radical cm <sup>3</sup> planta <sup>-1</sup>	N	P	K
CP-Zamorana	4.4	21.26	1384	76	338.63	27.77	79.55
	8.8	5.30 <sup>†</sup>	407 <sup>†</sup>	12 <sup>†</sup>	66.82 <sup>†</sup>	11.50 <sup>†</sup>	30.59 <sup>†</sup>
CP-Jacona	4.4	20.04	1372	66	227.3	33.83	92.81
	8.8	5.25 <sup>†</sup>	418 <sup>†</sup>	14 <sup>†</sup>	59.58 <sup>†</sup>	9.64 <sup>†</sup>	23.66 <sup>†</sup>
CP-06-15	4.4	19.28	1261	74	299.67	27.17	88.27
	8.8	8.88 <sup>†</sup>	593 <sup>†</sup>	22 <sup>†</sup>	118.15 <sup>†</sup>	18.41 <sup>†</sup>	53.62 <sup>†</sup>
CP-LE-7	4.4	18.73	1234	64	281.81	35.48	87.97
	8.8	5.19 <sup>†</sup>	370 <sup>†</sup>	14 <sup>†</sup>	68.99 <sup>†</sup>	10.14 <sup>†</sup>	23.03 <sup>†</sup>
Festival	4.4	17.89	1208	68	311.89	28.45	85.33
	8.8	7.82 <sup>†</sup>	603 <sup>†</sup>	14 <sup>†</sup>	110.55 <sup>†</sup>	19.87 <sup>†</sup>	51.85 <sup>†</sup>
Promedio de variedades	4.4	19.44	1292	70	291.86	29.21	86.79
	8.8	6.49 <sup>†</sup>	478 <sup>†</sup>	15 <sup>†</sup>	84.82 <sup>†</sup>	15.67 <sup>†</sup>	36.55 <sup>†</sup>

<sup>†</sup>Diferencias estadísticas significativas entre tratamientos dentro de cada variedad (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

N en la parte aérea fueron CP-Zamorana y Festival, en P CP-LE-7 y CP-Jacona y para K CP-Jacona. En el suelo con pH 8.8, los mayores contenidos de N, P y K se presentaron en CP-06-15 y Festival. Lo anterior indica que en condiciones de estrés por alcalinidad, las variedades (CP-06-15 y Festival) que mayor crecimiento tuvieron fueron a su vez las que presentaron mayor concentración de macroelementos. Los decrementos en todas las variables evaluadas en este trabajo ocasionadas por el aumento en el pH de suelo hasta 8.8, concuerdan con lo reportado por Keutgen y Pawelzik (2008); además, D'Anna *et al.* (2003) y Pirlak y Esitken (2004) determinaron que estos decrementos en el crecimiento provocan que la producción de frutos también disminuya.

### Inoculación Bacteriana en Variedades de Fresa

De manera similar que en el primer experimento, el mayor peso seco de la parte aérea se presentó en las variedades CP-06-15 y Festival. No se presentaron aumentos en el crecimiento de las plantas por efecto

de la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV). Solo en la variedad CP-LE-7, la cual tuvo los valores más bajos en acumulación de materia seca, el tratamiento de inoculación por inmersión de la raíz en suspensión bacteriana superó al de inoculación por aplicación directa y al testigo (Cuadro 3).

Los microorganismos utilizados en este trabajo fueron aislados de ambientes con suelos cercanos a la neutralidad, lo que pudo haber afectado su desempeño en suelos con pH 8.8. Bharti *et al.* (2014) indicaron que en condiciones de estrés salino en los suelos, la inoculación de microorganismos (RPCV) exógenos debe hacerse con aquellos halotolerantes. Así mismo, Castro-Sowinski *et al.* (2007) identificaron muchos otros factores que pueden afectar la efectividad de las RPCV inoculadas, entre los más destacados se encuentran la competencia con los microorganismos nativos, características físicas y químicas del suelo, genotipo y edad de la planta a inocular, tipo de exudados radicales y manejo agrícola.

El área foliar mostró tendencias similares a

**Cuadro 3. Materia seca de parte aérea, área foliar, raíz y acumulación de macronutrientes en la parte aérea de cinco variedades de fresa desarrolladas en un suelo con pH 8.8 y tratadas con dos tipos de inoculación bacteriana.**

Variedad de fresa	Inoculación	Materia seca	Área foliar	Volumen radical	N	P	K
		g planta <sup>-1</sup>	cm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup>	cm <sup>3</sup> planta <sup>-1</sup>	- - - - - mg planta <sup>-1</sup> - - - - -		
CP-Zamorana	Sin inocular	8.38	456.4	16.0	121.24a	17.04a	56.50
	Aplicación directa	6.79	392.3	15.0	98.24b	13.12b	49.36
	Inmersión de raíz	8.34	434.4	13.8	116.72a	10.25b	50.34
CP-Jacona	Sin inocular	8.77	455.9	17.2	126.84a	18.48a	63.12a
	Aplicación directa	7.81	401.4	15.5	102.02b	10.66b	51.06b
	Inmersión de raíz	7.27	379.1	13.3	108.50b	9.88b	33.06c
CP-06-15	Sin inocular	12.68	750.4	22.2	218.94a	26.52	105.91
	Aplicación directa	11.94	680.9	22.6	189.39b	33.69	101.78
	Inmersión de raíz	13.05	801.4	20.0	213.10ab	31.53	114.73
CP-LE-7	Sin inocular	5.50b	250.2b	12.8	82.08b	7.84b	30.33b
	Aplicación directa	4.70b	196.3b	10.2	70.17b	7.06b	30.01b
	Inmersión de raíz	7.34a	345.0a	13.7	85.69a	13.89a	46.44a
Festival	Sin inocular	10.57	538.1	18.3	187.39a	21.84	71.45
	Aplicación directa	9.40	509.7	15.5	192.90a	20.15	69.03
	Inmersión de raíz	10.33	578.0	16.8	163.96b	14.59	50.78
Promedio de variedades	Sin inocular	8.08	581.5	17.3	140.99	18.34	65.46
	Aplicación directa	7.19	530.7	15.8	131.25	16.94	60.25
	Inmersión de raíz	9.75	586.2	15.5	127.77	16.03	59.07

Letras diferentes en la misma columna y dentro de la misma variedad indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

la acumulación de materia seca en la parte aérea, ya que la mayor área foliar se presentó en las variedades CP-06-15 y Festival. Tampoco se presentaron efectos en el crecimiento de las plantas por efecto de la inoculación con RPCV, a excepción de la variedad CP-LE-7, la cual fue la variedad con valores más bajos de acumulación de materia seca y área foliar. También en esta variedad, las plantas inoculadas por el método de inmersión de la raíz en suspensión bacteriana superaron a las inoculadas por aplicación directa y al testigo sin inocular (Cuadro 3).

De manera similar a lo ocurrido en el suelo con pH 8.8 del primer experimento, en el segundo experimento la variedad CP-06-15 fue la que se destacó por el crecimiento de sus raíces. La inoculación con RPCV no provocó mejoras en los valores de volumen radical para ninguna de las variedades en comparación al testigo.

En cuanto al contenido de N, P y K en la parte aérea, la variedad CP-06-15 fue la que presentó los valores más altos, siendo esta misma variedad la que presentó los valores más altos en volumen radical. Lo anterior indica que el crecimiento de las raíces se relacionó con el contenido nutricional de la planta. Para acumulación de N en la parte aérea, se presentaron diferencias entre tratamientos de inoculación en todas las variedades. En las variedades CP-06-15 y

CP-Zamorana, el contenido de N en parte aérea de las plantas con inoculación directa fue menor que en las del testigo sin inocular, pero no con las inoculadas por inmersión de las raíces en la suspensión bacteriana. Para la variedad Festival, esta reducción fue provocada por el tratamiento de inoculación por inmersión de la raíz en la suspensión bacteriana y no por inoculación directa. Para CP-Jacona, ambos tipos de inoculación provocaron reducción en el contenido de N en la parte aérea en comparación con las plantas sin inocular.

En cuanto al contenido de P, las variedades CP-Zamorana y CP-Jacona presentaron la misma tendencia. En ambas, la inoculación bacteriana (ambos métodos) provocó reducción en el contenido de P en la parte aérea en comparación con el testigo sin inocular (Cuadro 3). Las raíces de CP-Zamorana presentaron mayor colonización por bacterias solubilizadoras de fosfatos en el tratamiento inoculado por aplicación directa en comparación con el testigo y las inoculadas por el método de inmersión de la raíz (Figura 1).

Lo anterior indica que las bacterias inoculadas a la variedad CP-Zamorana se establecieron en las raíces, pero en lugar de favorecer la mejor nutrición de las plantas provocaron que se redujeran los contenidos de N y P. Al respecto, Castro-Sowinski *et al.* (2007) indicaron que otras RPCV se pueden comportar como

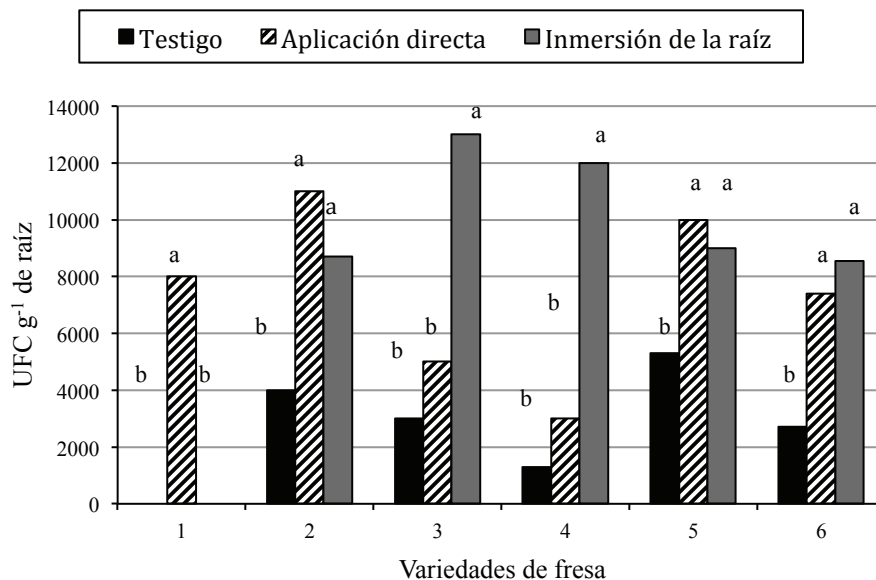


Figura 1. Población de bacterias solubilizadoras de fosfatos en la raíz de cinco variedades de fresa (1 = CP-Zamorana, 2 = CP-Jacona, 3 = CP-06-15, 4 = CP-LE-7, 5 = Festival y 6 = Promedio de variedades) con dos métodos de inoculación de RPCV. Columnas con diferente letra para la misma variedad o para promedio de todas las variedades son estadísticamente distintas (Tukey,  $\alpha = 0.05$ )

competidoras de las plantas por nutrimentos. Para la acumulación de K en la parte aérea, sólo para la variedad CP-Jacona se presentó esta misma tendencia, en la que la inoculación bacteriana (ambos métodos) provocó reducción en comparación con el testigo sin inocular (Cuadro 3).

En la variedad CP-LE-7, el tratamiento de inoculación por inmersión de las raíces en suspensión bacteriana superó al testigo y al tratamiento de inoculación directa en el contenido de N, P y K. Cabe señalar que es esta variedad la que presentó menor crecimiento de raíz y parte aérea (Cuadro 3).

En el número y peso de los frutos, al comparar el promedio de todas las variedades se encontró que el testigo y la inoculación por aplicación directa superaron al tratamiento de inmersión de las raíces (Cuadro 4). De acuerdo a la Figura 1, ambos métodos de inoculación permiten que las bacterias colonicen exitosamente las raíces de fresa en comparación con el testigo sin inocular. Lo anterior indica que las plantas de fresa inoculadas por ambos métodos fueron colonizadas por las bacterias solubilizadoras de fosfatos aplicadas, pero

éstas no favorecieron el número y peso de los frutos; por lo contrario, las aplicadas por el método de inmersión provocaron reducción en estas variables productivas.

La variedad CP-Jacona fue la que presentó los valores más altos de número y peso de los frutos producidos por planta. Pero, en esta variedad fue donde se presentaron los valores más bajos de resistencia a la penetración y sólidos solubles totales (Cuadro 4).

Las variedades con mejor crecimiento (valores mayores en área foliar, producción de materia seca de la parte aérea y volumen radical), CP-06-15 y Festival (Cuadro 3), también presentaron los valores altos en número, peso de los frutos y sólidos solubles totales; sin embargo, la resistencia a la penetración en estas variedades presentó valores bajos.

La firmeza de los frutos es una variable que depende principalmente del estado nutrimental de las plantas y los sólidos solubles totales son una característica dependiente de la variedad. Al respecto, Portela *et al.* (2012) concluyeron que el estrés salino (pH del suelo mayor de 8) afecta negativamente la calidad de los frutos de fresa. En su trabajo, realizado

**Cuadro 4. Variables relacionadas con la producción y calidad de frutos de cinco variedades de fresa en un suelo con pH 8.8 y dos tipos de inoculación bacteriana.**

Variedad	Inoculación	Número de frutos	Peso de los frutos	Resistencia a la penetración	Sólidos solubles totales
		planta <sup>-1</sup>	g planta <sup>-1</sup>	g cm <sup>-2</sup>	°Brix
CP-Zamorana	Sin inocular	9.4 a	93.33 a	208.57 a	9.51 a
	Aplicación directa	8.0 ab	83.60 b	194.91 b	8.88 b
	Inmersión de raíz	7.6 b	73.03 b	197.57 ab	9.63 a
CP-Jacona	Sin inocular	9.8 a	101.23 a	196.64 a	8.31 b
	Aplicación directa	8.8 b	92.72 b	190.24 a	9.23 a
	Inmersión de raíz	8.5 b	86.12 c	198.27 a	9.04 a
CP-06-15	Sin inocular	8.7 ab	82.42 a	198.13 a	9.90 ab
	Aplicación directa	9.0 a	81.64 a	197.16 a	9.57 b
	Inmersión de raíz	8.3 b	86.20 a	191.78 a	10.20 a
CP-LE-7	Sin inocular	5.3 c	55.50 ab	220.77 a	9.16 a
	Aplicación directa	7.0 a	58.68 a	209.59 b	8.91 a
	Inmersión de raíz	6.0 b	47.63 b	212.80 ab	9.12 a
Festival	Sin inocular	9.2 a	83.49 a	194.45 a	9.54 a
	Aplicación directa	9.7 a	85.90 a	187.88 a	10.03 a
	Inmersión de raíz	8.3 b	84.70 a	194.23 a	10.05 a
Promedio de variedades	Sin inocular	8.5 a	83.18 a	203.72 a	9.28 b
	Aplicación directa	8.5 a	80.50 a	195.96 b	9.32 ab
	Inmersión de raíz	7.7 b	75.52 b	198.96 ab	9.60 a

Promedios con diferente letra para la misma variable y de la misma variedad son estadísticamente distintos (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

en hidroponía, las plantas que se sometieron a estrés salino produjeron frutos con mayor cantidad de sólidos solubles totales. Estos aumentos los asociaron con un efecto de concentración nutrimental en frutos pequeños y acumulación de solutos activos. Hasegawa *et al.* (2000) describieron estos solutos como compuestos orgánicos (azúcares y alcoholes, principalmente) que no interfieren con las actividades enzimáticas celulares y que tienen una función de mantenimiento del potencial hídrico en la célula vegetal.

### CONCLUSIONES

- Las variedades CP-06-15 y Festival fueron las que mejor se adaptaron a las condiciones de pH alcalino, mismas que presentaron valores de producción de frutos y sólidos solubles totales altos, pero resistencia a la penetración baja.
- La inoculación bacteriana no fue benéfica para el crecimiento ni para la producción de frutos de las variedades cultivadas en un suelo con pH 8.8, con excepción de la variedad con menor crecimiento (CP-LE-07), en la cual, se recomienda la inoculación por el método de inmersión de la raíz.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con apoyo del proyecto SAGARPA 190290 “Generación y validación de variedades mexicanas de fresa”.

### LITERATURA CITADA

- Bharti, N., D. Barnawal, D. Maji, and A. Kalra. 2014. Halotolerant PGPRs prevent major shifts in indigenous microbial community structure under salinity stress. *Microbiol. Ecol.* 70: 196-208. Doi:10.1007/Fs00248-014-0557-4.
- Camelo, M., P. Vera y R. R. Bonilla. 2011. Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Rev. Corpoica* 12: 159-166.
- Cardeñoso V., E. Medrano, P. Lorenzo, M. C. Sánchez-Guerrero, F. Cuervas, I. Pradas, and J. M. Moreno-Rojas. 2014. Effects of salinity and nitrogen supply on the quality and health-related components of strawberry fruits (*Fragaria × ananassa* cv. Primoris). *J. Sci. Food Agric.* 95: 2924-2930. Doi: 10.1002/jsfa.7034.
- Castro-Sowinski, S., Y. Herschkovitz, Y. Okony, and E. Jurkevitch. 2007. Effects of inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria on resident rhizosphere microorganisms. *FEMS Microbiol. Lett.* 276: 1-11.
- Couillerot, O., C. Prigent-Combaret, J. Caballero-Mellado, and M. Moëgne-Loccoz. 2009. *Pseudomonas fluorescens* and closely-related fluorescent pseudomonads as biocontrol agents of soil-borne phytopathogens. *Lett. Appl. Microbiol.* 48: 505-512.
- D’Anna, F., G. Incalcaterra, A. Moncada, and A. Miceli. 2003. Effect of different electrical conductivity levels on strawberry grown in soilless culture. *Acta Hort.* 609: 355-360.
- Díaz Vargas, P., R. Ferrera-Cerrato, J. J. Almaraz-Suárez y G. Alcántar González. 2001. Inoculación de bacterias promotoras del crecimiento en lechuga. *Terra* 19: 327-335.
- Dumas, Y., M. Dadomo., G. Di Lucca, and P. Grolier. 2003. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *J. Sci. Food Agric.* 83: 369-382.
- Garriga, M., J. B. Retamales, S. Romero-Bravo, P. D. Caligari, and G. A. Lobos. 2014. Chlorophyll, anthocyanin, and gas exchange changes assessed by spectro radiometry in *Fragaria chiloensis* under salt stress. *J. Integrative Plant Biol.* 56: 505-515.
- Giuffrida, F., C. Leonardi, and G. Noto. 2001. Response of soilless grown strawberry to different salinity levels in the nutrient solution. *Acta Hort.* 559: 675-680.
- Hasegawa, P. M., R. A. Bressan, J. K. Zhu, and H. J. Bonhert. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 51: 463-499.
- Keutgen, A. J. and E. Pawelzik. 2007. Modifications of strawberry fruit antioxidant pools and fruit quality under NaCl stress. *J. Agric. Food Chem.* 55: 4066-4072.
- Keutgen, A. J. and E. Pawelzik. 2008. Quality and nutritional value of strawberry fruit under long term salt stress. *Food Chem.* 107: 1413-1420.
- Li, X-L, C-R. Wang, X-Y. Li, Y-X. Yao, and Y-J. Hao. 2013. Modifications of Kyoho grape berry quality under long-term NaCl treatment. *Food Chem.* 139: 931-937.
- Mattos, K. A., V. L. M. Pádua, A. Romeiro, L. F. Hallack, B. C. Neves, T. M. U. Ulisses, C. F. Barros, A. R. Todeschini, J. O. Previato y L. Mendonça-Previato. 2008. Endophytic colonization of rice (*Oryza sativa* L.) by the diazotrophic bacterium *Burkholderia kururiensis* and its ability to enhance plant growth. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 80: 477-493.
- McFarland, J. 1970. The nephelometer: An instrument for estimating the number of bacteria in suspensions used for calculating the opsonic index and for vaccines. pp. 435-437. *In:* H. D. Campbell, S. J. Garvey, E. N. Cremer, and H. D. Sussdorf (eds.). *Methods in immunology*. Benjamin. New York, NY, USA.
- Milosevic, T. M., N. T. Milosevic, e I. P. Glisic. 2009. Strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) yield as affected by the soil pH. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 81: 265-269.
- Navarro G., M. 2010. Nutrición y fertirrigación del tomate en suelos calcáreos. pp. 85-99. *In:* A. Benavides-Mendoza, V. Robledo-Robles., H. Ramirez, A. Sandoval Angel (eds.). *Producción de tomate en el norte de México*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coah. México.
- Nardi, S., G. Concheri, D. Pizzeghello, A. Sturaro, R. Rella, and G. Parvoli. 2000. Soil organic matter mobilization by root exudates. *Chemosphere* 5: 653-658.



- Ongena, M., F. Duby, E. Jourdan, T. Beaudry, V. Jadin, J. Dommes, and P. Thonart. 2005. *Bacillus subtilis* M4 decreases plant susceptibility towards fungal pathogens by increasing got resistance associated with differential gene expression. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 67: 692- 698.
- Pirlak, L. and A. Esitken. 2004. Salinity effects on growth, proline and ion accumulation in strawberry plants. *Acta Agric. Scand.* 54: 189-193.
- Portela, I. P., R. Peil, and C. V. Rombaldi. 2012. Effect of nutrient concentration on growth, yield and quality of strawberries in hydroponic system. *Hortic. Bras.* 30: 266-273.
- Richardson, A. E, J. M. Barea. A. M. McNeill, and C. Prigent-Combaret. 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant Soil* 321: 305-339.
- Sarabia O., M., R. Madrigal, M. Martinez y Y. Carreón. 2010. Plantas, hongos micorrízicos y bacterias: su compleja red de interacciones biológicas. *Rev. DES Cienc. Biol. Agropec.* 12: 65-71.
- Shrivastava, P. and R. Kumar. 2015. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi J. Biol. Sci.* 22: 123-131.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2013. Producción por cultivo. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> (Consulta: febrero 4, 2014).
- Tsavkelova, E. A., S. Y. Klimova, T. A. Cherdyntseva, and A. I. Netrusov. 2006. Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: A review. *Appl. Biochem. Microbiol.* 42: 117-126.

# DISCRIMINACIÓN DE COBERTURAS DEL SUELO USANDO DATOS ESPECTRALES MULTI-ANGULARES DEL SENSOR POLDER-1: ALCANCES Y LIMITACIONES

## Discrimination of Land Cover Classes Using Multi-Angular Spectral Data with Polder-1 Sensor: Scopes and Limitations

Fernando Paz Pellat<sup>1‡</sup> y Edgardo Medrano Ruedaflores<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.5 Carretera México-Texcoco. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (ferpazpel@gmail.com)

---

### RESUMEN

La información espectral multi-angular (visión de un píxel desde diferentes ángulos de visión y con ángulos de iluminación solar diferentes) obtenida de sensores remotos tiene potencial para una discriminación adecuada de clases de coberturas del suelo. De acuerdo con varios esfuerzos realizados para poder analizar la capacidad de discriminación de las clases de cobertura del suelo, se introduce un marco teórico-conceptual para el análisis de la información espectral, angular y temporal (tamaño de píxel fijo). En este trabajo se explora el uso del sensor POLDER-1. La base de datos fue analizada ajustando un modelo de la función de distribución bidireccional de las reflectancias (BRDF) en las bandas espectrales disponibles, para diferentes clases de cobertura del suelo del sistema GLC2000. Los resultados experimentales muestran adecuados ajustes a nivel de píxeles y datos diarios. Con los parámetros ajustados del modelo de la BRDF se analizó el potencial de discriminación usando espacios espectrales de las bandas de la región del rojo e infrarrojo cercano, utilizando diferentes resoluciones temporales y espaciales (agrupación de píxeles). Los resultados mostraron alta confusión (traslapes de posición en espacios espectrales), detectándose limitaciones de dichos enfoques para el caso de confusiones debidas a mezclas de clases o causadas por la dinámica temporal de las mismas. Al final se define un esquema para aproximar la clasificación de la vegetación al acoplar la información disponible en los sensores ópticos y las clases que pueden ser discriminadas.

**Palabras clave:** BRDF; MUPB; GLC2000; reflectancias normalizadas; parámetro  $g$  y  $G$ ; discriminación.

### SUMMARY

Multi-angular spectral information (vision of a pixel from different viewing angles and different solar illumination angles) obtained from remote sensing has the potential to discriminate adequately land cover classes. According to several efforts to analyze the capacity of discrimination of land cover classes, a conceptual theoretical framework for the analysis of the spectral, angular and temporal information (fixed pixel size) is introduced. In this paper the use of the POLDER-1 sensor is explored. The database was analyzed by fitting a model function of bidirectional reflectance distribution (BRDF) over bandwidths available for different classes of land cover GLC2000 system. Experimental results show appropriate adjustments on pixel-level daily data. With the set parameters of the BRDF model the potential for discrimination using spectral band spaces, red and near infrared bands, with different temporal and spatial resolution (pixel group) were analyzed. The results were highly confusing (position overlaps in spectral spaces), pointing to limitations of such approaches because of confusion caused by mixtures of classes or their temporal dynamics. At the end, a scheme is defined to approximate the vegetation classification by coupling the information available on optical sensors and classes that can be discriminated.

**Index words:** BRDF; BUPM; GLC2000; normalized reflectances;  $g$  and  $G$  parameter; discrimination.

### INTRODUCCIÓN

La clasificación de las coberturas del suelo o biomas a escalas regionales o globales ha sido uno

---

#### Como citar este artículo:

Paz Pellat, F. y E. Medrano Ruedaflores. 2016. Discriminación de coberturas del suelo usando datos espectrales multi-angulares del sensor POLDER-1: Alcances y limitaciones. Terra Latinoamericana 34: 187-200.

---

Recibido: febrero de 2014. Aceptado: noviembre de 2015.

Publicado en Terra Latinoamericana 34: 187-200.

de los objetivos de la tecnología de sensores remotos a bordo de plataformas espaciales. La información de dichos sensores se utiliza para analizar patrones que permiten discriminar clases de vegetación. Los patrones que pueden usarse son los espectrales, polarización de ondas electromagnéticas, temporales, espaciales y multi-angulares (Diner *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2002a, b).

Uno de los sensores que ha sido empleado para clasificar la vegetación es el AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), con resolución espacial a nadir de 1.1 km, del cual han estado disponibles diferentes versiones desde 1978 (NOAA, 2006). Actualmente, el sensor MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) con resolución a nadir de 250, 500 y 1000 m, en operación desde 2000, es usado intensivamente en el mapeo de la vegetación a escalas locales y globales (Hu *et al.*, 2007). Ambos sensores son de barrido ancho, por lo que los píxeles en una escena son vistos con diferentes ángulos cenitales de visión e iluminación solar, lo que genera un problema de geometría sol-sensor. La información multi-angular asociada a la vegetación, que conforma dicha geometría, ha sido la base para el desarrollo de sensores operacionales, como el POLDER (*POLarization and Directionality of Earth Reflectances*), que tiene hasta 14 ángulos de observación y una resolución espacial de alrededor de 7 km; el sensor ATSR-2 (*Along-Track Scanning Radiometer*) con dos ángulos de visión y una resolución de 1 km; y, el sensor MISR (*Multi-angle Imaging Spectro Radiometer*), con 9 ángulos de visión y resolución espacial de 275 m a 1.1 km.

Los objetos sobre la superficie terrestre reflejan la radiación solar en forma anisotrópica, generando firmas espectrales multi-angulares características, que pueden usarse para clasificar la vegetación y caracterizar sus atributos (Diner *et al.*, 1999; Asner, 2000). Así, la función de distribución bidireccional de la reflectancia o BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) define los patrones multi-angulares asociados a los objetos terrestres. En realidad, las mediciones experimentales en tierra y a bordo de plataformas espaciales lo que observan es la función de distribución bi-cónica de la reflectancia (Schaeppman-Strub *et al.*, 2006), aunque es práctica común usar el término BRDF para esta situación.

El sensor POLDER-1 a bordo de la plataforma ADEOS-1 (*Advanced Earth Observing System*) (Deschamps *et al.*, 1994) ofrece una excelente

oportunidad de mapear los usos del suelo a escala global. POLDER-1 permite obtener hasta 14 mediciones de un blanco terrestre, cada una con diferentes ángulos de visión. El sensor observa la superficie terrestre con ángulos de visión de  $\pm 50^\circ$  a lo largo de su trayectoria orbital y de  $\pm 61^\circ$  en la dirección perpendicular, considerando la curvatura de la superficie terrestre. La longitud del área de barrido del sensor es de 2400 km, con dimensiones de los píxeles a nadir de  $6 \times 7$  km (Hautecoeur y Leroy, 1998). POLDER-1 estuvo operacional por un periodo corto de tiempo y la información disponible es una base de datos para un periodo de ocho meses, de noviembre de 1996 a junio de 1997 (Lacaze, 2006).

La base de datos de POLDER-1 ha sido utilizada para el análisis de los patrones de la BRDF para diferentes tipos de biomas o clases de cobertura del suelo (Hautecoeur y Leroy, 1998; Bicheron y Leroy, 2000), mostrando escasas diferencias entre sí para la separabilidad de clases.

Para el sensor MODIS, Tian *et al.* (2002) y Zhang *et al.* (2002a) han planteado que los patrones de los biomas definidos por Myneni *et al.* (1997) en función de propiedades ópticas y biofísicas radiativamente diferentes, pueden diferenciarse en el espacio espectral de la banda del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC), especialmente para clases con alta pureza (no mezclas) y escalas espaciales moderadas (alrededor de 1 km). Al incrementarse la resolución espacial (por ejemplo: km) o reducirse la pureza, la confusión entre clases se incrementa. Dicho efecto espacial (mezclas) se propaga a las categorías definidas en la clasificación (Ju *et al.*, 2005), generando problemas de discriminación. Así, al utilizar dos bandas espectrales, potencialmente se puede discriminar a la vegetación, aunque al incrementarse el número de bandas se puede lograr mejores resultados, dentro de límites. Price (1990 y 1992) ha demostrado que la información espectral hiperespectral es altamente redundante y solo unas cuantas bandas son suficientes para caracterizar la vegetación. Barnsley *et al.* (1997) plantearon que para una banda espectral el uso de dos ángulos de visión de las reflectancias permite obtener adecuadas discriminaciones de las clases de vegetación, donde la banda del IRC ofrece mejor potencial. Dichos autores plantean que la capacidad para discriminar vegetación es función de la separabilidad espectral intrínseca de las clases y de las diferencias en los patrones angulares. Esto es, si en el espacio espectral del R-IRC no se discriminan clases,

la información multi-angular tiene poco impacto. No obstante lo anterior, Hyman y Barnsley (1997) muestran para una escena agrícola simple que el uso de todas las bandas multi-espectrales con un ángulo de visión a nadir genera una precisión de clasificación similar a la obtenida por una banda espectral y diferentes ángulos de visión, particularmente si se usan las bandas del infrarrojo cercano o medio.

### Modelos de la BRDF y Discriminación de la Vegetación

En términos operacionales, para modelar la BRDF se ha planteado el uso de modelos semi-empíricos lineales (MSL) (Wanner *et al.*, 1995), definidos como:

$$R = k_0 + k_1 f_{geo} + k_2 f_{vol} \quad (1)$$

donde: R es la reflectancia (cualquier banda),  $f_{geo}$  es el kernel (función matemática) asociado a la geometría óptica (elementos sombreados e iluminados para una geometría de distribución de las plantas),  $f_{vol}$  está asociado a la contribución volumétrica del follaje de las plantas de la escena y los k son parámetros que se ajustan estadísticamente a una BRDF dada. El parámetro  $k_0$  representa las contribuciones isotrópicas de la vegetación, independientes de la geometría sol-sensor y son función de las propiedades ópticas (reflectancias) de las plantas y sus elementos constitutivos (Ross, 1981).

Mediante la estrategia de uso de los parámetros de los MSL en lugar de las reflectancias multi-angulares medidas, existe potencial de discriminar la vegetación (Chopping, 2000), particularmente cuando se usan dos bandas espectrales, generalmente el R e IRC. Así, Bacour y Breon (2005) analizaron la variabilidad de la BRDF para diferentes biomas a través de los parámetros de un MSL (Maignan *et al.*, 2004) tipo kernel (Wanner *et al.*, 1995), pero con la inclusión de un término asociado al *Hot Spot* (coincidencia de los ángulos cenitales solares y de visión), que hace que la curvatura de la BRDF se incremente cerca del Hot Spot (HS). Dichos autores mostraron que el uso de los patrones de los parámetros, particularmente  $k_0$ , del modelo entre un par de bandas (R e IRC) permite discriminar algunos biomas, aunque la confusión entre clases se mantiene. Los autores mencionados

previamente analizaron la base de datos de POLDER-1 y utilizaron un procesamiento de la misma con efectos residuales atmosféricos (aerosoles troposféricos) los cuales dificultaron su análisis. Resultados similares, en relación al potencial de discriminación de  $k_0$  entre el R e IRC, fueron discutidos por Anjum y Ghosh (2000).

Al utilizar las líneas de procesamiento de POLDER-1 diferentes a las de la base estándar previamente mencionada, Leblanc *et al.* (2005) y Chen *et al.* (2005) ajustaron e invirtieron modelos de transferencia radiativa de óptica geométrica para analizar las firmas de la BRDF en el HS, con la finalidad de discriminar biomas usando sus patrones, con resultados alentadores. En tal estrategia de uso de los patrones del HS para discriminar clases de vegetación, Grant *et al.* (2004) encontraron que al analizar la amplitud del HS, como modelo particular, en el espacio del R-IRC usando el sensor POLDER, es posible caracterizar a las diferentes clases analizadas.

Por su parte, en un formato de espacios espectrales, Zhang *et al.* (2002a, b) plantearon que la variación multi-angular de los biomas (fundamentalmente bosques de hoja ancha y aciculares, matorrales, y cultivos de hoja ancha y cereales) de acuerdo a Myneni *et al.* (1997) definen patrones específicos que permiten separarlos espectral y angularmente; con excepción de los biomas cultivos y pastizales, que muestran traslapes. Dicha estrategia de caracterización de biomas es usada operacionalmente por el sensor MODIS. Los citados autores utilizaron espacios espectrales (R-IRC, principalmente) y mostraron que las clases de vegetación (radiativamente diferentes) están diferenciadas en función de su localización en el espacio espectral y tres métricas: inclinación o pendiente (p), longitud (l) e intercepción (m) de los patrones cuasi-lineales en ese espacio (Figura 1a).

El ejemplo de la Figura 1a considera el promedio de mediciones multi-angulares en un determinado periodo, generalmente menor o igual a un mes, donde las variaciones de los biomas no son marcadas. El efecto temporal en la localización de los patrones lineales de la Figura 1 debe considerarse al discriminar biomas, particularmente los asociados a biomas con crecimiento marcado o cambio de sus propiedades (por ejemplo pastizales, cultivos, bosque caducifolio, etc.). Hu *et al.* (2007) por ejemplo, mostraron cómo varían las líneas multi-angulares, mes por mes, para el caso

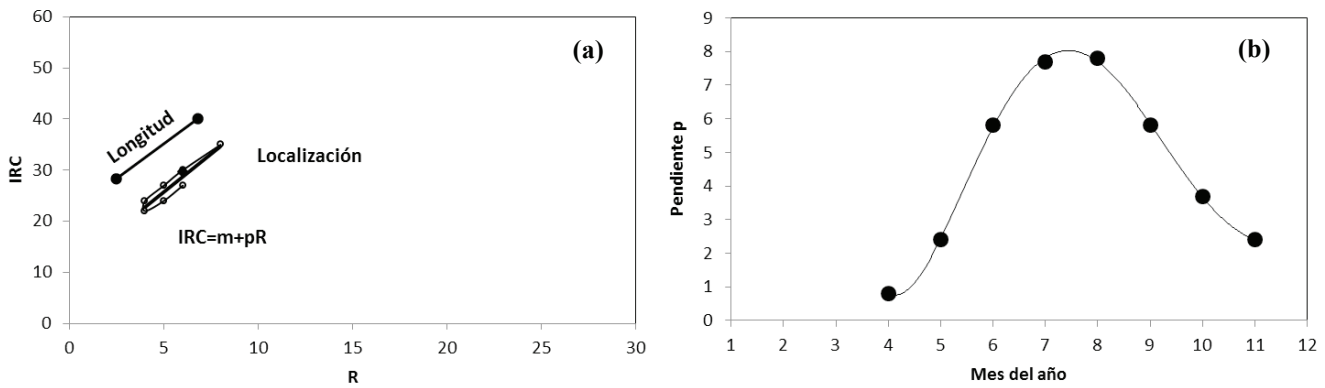


Figura 1. (a) Ejemplo de patrón multi-angular de un bosque de hoja ancha caducifolio y su caracterización; y, (b) variación mensual de la pendiente  $p$  para un bosque de hoja ancha caducifolio (modificado de Hu *et al.*, 2007).

de un bosque de hoja ancha caducifolio. La pendiente  $p$  de las líneas rectas se muestra en la Figura 1b, donde el intercepto  $m$  es prácticamente cero en todos los meses, donde queda claro que al considerar el tiempo en la discriminación de la vegetación, las estrategias de usar solo una fecha puede generar confusiones, lo que depende de la forma en que los biomas divergen o convergen en sus patrones temporales.

Los análisis mostrados sugieren la necesidad de una estrategia de discriminación de clases de la vegetación usando en forma conjunta información espectral, multi-angular y temporal (dejando la parte espacial como fija, en un enfoque píxel por píxel o en agrupaciones espaciales homogéneas de clases).

En este trabajo se analiza la base de datos de POLDER-1, con correcciones atmosféricas completas (Lacaze, 2006), asociada a un sistema global de clases de uso del suelo, por lo que los efectos de contaminación atmosférica y otro tipo de efectos han sido reducidos, esperando tener BRDFs más adecuadas.

Para sintetizar el análisis de patrones espectrales multi-angulares se ajustó un modelo uni-paramétrico de la BRDF (MUPB) desarrollado por Bolaños y Paz (2010) para el caso de ángulos cenitales y extendido para el caso de geometrías completas de visión-iluminación. Los análisis de discriminación se realizaron usando en forma conjunta reflectancias, BRDF y patrones temporales, planteando los alcances y limitaciones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Modelo Uni-Paramétrico de la BRDF

El modelo uni-paramétrico de la BRDF o MUPB plantea un esquema de modelación diferente al usado

actualmente en las aplicaciones operacionales de los sensores remotos, ya que considera una simetría especial (Hot Spot) que simplifica la modelación de la BRDF a un solo parámetro, siendo necesario un solo dato, aplicable a nivel de píxel por píxel para el caso de una imagen satelital y para cualquier fecha. El MUPB fue inicialmente planteado con una simetría diferente para las bandas espectrales (Bolaños *et al.*, 2007) y después generalizado a una simetría única para todas las bandas (Bolaños y Paz, 2010):

$$\chi = 90 - \theta_v + \theta_s$$

$$R_n = f(R) \cos(\chi)$$

$$\chi = a - gR_n$$

$$f(R) = R, \text{ sin efecto de escala}$$

$$f(R) = \ln(R), \text{ con efecto de escala}$$

(2)

donde:  $\theta_v$  es el ángulo cenital de visión,  $\theta_s$  es el ángulo cenital solar de iluminación,  $R$  es la reflectancia de cualquier banda espectral,  $g$  es el parámetro de la BRDF,  $a = 90^\circ$ ,  $R_n$  es reflectancia normalizada,  $\chi$  es una variable de posición angular. La función  $f(R)$  puede ser dependiente del efecto de escala (cambio en las dimensiones de las áreas de visión; típico en mediciones de campo y laboratorio o de sensores remotos de visión multi-angular o barrido ancho, tal como MODIS, AVHRR, MISR, POLDER) o no (típico de simulaciones radiativas). En lo general, el uso de la función logarítmica en  $f(R)$  resulta en adecuados ajustes experimentales para ambos casos.

El modelo de la BRDF definido por la ecuación (2) puede ser extendido al caso de ángulos acimutales, bajo los mismos argumentos (Paz y Medrano, 2015):

$$d\varphi = \varphi_v - \varphi_s$$

$$\text{Si } d\varphi \leq 180, d\varphi_p = d\varphi$$

$$\text{Si } d\varphi > 180, d\varphi_p = 360 - d\varphi$$

$$\text{Si } d\varphi_p \leq 90, \zeta = d\varphi_p + \theta_s$$

$$\text{Si } d\varphi_p > 90, \zeta = d\varphi_p - \theta_s$$

$$gn = g \cos(\zeta)$$

$$\zeta = A - G(gn) \tag{3}$$

donde:  $\varphi_v$  es el ángulo acimutal de visión,  $\varphi_s$  es el ángulo acimutal solar de iluminación, G es el parámetro de la BRDF y  $A = 90^\circ$ .

El sistema de ecuaciones (2) y (3) puede replantearse como ( $a=90, A=90$ ):

$$f(R) = G \left( \frac{90 - \chi}{90 - \zeta} \right) \left[ \frac{\cos(\xi)}{\cos(\chi)} \right] \tag{4}$$

que para el caso de una definición generalizada de reflectancias normalizadas, queda como:

$$Rn = G(90 - \chi)\cos(\xi)$$

$$Rn = f(R)\cos(\chi)(90 - \xi) \tag{5}$$

El MUPB permite parametrizar la BRDF con un solo parámetro: g para el caso de solo ángulos cenitales (visión a nadir) o G para el caso general. Las constantes a y A son iguales a  $90^\circ$ , producto de la simetría introducida por las variables de posición  $\chi$  y  $\zeta$ .

### Patrones espectrales, Angulares y Temporales de la Vegetación

Para visualizar los patrones espectrales, angulares asociados a las clases de vegetación, la Figura 2 muestra simulaciones radiativas asociadas al crecimiento de un cultivo agrícola (misma geometría sol-sensor, ángulo de visión a nadir) con diferentes propiedades ópticas del suelo, bajo el cultivo que sostiene (Paz *et al.*, 2005). El tiempo de crecimiento del cultivo está definido en los espacios espectrales como cambios en el índice de área foliar (IAF) u otra variable biofísica asociada.

En el espacio del R-IRC (Figura 2a), el crecimiento del cultivo parte de una línea del suelo (IAF) hasta un IAF de 12 (follaje muy denso). El patrón de las líneas iso-IAF, mismo IAF y en diferentes tipos de suelo, es de alejamiento de la línea del suelo y reducción de las longitudes de éstas a medida que el IAF se incrementa, hasta el punto donde la banda del R se satura (no cambia de valor), representando un medio ópticamente denso definido por reflectancias en el infinito o  $R_\infty$  (Ross, 1981), donde los fotones no chocan con el suelo (equivalente a un medio con un suelo oscuro u ópticamente absorbente). El IRC sigue creciendo hasta alcanzar su propio valor de saturación en  $IRC_\infty$ .

Al dejar fijo al suelo, el crecimiento de la vegetación se manifiesta a través de curvas iso-suelo (Figura 2a), en donde el factor tiempo está implícito en los espacios espectrales.

El uso del espacio del R-IRC obedece a que en este espacio existe mayor contraste entre bandas para

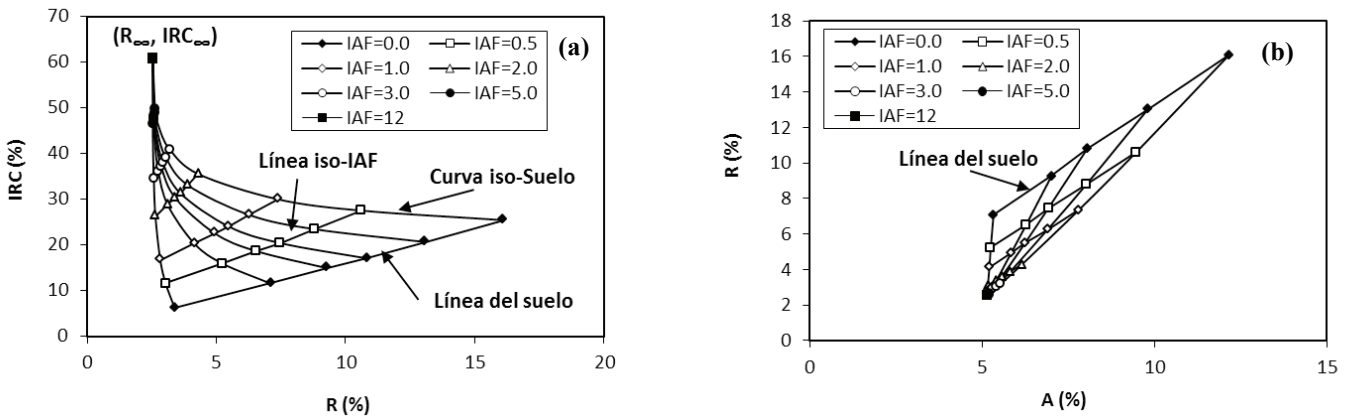


Figura 2. Simulaciones radiativas del crecimiento, variación del IAF (índice de área foliar) de un cultivo agrícola. (a) espacio del R (rojo)-IRC (infrarrojo cercano) y (b) espacio del A (azul) -R (rojo).

el sistema suelo-vegetación (Tucker, 1979). Si se usan bandas del visible, el contraste es menor y difícil de usar para discriminar vegetación. La Figura 2b muestra el espacio del azul (A) y R, donde las curvas iso-IAF se vuelven lineales.

De las relaciones (2) del MUB, es posible estandarizar una geometría sol-sensor para analizar los patrones espectrales del crecimiento de la vegetación en forma interoperable. Para ello se usan las relaciones ( $a=90$  y  $A=90$ ), derivadas de las relaciones (2):

$$Rn = \frac{90 - \chi}{g}$$

$$g = \frac{gn}{\cos(\zeta)}$$

$$gn = \frac{90 - \zeta}{G} \tag{6}$$

donde: Rn es una reflectancia para una geometría cenital definida por  $\chi$  y  $\zeta$ .

La Figura 3a muestra los patrones espectrales en el espacio Rn-IRCn para  $d\phi = 0$ ,  $\theta v = 0$  y  $\theta s = 30$ , para el caso sin efecto de escala, mismas simulaciones de la Figura 1a. Los valores de Rn se multiplicaron por -1 para mostrarlos en el cuadrante positivo. La Figura 3b muestra el espacio g R - g IRC para el mismo caso,

donde se eliminó la curva iso-suelo asociada al más oscuro, para mejorar la visualización. El parámetro g define íntegramente las variaciones de diferentes geometrías sol-sensor (Figura 1<sup>a</sup>) en un solo valor, lo cual es una forma compacta de analizar el BRDF en forma completa (caso de variaciones de ángulos cenitales). Se observa de estas figuras, sin efecto de escala, que los espacios estandarizados o del BRDF, conservan las métricas de separabilidad del crecimiento de la vegetación.

Los patrones espectrales de las simulaciones de la Figura1a se muestran en las Figuras 3c y d, en este caso considerando el efecto de escala (transformación logarítmica, para compensar del incremento del tamaño del píxel con el ángulo cenital de visión). La Figura 3c muestra el espacio Rn-IRCn y la Figura 3d el espacio g R - g IRC.

En las Figuras 3c y d se aprecia que los patrones son similares a los de las Figuras 3a y b, pero con una reducción de la separabilidad, la cual es aparente, ya que la transformación logarítmica mantiene métricas proporcionales.

Como evidencia experimental de campo, la Figura 4 muestra patrones espectrales y de la BRDF para el caso de mediciones de reflectancias de maíz (Bausch, 1993). Las Figuras 4a y c muestran los patrones normales del

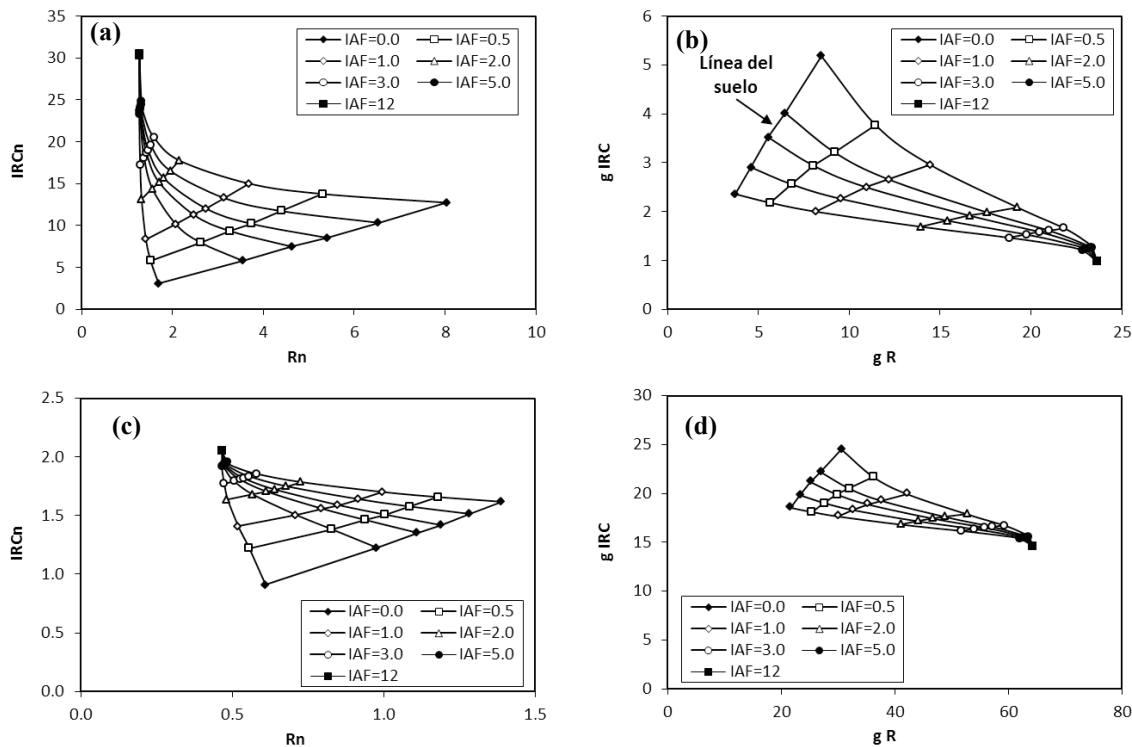


Figura 3. Simulaciones radiativas para el caso de efecto de escala (a y b) y sin él (c y d).

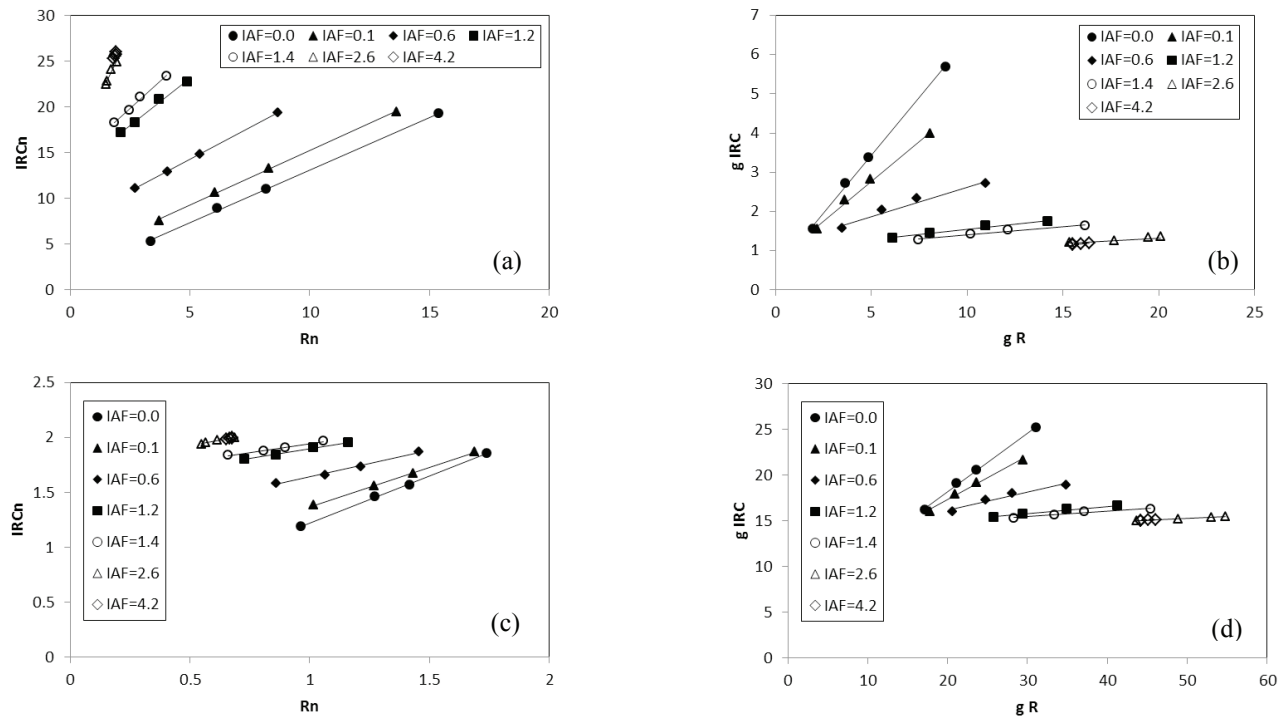


Figura 4. Mediciones en campo para el caso de efecto de escala (a y b) y sin él (c y d).

crecimiento de los cultivos en el espacio Rn-IRCn.

En la Figura 4b y d se observa, con o sin efecto de escala, que las líneas iso-IAF para valores mayores a 2 son casi horizontales, donde el valor de g IRC asociado define un criterio de clasificación sin efecto del suelo, lo cual se presenta en los valores de g R.

Al utilizar el MUPB en experimentos con maquetas arbóreas, Cano *et al.* (2009) mostraron que las relaciones g R – g IRC pueden discriminar especies arbóreas con diferentes tipos de hojas, dejando fijo el suelo y la cobertura aérea de la vegetación. La relación entre las relaciones lineales de las g del R-IRC, en diferentes suelos, con la cobertura aérea puede ser usada para diferenciar patrones de crecimiento de las especies arbóreas, para valores donde la cobertura no sea muy baja (menor al 20%). Asimismo, dichos autores encontraron que el uso del espacio Rn-IRCn reduce las confusiones observadas en reflectancias provenientes de diferentes geometrías sol-sensor.

#### Base de Datos Multi-Angulares de POLDER-1 y su Proceso

La base de datos de POLDER-1 está documentada en Lacaze (2006) y disponible en internet (<http://toyo.mediasfrance.org/?POLDER-1-BRDF-Data->

Base-V-2-00). Dicha base de datos está geolocalizada, con remoción de nubes y corrección atmosférica completa. Consta de 24 857 BRDFs (concepto general para ángulos de visión diferentes, para un periodo de un mes) asociados a las bandas espectrales centradas ( $\mu\text{m}$ ) en 443, 565, 670 (R), 765 y 865 (IRC); donde las bandas 443, 670 y 865 miden la polarización de la radiación incidente. Para cada medición de reflectancias existe la información de la geometría sol-sensor, fecha de toma y clase de cobertura del suelo.

La información de la base de datos de POLDER-1 está diferenciada por clases de cobertura del suelo de acuerdo con el sistema GLC2000 (*Global Land Cover 2000*) (JRC, 2003), el cual consta de 22 clases (Cuadro 1). Los archivos de datos para cada clase de cobertura del suelo tienen asociado el índice de vegetación de diferencia normalizada  $\text{NDVI} = (\text{IRC} - \text{R}) / (\text{IRC} + \text{R})$ , que oscila de -0.2 a 1 en intervalos de 0.1, como una medida de la cantidad de vegetación en un píxel dado.

En los análisis realizados, el MUPB se ajustó a nivel diario para cada píxel de la base de datos. El ajuste fue realizado considerando los ángulos  $\zeta$  y  $\chi$  de las mediciones acimutales para estimar el parámetro G (caso de efecto de escala). Con G se estimó g y Rn (estandarización con  $d\phi = 0$ ,  $\theta_v = 0$ ,  $\theta_s = 40$ ).



El procedimiento numérico consistió en determinar el parámetro G (A se estimó en la regresión, para analizar el efecto de los ajustes en esta constante) para el caso de las reflectancias asociadas a diferentes valores acimutales.

Una síntesis de la base de datos de POLDER-1, con el número total de días procesados, así como el total de valores de reflectancias (misma cantidad para todas las bandas) se muestra en el Cuadro 1.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ajustes del MUPB a nivel diario fueron realizados considerando dos casos, con  $P > 0.05$ : (1)  $R^2 \geq 0.97$  y A: [87, 93] para las reflectancias R765 y R865 y, (2)  $R^2 \geq 0.95$  y A: [84, 96] para las reflectancias R565 y R670, incluidas las R765 y R865. En lo general, los casos de  $\chi = 90^\circ$ ,  $\zeta = 90^\circ$  (casos degenerados del MUPB para reflectancias no normalizadas), reflectancias con

errores,  $|G| > 60$  y valores con patrones contrarios de Rn (diferente signo entre el medido y el estimado) no se consideraron en los análisis. Dichos casos representan entre el 5 y 15% para las clases de cobertura del suelo de la base de datos. Para los casos (1) y (2), alrededor del 90% de la base usada en los ajustes experimentales cumplió con las condiciones impuestas.

### Espacio Espectral-Angular del R765-R865 y R670-R865 usando Promedios Mensuales

Se realizó un primer análisis para considerar una agrupación por mes de las variables asociadas de la BRDF (Rn estandarizadas a la geometría sol-sensor definida y los parámetros G y g del MUPB). Para cada clase de cobertura se realizaron regresiones lineales para estimar el intercepto (Ad) y pendiente (Bd) de las bandas R765 y R865 empleando valores a nivel diario. Con los parámetros Ad y Bd a nivel mensual, se realizó

**Cuadro 1. Sistema GLC2000 y base de datos de POLDER-1 asociada (escala mundial).**

Clase	Descripción	No. Días	No. Datos
1	Cobertura arbórea, hoja ancha, perenne	15 446	196 752
2	Cobertura arbórea, hoja ancha, caducifolio, cerrado	25 276	323 972
3	Cobertura arbórea, hoja ancha, caducifolio, abierto	17 108	219 317
4	Cobertura arbórea, hoja acicular, perenne	25 710	333 962
5	Cobertura arbórea, hoja acicular, caducifolia	5888	91 996
6	Cobertura arbórea, tipo mixto de hoja	17 938	243 124
7	Cobertura arbórea, regularmente inundado, agua dulce	2241	27 349
8	Cobertura arbórea, regularmente inundado, agua salina (variación diaria)	7896	96 332
9	Mosaico: cobertura arbórea / otra vegetación natural	11 780	158 131
10	Cobertura arbórea, quemado	4272	65 604
11	Cobertura arbustiva, cerrado-abierto, perenne (con o sin un estrato arbóreo disperso)	21 117	272 225
12	Cobertura arbustiva, cerrado-abierto, caducifolio (con o sin un estrato arbóreo disperso)	28 486	362 219
13	Cobertura herbácea, cerrado-abierto	27 567	359 340
14	Cobertura herbácea dispersa o arbustiva dispersa	26 351	344 694
15	Cobertura arbustiva regularmente inundada o cobertura herbácea	19 330	254 203
16	Áreas cultivadas y manejadas	29 039	367 610
17	Mosaico: cultivo / cobertura arbórea / otra vegetación natural	15 873	203 116
18	Mosaico: cultivo / cobertura arbustiva o herbácea	22 119	283 877
19	Áreas desnudas	20 090	257 579
20	Cuerpos de agua (natural y artificial)	27 578	366 565
21	Nieve y hielo (natural y artificial)	7579	118 558
22	Superficies artificiales y áreas asociadas	16 136	205 074
Total		394 820	5 151 599

una regresión lineal para los patrones de todos los meses y determinar un solo patrón para todos: variable  $R865 = Am + Bm$  variable  $R765$

La Figura 5 muestra las variaciones diarias a nivel mensual de  $R765n$  y  $R865n$ , donde  $Ad$  y  $Bd$  varían mes a mes, dentro de límites pequeños. En la Figura 6 se muestran las relaciones  $Am$  y  $Bm$  para todas las clases de coberturas.

De acuerdo con la Figura 6, las clases 5 (bosque acicular caducifolio), 21 (nieve y hielo), 9 (mosaico de bosque y otro tipo de vegetación natural) y 4 (bosque

acicular perenne) son las clases más separables, usando el parámetro  $G$  y  $g$ . El resto de las clases pueden separarse por grupos.

Aunque al parecer el uso de las variables asociadas a la BRDF en el espacio  $R765$ - $R865$  muestra un potencial de discriminación de clases de cobertura, al observar los valores de  $Am$  de la Figura 6, es claro que los mismos están muy cercanos entre sí, por lo que son poco útiles. Ello es más evidente en la Figura 7 donde se muestran los valores de  $R765n$  y  $R865n$  para la clase 1 (bosque de hoja ancha perenne) discutida

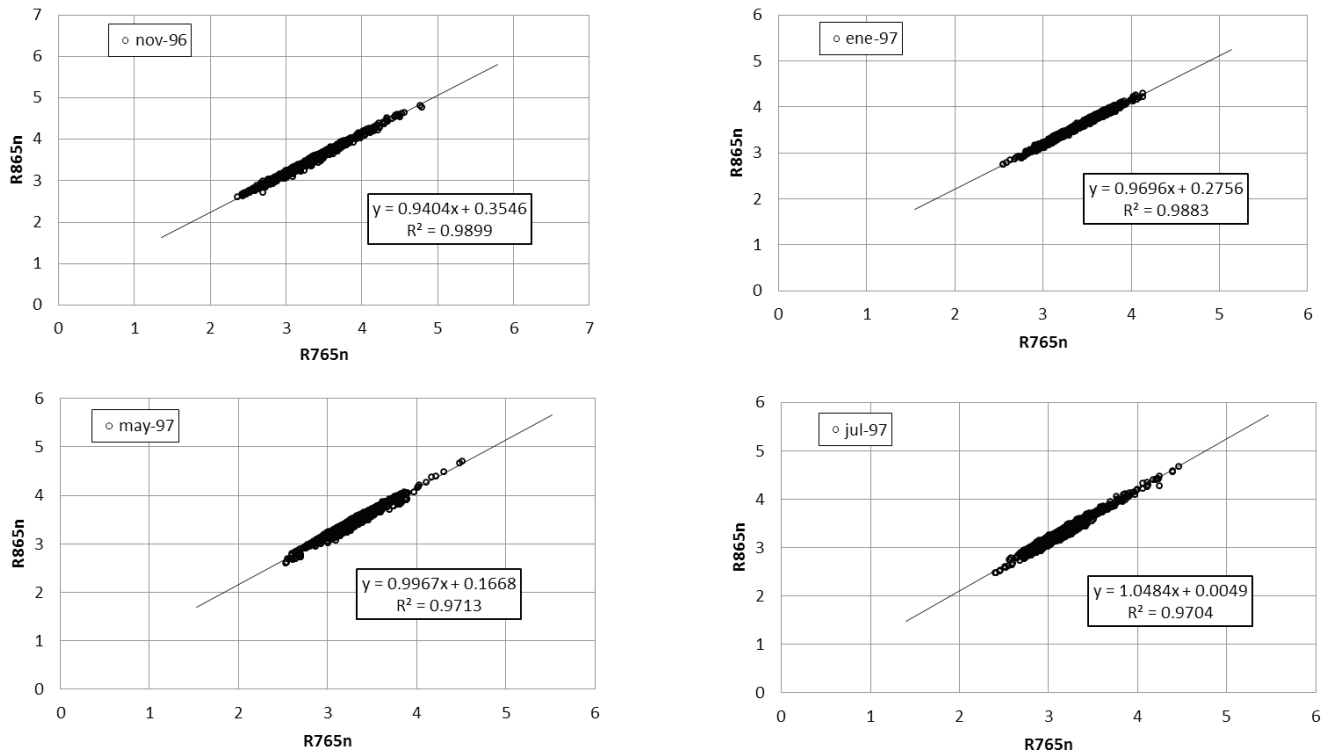


Figura 5. Variación mensual de la relación  $Ad$  y  $Bd$  para la clase 1 (bosque de hoja ancha, perenne), en el espacio  $R765n$ - $R865n$ .

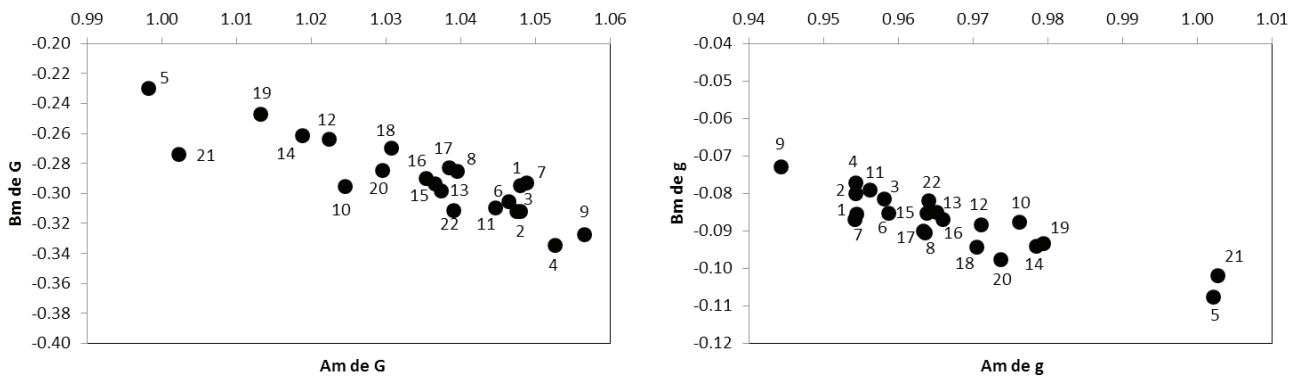


Figura 6. Relación entre los parámetros  $Am$  y  $Bm$  para todas las clases de coberturas.

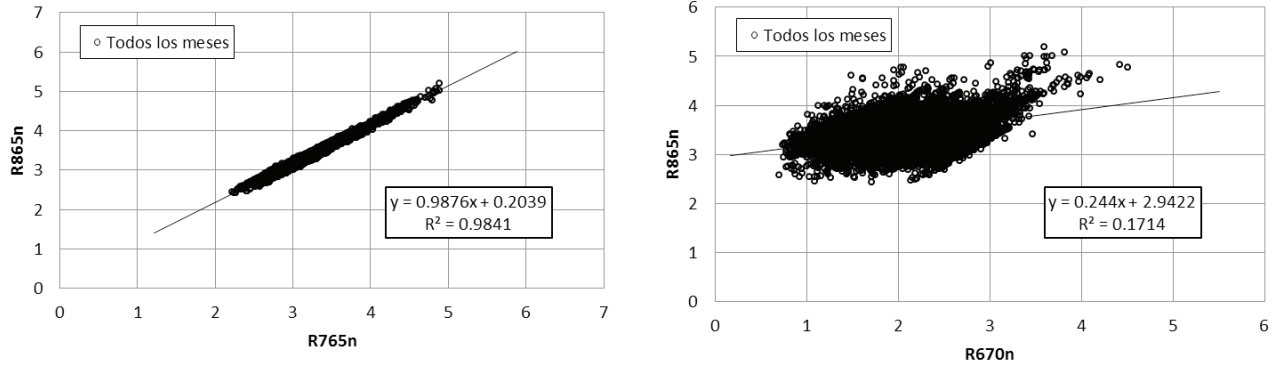


Figura 7. Patrones espectrales con una geometría sol-sensor estandarizada para los espacios R765n-R865n y R670n-R865n, para la clase 1 (bosque de hoja ancha perenne) de cobertura del suelo.

previamente, donde se observa que dichas bandas están altamente correlacionadas (algo similar sucede al comparar dos bandas del visible). En el caso de las bandas contrastantes del R (R670) e IRC (R865), la Figura 7 muestra esta situación para la misma clase 1.

La Figura 8 muestra las variaciones mensuales de la clase 1 en el espacio R670n-R865n, donde se observan mezclas de vegetación y diferentes estados del crecimiento de la misma.

### Espacio Espectral-Angular del R670-R865 a Nivel de Píxeles y Datos Diarios

Para evitar hipótesis de homogeneidad temporal (promedios mensuales) o espacial (agrupaciones de píxeles de una clase de cobertura), se analizaron los patrones espectrales-angulares (tiempo implícito) a nivel diario con píxeles individuales en cada clase de cobertura definida. La Figura 9 muestra un ejemplo de

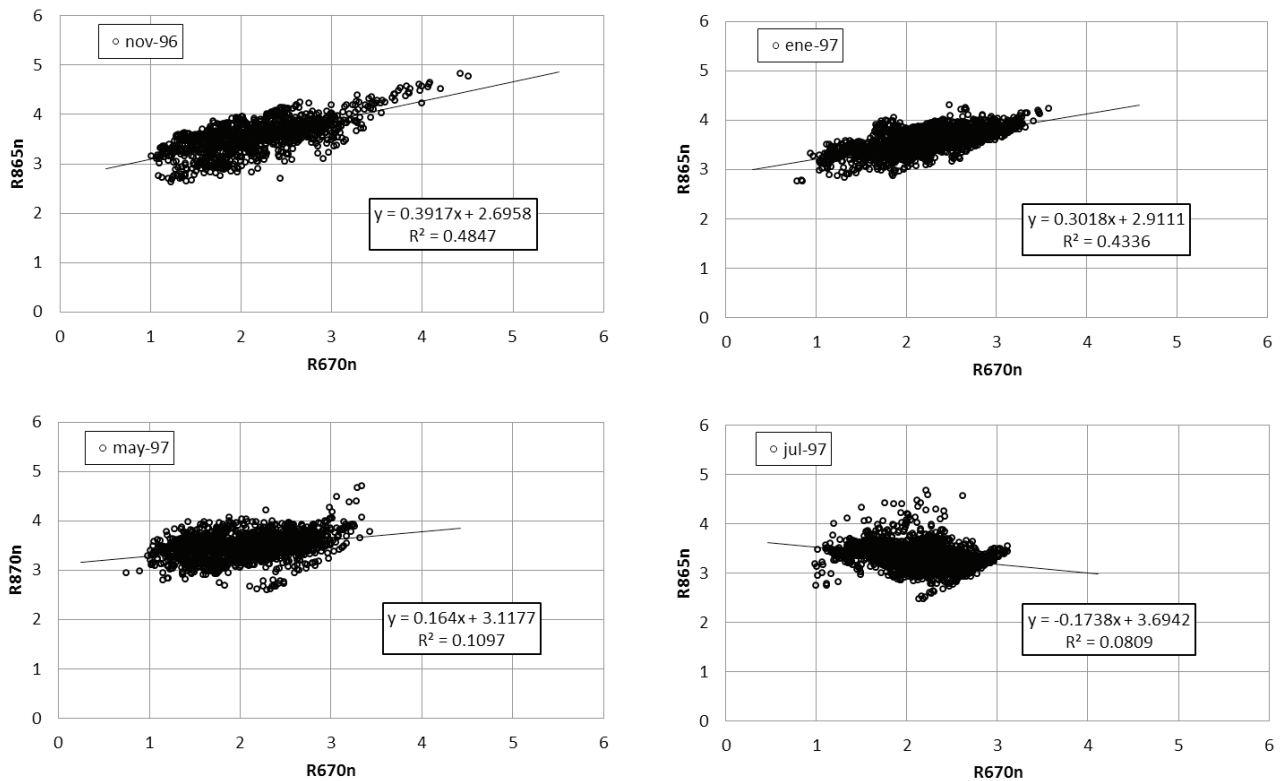


Figura 8. Variación mensual de la relación Ad y Bd para la clase 1 (bosque de hoja ancha perenne), en el espacio R670n-R865n.

seis clases (4 = bosque acicular perenne, 13 = cobertura herbácea, 16 = cultivos, 10 = bosque quemado, 19 = área desnuda y 21 = nieve y hielo), donde la región R670n: [1, 2] y R865n: [3, 4] muestran alta confusión, aún con clases no asociadas a vegetación (áreas desnudas, nieve y hielo). La explicación de estos resultados puede tener múltiples factores que no pueden discriminarse.

Para el caso del parámetro  $g$  del espacio R670-R865, la Figura 10 muestra los patrones de  $g$  R –  $g$  IRC para las mismas clases presentadas en la Figura 9. De acuerdo con las Figuras 3 y 4, los patrones límite horizontales (vegetación densa) e inclinados (suelo desnudo o clase similar) pueden ser usados para discriminar clases. Para este análisis la confusión entre clases de cobertura prevalece, aunque menos acentuada que en el caso del espacio R670n-R865n.

### Alcances y Limitaciones de la Discriminación de Clases de Cobertura del Suelo Usando Información Satelital

Los análisis descritos anteriormente muestran que es prácticamente imposible discriminar las clases de cobertura asociadas al sistema GLC2000 dada la alta confusión en los espacios espectrales, angulares y temporales. En apariencia, la confusión es producto de mezclas de clases de cobertura, pero también es debido a la alta variabilidad temporal (desde suelo con poca vegetación hasta vegetación densa). En esta perspectiva el sistema de clasificación de las coberturas a nivel terrestre no está acoplado con las posibilidades reales de la tecnología de los sensores remotos ópticos, ya que no se considera el conocimiento de los patrones

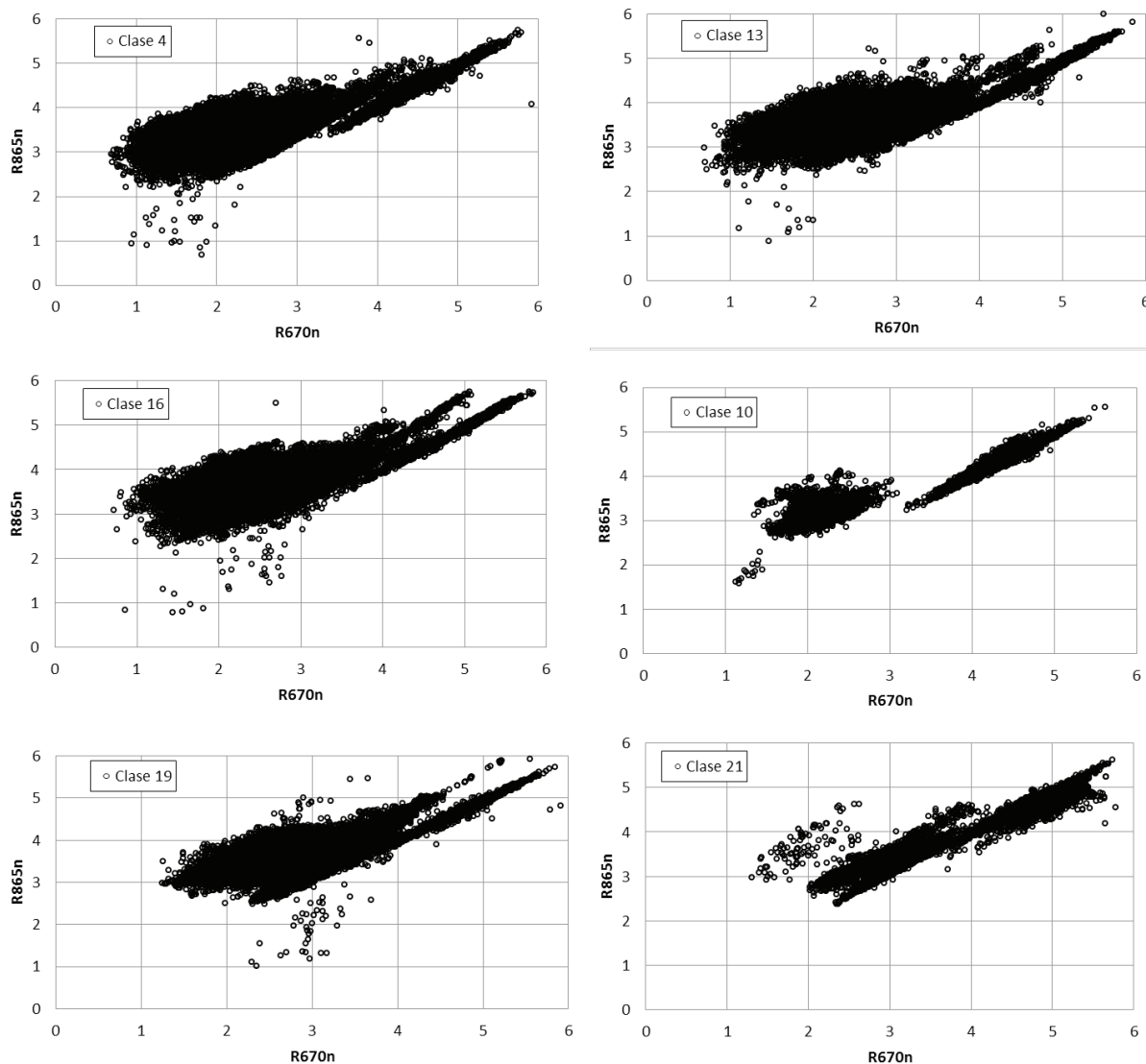


Figura 9. Patrones espectrales-angulares (tiempo implícito) del espacio R670n-R865n para seis clases de cobertura del suelo.

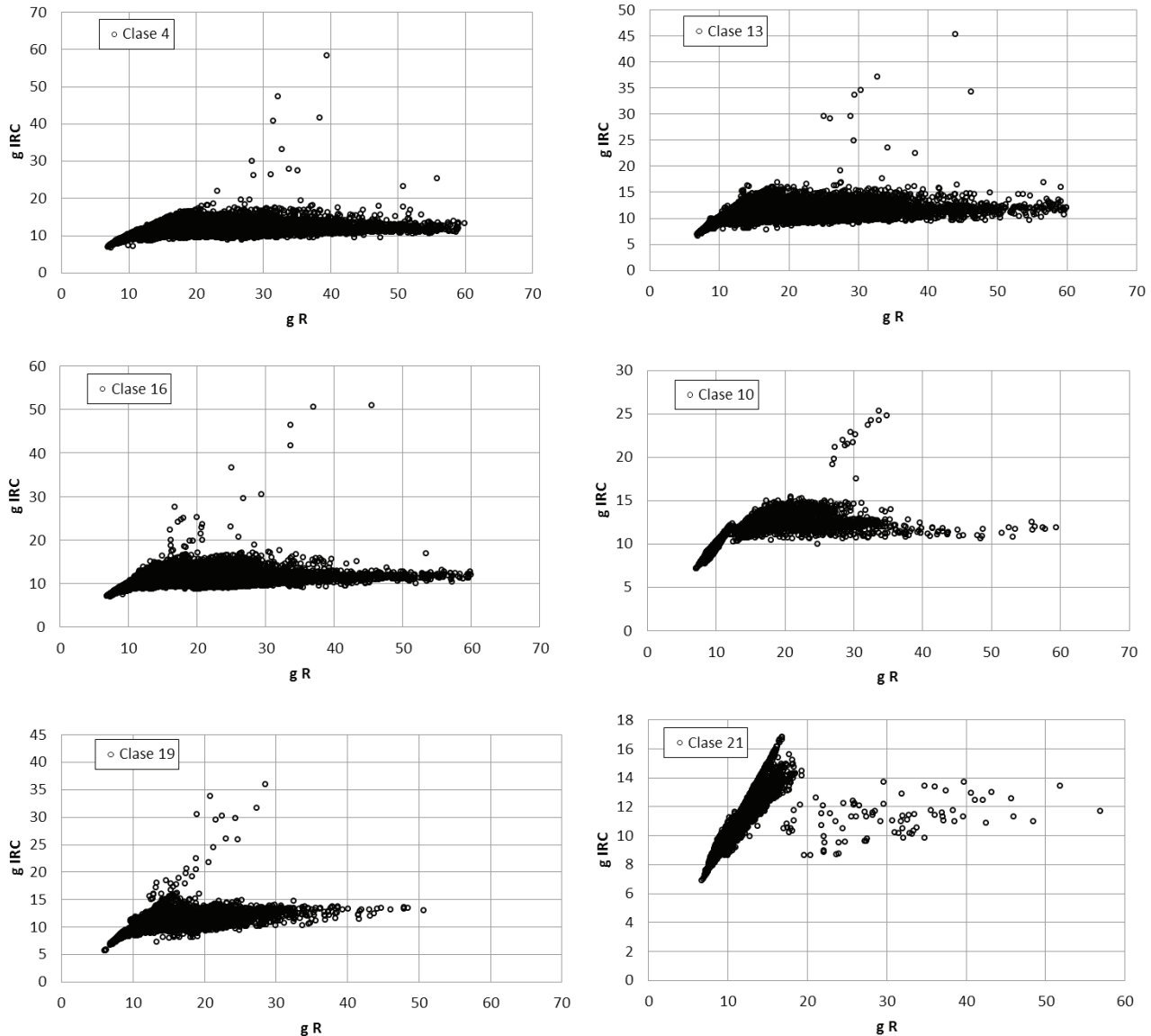


Figura 10. Patrones espectrales-angulares (tiempo implícito) del espacio  $g R_{670} - g R_{865}$  para seis clases de cobertura del suelo.

temporales del crecimiento del follaje y se espera que la tecnología satelital resuelva el problema de clasificación. En consecuencia, las limitaciones de este tipo de enfoques están fuertemente correlacionadas con los esquemas de clasificación usados y su armonización a las capacidades de discriminación de los sensores remotos.

Para discriminar clases de cobertura del suelo o biomas, es necesario considerar esquemas de clasificación basados en sensores remotos, que optimicen la información disponible en los espacios espectrales, angulares y temporales, para una dimensión dada del píxel. De este modo, al utilizar un

esquema de discriminación de clases de la vegetación a nivel píxel por píxel, se puede plantear una estrategia general de clasificación de la vegetación (y clases de no vegetación) de acuerdo con patrones temporales de parámetros de la BRDF, patrones espectrales-temporales y condiciones de frontera.

En relación a los patrones temporales de la BRDF, como se muestra en la Figura 1b, el análisis de la evolución temporal del parámetro  $g$  del MUPB permite definir si la vegetación es perenne o caducifolia, además de clases intermedias en función de umbrales que se utilicen (por ejemplo: subcaducifolia y subperennifolia). Asimismo, de acuerdo con

la evolución temporal de  $g$  es posible discriminar entre la vegetación caducifolia o subcaducifolia en relación a los cultivos o pastizales cultivados, los cuales tienen épocas de siembra generalmente diferentes a las fechas de caducidad del follaje de la vegetación natural. Para ello se pueden emplear modelos que caractericen la evolución temporal del parámetro  $g$  de la vegetación (Jönsson y Eklundh, 2004).

Al aplicar un esquema como el definido por Paz *et al.* (2009), para el caso de vegetación herbácea, es posible analizar las trayectorias temporales (implícitas) de las reflectancias (estandarizadas) asociadas a cambios en la cantidad de la vegetación de una clase dada. De acuerdo con dicho esquema, es posible determinar las reflectancias de un tipo de vegetación, aún cuando la vegetación no forme un medio denso, permitiendo así estimar la distribución espacial y angular del follaje y sus propiedades ópticas (albedo foliar), las cuales están definidas por las reflectancias en el infinito (Paz *et al.*, 2009). En relación a las trayectorias espectrales temporales de la vegetación herbácea y arbórea, sus patrones son diferentes (Huemmrich, 2001), por lo que pueden discriminarse con facilidad.

Con la estimación de las reflectancias en el infinito (Paz *et al.*, 2009) es posible analizar dicha condición de frontera (superior) de vegetación ópticamente densa para discriminar clases de vegetación, considerando las posiciones de las reflectancias en el espacio  $R_n$ - $IRC_n$ . Asimismo, una vez conocidos los patrones temporales del crecimiento de la vegetación (herbácea o arbórea), es posible estimar las reflectancias del suelo (condición de frontera inferior), para con ello eliminar este factor de confusión.

## CONCLUSIONES

- El uso de información multi-angular de sensores remotos en plataformas espaciales ha sido argumentado como un esquema que mejora las clasificaciones de clases de coberturas de uso del suelo o biomas.
- En este trabajo se revisaron los alcances y limitaciones de discriminación de clases de cobertura del suelo del sistema GL2000, usando un modelo simple de la geometría sol-sensor dependiente de un solo parámetro y una base de datos de mediciones multi-angulares del sensor POLDER-1, en el contexto de un marco teórico-conceptual del uso de información espectral-angular y temporal, dejando fijo el tamaño de los píxeles.

Los resultados muestran que es prácticamente imposible realizar tal tarea, dada la confusión entre clases, la cual es debida a mezclas de clases y al desacoplamiento del sistema de clasificación terrestre con información que se puede obtener de la tecnología de sensores remotos.

- Se recomienda consolidar alternativas de clasificación de la vegetación acoplada a información de sensores remotos, cuya exploración enriquecerá este tipo de contribuciones.

## LITERATURA CITADA

- Anjum, V. N. S. and R. Ghosh. 2000. Angular and polarization response of vegetation, bare soil and water from ADEOS POLDER data over India. *Int. J. Remote Sens.* 21: 805-810.
- Asner, G. P. 2000. Contributions of multi-view angle remote sensing to land-surface and biogeochemical research. *Remote Sens. Rev.* 18: 137-162.
- Bacour, C. and F. M. Bréon. 2005. Variability of biome reflectance bidirectional signatures as seen by POLDER. *Remote Sens. Environ.* 98: 80-95.
- Barnsley, M. J., D. Allison, and P. Lewis. 1997. On the information content of multiple view angle (MVA) images. *Int. J. Remote Sens.* 18: 1937-1960.
- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46: 213-222.
- Bicheron, P. and M. Leroy. 2000. Bidirectional reflectance distribution function signatures of major biomes observed from space. *J. Geophys. Res.* 105: 26669-26681.
- Bolaños G., M. A. y F. Paz P. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 1: 349-361.
- Bolaños G., M. A., F. Paz, E. Palacios, E. Mejía y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 41: 527-537.
- Cano, A., F. Paz, M. Bolaños, E. Palacios, E. Mejía, J. L. Oropeza, R. Valdez, J. Chávez y A. Zarco. 2009. Sobre la clasificación de sistemas arbolados usando información espectral multi-angular. *Agrociencia* 43: 279-290.
- Chen, J. M., C. H. Menges, and S. G. Leblanc. 2005. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data. *Remote Sens. Environ.* 97: 447-457.
- Chopping, M. J. 2000. Large-scale BRDF retrieval over New Mexico with a multiangular NOAA AVHRR dataset. *Remote Sens. Environ.* 74: 163-191.
- Deschamps, P. Y., F. M. Bréon, M. Leroy, A. Podaire, A. Bricaud, J. C. Buriex, and G. Sèze. 1994. The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 32: 598-615.
- Diner, D. J., G. P. Asner, R. Davies, Y. Knyazhikin, J. P. Muller, A. W. Nolin, B. Pinty, C. B. Schaaf, and J. Stroeve. 1999. New directions in earth observing: Scientific applications of multiangle remote sensing. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 80: 2209-2228.
- Grant, I. F., C. Heyraud, and F. M. Bréon. 2004. Continental scale hotspot observations of Australia at sub-degree angular resolution from POLDER. *Int. J. Remote Sens.* 25: 3625-3636.

- Hautecoeur, O. and M. Leroy. 1998., Surface bidirectional reflectance distribution function observed at global scale by POLDER/ADEOS. *Geophysical Research Letter* 25: 4197-4200.
- Hu, J. N., Y. Su, B. Tan, D. Huang, W. Z. Yang, M. Schull, M. A. Bull, J. V. Martonchik, D. J. Diner, Y. Knyazikhin, and R. B. Myneni. 2007. Analysis of the MISR LAI/FPAR product for spatial and temporal coverage, accuracy and consistency. *Remote Sens. Environ.* 107: 334-347.
- Huemmerich, K. F. 2001. The GeoSail model: A simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance. *Remote Sens. Environ.* 75: 423-431.
- Hyman, A. H. and M. J. Barnsley. 1997. On the potential for land cover mapping from multiple-view-angle (MVA) remotely-sensed images. *Int. J. Remote Sens.* 18: 2471-2475.
- Jönsson, P. and L. Eklundh. 2004. TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Comput. Geosci.* 30: 833-845.
- JRC (Joint Research Centre). 2003. Global Land Cover 2000 database. European Commission. Joint Research Centre <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000> (Consulta: febrero 12, 2013).
- Ju, J., S. Gopal, and E. D. Kolaczyk. 2005. On the choice of spatial and categorical scale in remote sensing land cover classification. *Remote Sens. Environ.* 96: 62-77.
- Lacaze, R. 2006. POLDER-1 BRDF database – user document. Ed. 2 – Rev. 2. MEDIAS-France, CNES. Toulouse, France 59 p. [http://toyo.mediasfrance.org/IMG/pdf/POLDER-1\\_BRDF\\_usermanual-I2.20.pdf](http://toyo.mediasfrance.org/IMG/pdf/POLDER-1_BRDF_usermanual-I2.20.pdf) (Consulta: febrero 12, 2013).
- Leblanc, S. G., J. M. Chen, H. P. White, R. Latifovic, R. Lacaze, and J. L. Roujean. 2005. Canada-wide foliage clumping index mapping from multiangular POLDER measurements. *Can. J. Remote Sens.* 31: 364-376.
- Maignan, F., F. M. Bréon, and R. Lacaze. 2004. Bidirectional reflectance of earth targets: Evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with emphasis of hot spot. *Remote Sens. Environ.* 90: 210-220.
- Myneni, R. B., R. R. Nemani, and S. W. Running. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35: 1380-1393.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2006. NOAA KLM User's guide with NOAA-N, -N' Supplement. U. S. Department of Commerce. National Environmental Satellite, Data, and Information Service. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/cover.htm> (Consulta: febrero 12, 2013).
- Paz, F. y E. Medrano. 2015. Patrones espectrales multi-angulares de clases globales de cobertura del suelo usando el sensor remoto POLDER-1. *Terra Latinoamericana* 33: 129-137.
- Paz, F., A. Zarco, A. Cano, M. A. Bolaños y M. Odi. 2009. Un método simple para estimar las propiedades geométricas y ópticas de las hojas de la vegetación. *Agrociencia* 43: 417-425.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Price, J. C. 1990. On the information-content of soil reflectance spectra. *Remote Sens. Environ.* 33: 113-121.
- Price, J. C. 1992. Variability of high-resolution crop reflectance spectra. *Int. J. Remote Sens.* 13: 2593-2610.
- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. W. Junk. Norwell, MA, USA.
- Schaepman-Strub, G., M. E. Schaepman, T. H. Painter, S. Dangel, and J. V. Martonchik. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies. *Remote Sens. Environ.* 103: 27-42.
- Tian, Y., Y. Wang, Y. Zhang, Y. Knyazikhin, J. Bogaert, and R. B. Myneni. 2002. Radiative transfer based scaling of LAI retrievals from reflectance data of different resolutions. *Remote Sens. Environ.* 84: 143-159.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8: 127-150.
- Wanner, W., X. Li., and A. H. Strahler. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *J. Geophys. Res.* 100: 21077-21089.
- Zhang, Y., N. Shabanov, Y. Knyazikhin, and R. B. Myneni. 2002b. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. II: Theoretical arguments. *Remote Sens. Environ.* 80: 435-446.
- Zhang, Y., Y. Tian, R. B. Myneni, and Y. Knyazikhin. 2002a. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. I: Empirical arguments. *Remote Sens. Environ.* 80: 418-434.

# CAPTACIÓN DE AMONIO EN ZEOLITA AL INCUBAR GALLINAZA Y RESIDUOS DE CODORNIZ

## Ammonium Uptake in Zeolite During Incubation of Quail Poultry Manure

Sarai Guadalupe Valerio Luna<sup>1</sup>, Roberto Quintero Lizaola<sup>1‡</sup>,  
Gustavo Adolfo de Jesús Baca Castillo<sup>1</sup> y Aníbal Griceldo Quispe Limaylla<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (quintero@colpos.mx)

---

### RESUMEN

Con la finalidad de conocer el efecto de la zeolita en la volatilización del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y amoníaco (NH<sub>3</sub>), se estableció un ensayo de incubación durante 20 días en condiciones controladas de humedad y temperatura, para lo cual se realizaron mezclas entre residuos orgánicos de aves y cantidades de zeolita utilizando un diseño factorial 24, teniendo un total de 8 tratamientos donde se evaluaron cada día las emisiones de CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza y a una prueba de Tukey. Los resultados mostraron que la zeolita ayuda a la disminución de emisiones de NH<sub>3</sub>, y no afectó la actividad microbiana presente, se concluye que la zeolita atrapó el ion amonio en su estructura y no permitió su transformación a NH<sub>3</sub>.

**Palabras clave:** CO<sub>2</sub>; NH<sub>3</sub>; microorganismos.

### SUMMARY

In order to determine the effect of zeolite on the volatilization of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and ammonia (NH<sub>3</sub>), an incubation assay was established for 20 days under controlled conditions of humidity and temperature. Quail manure and zeolite were mixed in different quantities, for a total of 8 treatments in a 24 factorial design. Emissions of CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> were measured daily. The results were evaluated using the statistical package (SAS) and Tukey test. Significant differences were obtained when the amounts of zeolite were evaluated with respect to emissions. The results show that zeolite helps decrease NH<sub>3</sub> and did not affect microbial activity. It is concluded that zeolite captures ammonium ion in its structure and does not permit its transformation to NH<sub>3</sub>.

**Index words:** CO<sub>2</sub>; NH<sub>3</sub>; microorganisms.

### INTRODUCCIÓN

El sector avícola genera impactos negativos, por la mala disposición de los residuos orgánicos, durante el proceso de descomposición del residuo al no contar con un sistema adecuado surgen emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), NH<sub>3</sub> (amoníaco) y H<sub>2</sub>S (sulfuro de hidrógeno), causando degradación ambiental en el entorno (Rodríguez y Córdova, 2006; García *et al.*, 2007).

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para los seres vivos, ya que es uno de los constituyentes principales de biomoléculas como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos (Celaya y Castellanos, 2011). El término volatilización se utiliza para describir el proceso de pérdida de N en forma de amoníaco (NH<sub>3</sub>) (Celaya y Castellanos, 2011).

Si los factores ambientales permanecen constantes, pueden generarse menores pérdidas y magnitudes de gases, durante el proceso de degradación de un residuo orgánico. Para el caso de amoníaco se debe tener en cuenta la siguiente ecuación  $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{NH}_3 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$ , con la finalidad de controlar el proceso de volatilización del NH<sub>3</sub> (amoníaco) que es uno de los gases principales del efecto invernadero (Casanova, 1993).

Los residuos orgánicos de aves contienen una gran cantidad de nitrógeno orgánico el cual se convierte rápidamente en amoníaco (García, 2010), que se volatiliza generando contaminación, para poder minimizar este impacto están surgiendo nuevas investigaciones buscando formas de recuperación y estabilización de este ion.

---

#### Como citar este artículo:

Valerio Luna, S. G., R. Quintero Lizaola, G. A. J. Baca Castillo y A. G. Quispe Limaylla. 2016. Captación de amonio en zeolita al incubar gallinaza y residuos de codorniz. *Terra Latinoamericana* 34: 201-206.

---

Recibido: marzo de 2015. Aceptado: octubre de 2015.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 201-206.



La zeolita es un mineral cuya estructura tridimensional le permite tener propiedades óptimas para retener y liberar agua, así como intercambiar iones sin modificar su estructura atómica, estas propiedades lo hacen un elemento importante para ser utilizado en el intercambio de  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{NH}_4^+$  (Chica Toro *et al.*, 2006).

El mecanismo de la zeolita para controlar el olor nocivo es mediante la captura del amonio y la prevención de la formación del amoníaco. La zeolita con amonio se convierte en un producto secundario que podría utilizarse como fertilizante. El objetivo de este trabajo fue evaluar el proceso de mineralización de dos residuos avícolas y la participación de la zeolita en el proceso de transformación del ácido úrico en carbonato de amonio midiendo la liberación de  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) y el  $\text{NH}_3$  (amoníaco).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en el Colegio de Posgraduados campus Motecillo. El trabajo comprendió la evaluación de la volatilización del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) provenientes de los residuos avícolas. Uno proveniente de la granja de gallinas ponedoras del Colegio de Posgraduados y el segundo procedente de la producción de Codorniz del municipio de San Bernardino. Estos residuos fueron mezclados con cuatro cantidades de zeolita procedente de la mina San Francisco ubicada en Rinconada Arakan N° 127 Colonia: Lomas 4ª Sección en San Luis Potosí, S.L.P., México.

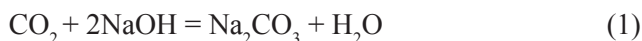
El proceso de incubación se realizó en un sistema cerrado, el cual consistió en colocar la muestra de los residuos en frascos de polietileno de 500 ml, las cuales fueron humedecidas al 70% de su capacidad hídrica, cada unidad experimental se repitió tres veces.

### Determinación de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )

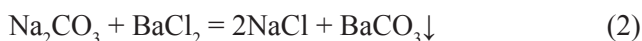
El  $\text{CO}_2$  se cuantificó utilizando el método descrito por Anderson (1982) modificado. El cual consistió en colocar un álcali de 3 ml de  $\text{NaOH}$  1N, para determinar el desprendimiento de  $\text{CO}_2$  mediante la titulación con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1N, en presencia de tres gotas de fenoltaleína al 1%. Por último, la precipitación de los carbonatos con 2 ml de  $\text{BaCl}_2$  al 2%.

El  $\text{CO}_2$  liberado durante la respiración aeróbica puede ser adsorbido en solución alcalina y medida

como un índice de la tasa de respiración. La reacción en la cual el  $\text{CO}_2$  es adsorbido se determinó utilizando la Ecuación 1:



La cantidad de  $\text{CO}_2$  adsorbido es equivalente a la cantidad de  $\text{NaOH}$  consumido. Para determinar esto, se precipita el carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) con  $\text{BaCl}_2$  y se titula el remanente  $\text{NaOH}$  con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  estándar. Las reacciones son:



De la diferencia entre la cantidad de  $\text{NaOH}$  presente inicialmente y el remanente después de la exposición al  $\text{CO}_2$  se obtiene la cantidad de gas producido por respiración mediante la Ecuación 4:

$$R = (B-M) NE \quad (4)$$

dónde: R = respiración microbiana en mg  $\text{CO}_2$ , B = volumen de ácido necesario para titular el  $\text{NaOH}$  promedio de los blancos (en ml), M = cantidad de ácido necesario para titular el  $\text{NaOH}$  de la muestra (en ml), N = normalidad del ácido, E = peso equivalente del  $\text{CO}_2$ .

La acumulación de  $\text{CO}_2$  se determinó únicamente sumando los mg de  $\text{CO}_2$  que se produjeron cada día.

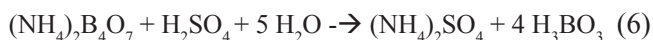
### Determinación de Amoníaco ( $\text{NH}_3$ )

Se cuantificó la volatilización de  $\text{NH}_3$  desprendido de la muestra que se capturó en un álcali de 3 ml de  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Se evaluó la alícuota colocando 2 gotas de indicadores y valoró con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  hasta que el color cambió de verde a rosa.

La reacción química que se da en la captura del amoníaco volatilizado se muestra a continuación con la Ecuación 5:



Al titular con ácido sulfúrico se obtiene:



La concentración de volatilización se calculó con la Ecuación 7:

$$N\text{-NH}_3 \text{ (mg)} = V * N * 14 \quad (7)$$

donde: V = volumen medio de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> necesario para valorar el NH<sub>3</sub> en cada una de las muestras, N = normalidad del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 14 = peso del nitrógeno.

### Análisis Estadístico

El diseño experimental de este trabajo fue un factorial 2<sup>4</sup>. Se evaluaron cuatro cantidades diferentes de zeolita en dos tipos de residuos orgánicos avícolas teniendo un total de 8 tratamientos (Cuadro 1), donde se evaluaron las tasas de emisión de CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>.

Los resultados obtenidos de las titulaciones fueron sometidos a un análisis de varianza y a una prueba de comparación de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) mediante el programa de SAS (2014).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados generados en esta investigación muestran que los residuos orgánicos de las aves pueden transformarse rápidamente, debido a la composición y población microbiana presente (Celaya y Castellanos, 2011), además de contener materiales fácilmente degradables como proteínas y azúcares (Celaya y Castellanos, 2011; Contreras *et al.*, 2006).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>, son variables independientes que permiten establecer relaciones de contaminación y de la actividad microbiana presente

en el proceso de mineralización de residuos avícolas. Durante el experimento se presentaron volatilizaciones máximas de 47.67 mg de CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> en los residuos orgánicos de la codorniz, mientras que la gallinaza presenta emisiones inferiores a esta. La liberación de CO<sub>2</sub>, sirve como referencia de la actividad microbiana presente en el medio (Guerrero *et al.*, 2012).

### Evolución de Bióxido de Carbono

En los primeros cinco días de la incubación se observaron las mayores variaciones de emisiones de CO<sub>2</sub>, esto se debe a la actividad de los microorganismos ante la presencia del material rico en compuestos degradables (Celaya y Castellanos, 2011; Contreras *et al.*, 2006).

Al analizar las interacciones de cantidad de zeolita con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>, se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al utilizar los residuos provenientes de la codorniz (Cuadro 2). Sin embargo, en el caso de la gallinaza fueron iguales (Figura 1) por lo que se interpreta que la presencia de la zeolita no interfiere en la degradación de la gallinaza, de tal manera que la actividad biológica no se ve afectada por estos aluminio silicatos.

El C de la gallinaza se mineralizó un 34-35%, en las primeras cuatro semanas de la incubación, lo cual coincide con lo reportado por Contreras *et al.* (2006), quienes incubaron diferentes materiales y obtuvieron que la gallinaza y el estiércol de caprino mostraron una mejor repuesta inicial. Al evaluar los procesos de mineralización de los residuos orgánicos avícolas se encontró que no existe un comportamiento lineal, debido a que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos con diferentes niveles de zeolita respecto a la emisión de CO<sub>2</sub>, para el caso de la gallinaza, esto se interpreta como que el compuesto orgánico tiene más actividad constante, respecto al residuo de codorniz el cual contiene más material orgánico.

La cantidad de C-CO<sub>2</sub> acumulado desprendido por la actividad biológica de los tratamientos incubados durante un período de 20 días, tuvo un mayor aumento en los primeros 10 días (781.88 mg de CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> en el tratamiento 7), en los otros tratamientos las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron inferiores (Cuadro 2). Las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante los 20 días de incubación, para el caso de los residuos de codorniz tuvo un mayor

**Cuadro 1. Tratamientos evaluados.**

Tratamiento	Material orgánico	Cantidad	Material mineral	Cantidad
		g		g
T1	Gallinaza	20	Zeolita	0
T2	Gallinaza	20	Zeolita	10
T3	Gallinaza	20	Zeolita	15
T4	Gallinaza	20	Zeolita	20
T5	Codorniz	20	Zeolita	0
T6	Codorniz	20	Zeolita	10
T7	Codorniz	20	Zeolita	15
T8	Codorniz	20	Zeolita	20

**Cuadro 2. CO<sub>2</sub> producido por los tratamientos evaluados.**

Tratamiento	Material orgánico	Cantidad	Material mineral	Cantidad	Emisiones de CO <sub>2</sub>
		g		g	mg de CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup>
T1	Gallinaza	20	Zeolita	0	730.18 a <sup>†</sup>
T2	Gallinaza	20	Zeolita	10	745.36 a
T3	Gallinaza	20	Zeolita	15	750.78 a
T4	Gallinaza	20	Zeolita	20	742.57 a
T5	Codorniz	20	Zeolita	0	705.90 b
T6	Codorniz	20	Zeolita	10	738.02 b
T7	Codorniz	20	Zeolita	15	781.88 b
T8	Codorniz	20	Zeolita	20	77.16 b

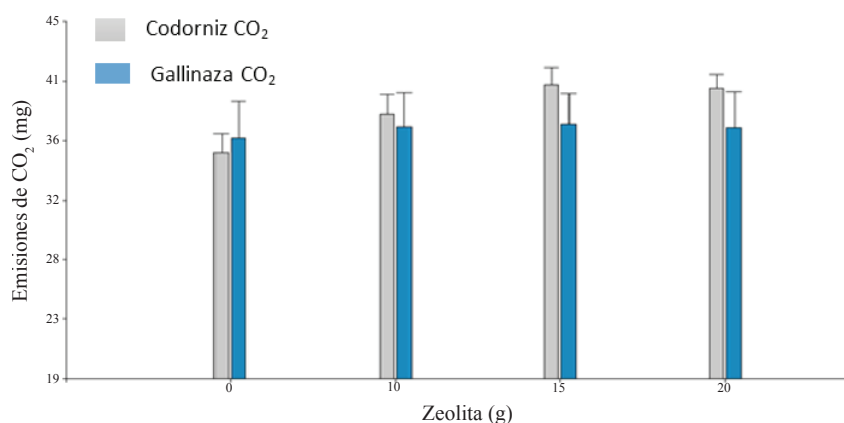
<sup>†</sup> Medias con la misma letra en la columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

desprendimiento de CO<sub>2</sub> en los primeros 12 días (Figura 2), por lo que se interpreta que está vinculado con una mayor actividad microbiana posiblemente porque presenta más fracciones orgánicas de fácil descomposición en comparación con la gallinaza. A medida que transcurrió la incubación, los sistemas se estabilizaron, el material recientemente añadido de fácil degradación, comenzó a agotarse y, por lo tanto, el número de microorganismos disminuyeron al igual que el desprendimiento de CO<sub>2</sub>.

Acosta *et al.* (2006), establecen que la actividad de los microorganismos que intervienen al inicio del proceso de transformación de la materia orgánica es máxima. Como consecuencia de tener a su alcance gran cantidad de compuestos fácilmente biodegradables procedentes de los materiales orgánicos de partida. Este

incremento indica que el material orgánico suministra la cantidad necesaria para la proliferación de los microorganismos encargados de la descomposición.

Las mayores emisiones diarias de CO<sub>2</sub> se alcanzaron el segundo día de incubación para los dos residuos orgánicos (Figura 2). Las altas intensidades iniciales de emisión de CO<sub>2</sub>, reflejarían la presencia de carbono disponible en los sustratos orgánicos provenientes de compuestos fácilmente degradables (Guerrero *et al.*, 2012). En el Cuadro 2 se observan las emisiones de C-CO<sub>2</sub> acumulados por cada tratamiento. Los resultados de la interacción entre zeolita y los residuos orgánicos avícolas en el desprendimiento de CO<sub>2</sub>, no presentaron diferencias estadísticamente significativas, es decir que la zeolita no influyó en el proceso de liberación de este gas.



**Figura 1. Emisiones de C-CO<sub>2</sub> en los tratamientos de residuos avícolas con diferentes niveles de zeolita.**

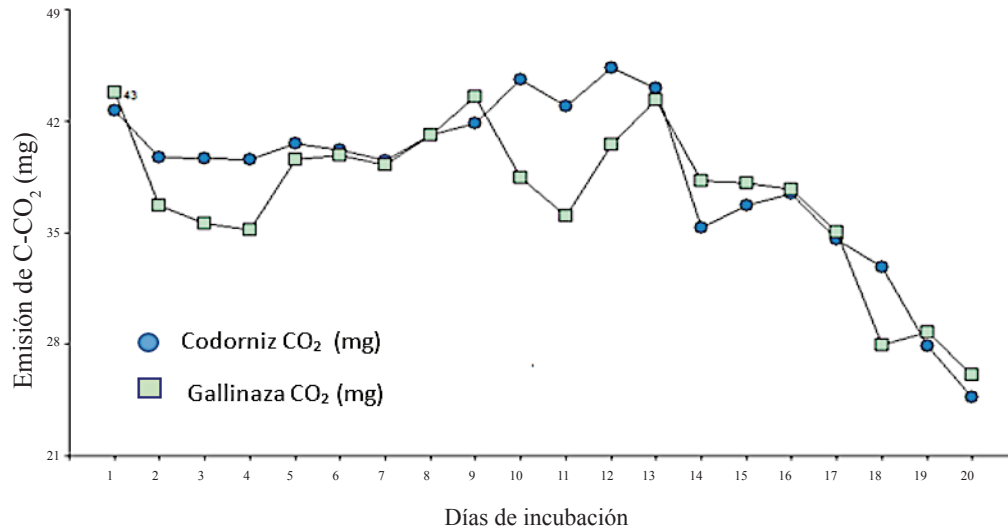


Figura 2. Evolución de C-CO<sub>2</sub> procedente de dos residuos orgánicos avícolas durante los días de incubación.

### Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>)

Se encontró que al analizar los dos tipos de residuos orgánicos avícolas, la gallinaza presentó mayores desprendimientos de NH<sub>3</sub> con respecto al de codorniz. Pero al evaluar la influencia de la cantidad de zeolita aplicada, existe una disminución de emisiones al tener más cantidad de zeolita (Figura 3).

Se observó que durante las primeras semanas de incubación, la mineralización del nitrógeno fue ascendente (Figura 2) debido a que en este periodo se produce la descomposición de azúcares, proteínas y celulosas, haciéndose más lenta hacia las últimas semanas en donde se están mineralizando aquellos materiales más resistentes y que necesitan más tiempo

para descomponerse (Philippot y Germon, 2005).

Para que la materia orgánica pueda descomponerse de manera eficiente debe contar con un ambiente óptimo que permita generar algunos microorganismos como: amilolíticos, lipolíticos, celulolíticos, ligninolíticos, amonificantes, fijadores de nitrógeno de vida libre, desnitrificantes y nitrificantes, los cuales ayudan a digerir sustancias de fácil y difícil descomposición (Quintero, 2014; Celaya y Castellanos, 2011). Los microorganismo amilolíticos y amonificantes están presente durante el proceso de mineralización de los residuos avícolas, la presencia de estos microorganismos ayudan a la degradación del material orgánico.

El desprendimiento de NH<sub>3</sub> acumulado alcanzó un valor total del 66% en los tratamientos que no contenían

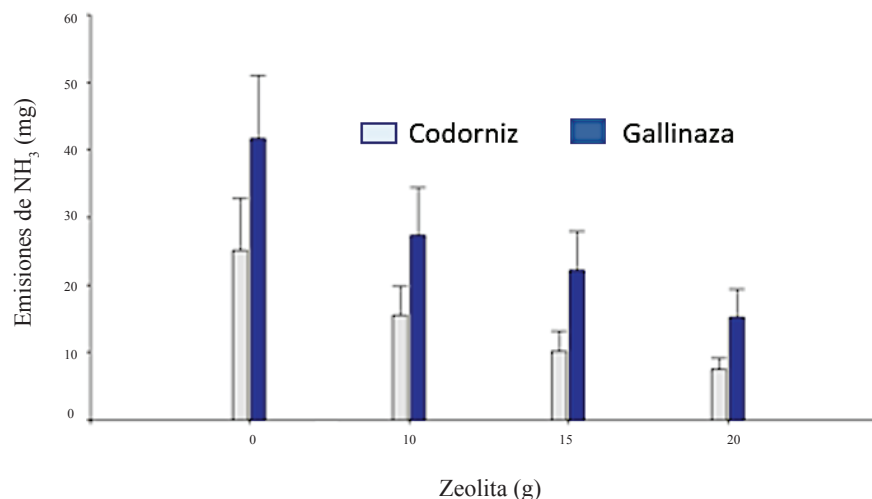


Figura 3. Volatilización de NH<sub>3</sub> en los diferentes niveles de zeolita durante todo el tiempo de incubación.

zeolita; este porcentaje se utilizó para compararlo con el repostado por Lara *et al.* (1997), que señalan que las pérdidas de nitrógeno por volatilización pueden ser superiores al 40% cuando no se tiene algún tratamiento previo.

En todos los tratamientos cuando se presentó el pico más alto de desprendimiento de CO<sub>2</sub> también se tuvo la mayor volatilización NH<sub>3</sub>, la actividad microbiana que presentaron los residuos de codorniz se debe a que hay mayor presencia de microorganismos amonificantes esto puede ser a que todavía existe sustrato disponible (Quintero, 2014).

### Relación entre la Volatilización del CO<sub>2</sub> y el NH<sub>3</sub>

La correlación que existió entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> fue de  $r^2 = 0.65$ , lo que permite suponer que, tanto el CO<sub>2</sub> producido sirve como indicador de la actividad microbiana presente como para dar información sobre las variaciones del proceso de mineralización de N asociadas con las pérdidas de volatilización en forma de NH<sub>3</sub>.

La reducción de las emisiones de NH<sub>3</sub> al ir aumentando las dosis de zeolita, en los dos residuos avícolas, indican que el uso de zeolita ayuda en el proceso de transformación del ácido úrico presente en los residuos avícolas, no permitiendo que se descomponga en carbonato de amonio y que se pierda por volatilización.

### CONCLUSIONES

- El tratamiento que presentó mejores resultados en la disminución de volatilización del NH<sub>3</sub> es el que tiene una relación 1:1 (residuo:zeolita), lo cual indica que aplicar zeolita para tratar los residuos orgánicos avícola ayudarán a la disminución de los riesgos de contaminación del aire, los cuales están asociados a la volatilización de NH<sub>3</sub>.

- Se concluye que la zeolita no es útil para reducir emisiones de CO<sub>2</sub>, siendo el residuo orgánico proveniente de la codorniz el que emitió mayores cantidades.

### LITERATURA CITADA

- Acosta, Y., J. Cayama, E. Gómez, N. Reyes, D. Rojas y H. García. 2006. Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencias* 6: 220-227.
- Casanova, O. N. 1993. Principales procesos de pérdida de nitrógeno. Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay. pVIII. 45-48. Montevideo, Uruguay.
- Celaya M., H. y A. E. Castellanos V. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana* 29: 343-356.
- Contreras, F., J. Paolini y C. Rivero. 2006. Efecto de la adición de enmiendas orgánicas sobre la cinética de la mineralización del carbono en suelos del municipio Rivas Dávila, estado Mérida, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 31: 37-52.
- Chica Toro, F. J., L. M. Londoño Benítez y M. I. Álvarez Herrera. 2006. La zeolita en la mitigación ambiental. *Rev. Lasallista Inv.* 3: 30-34.
- García, Y., A. Ortiz y E. Lon Wo. 2007. Efecto de los residuales avícolas en el ambiente. Instituto de Ciencia Animal. José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.
- García, C. H. 2010. La aplicación de zeolita en la producción avícola. *RIAA* 1: 17-23.
- Guerrero O., P. L., R. Quintero L., V. Espinoza H., G. S. Benedicto V., M. J. Sánchez C. 2012. Respiración de CO<sub>2</sub> como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de lupinus. *Terra Latinoamericana* 30: 355-362.
- Lara Cabezas, W. A. R., G. H. Korndorfer, e S. A. Motta. 1997. Volatilização de N-NH<sub>3</sub> na cultura de milho: I - Efeito da irrigação e substituição parcial da ureia por sulfato de amônio. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 21: 481-487.
- Philippot, L. and J. C. Germon. 2005. Contribution of bacteria to initial input and cycling of nitrogen in soils. pp. 159-176. *In*: F. Buscot and A. Varma (eds.). *Microorganisms in soils: Roles in genesis and functions*. *Soil Biology*: 3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Quintero L., R. 2014. Poblaciones microbianas, actividad enzimática y sustancias húmicas en la biotransformación de residuos. *Terra Latinoamericana* 32: 161-172.
- Rodríguez Salinas, M. A. y A. Córdova V. 2006. Manual de compostaje municipal. Tratamientos de residuos sólidos urbanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.
- SAS Institute. 2014. Base SAS 9.4 procedures guide: Statistical procedures. SAS Institute. Cary, NC, USA.

# CAMBIO CLIMÁTICO, ENSALITRAMIENTO DE SUELOS Y PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN ÁREAS DE RIEGO

## Climate Change, Soil Salinity and Crop Production in Irrigation Areas

Leonardo Pulido Madrigal<sup>1‡</sup>

<sup>1</sup> Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso. 62550 Jiutepec, Morelos, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (lpulido@tlaloc.imta.mx)

---

### RESUMEN

Se analizó el impacto del clima en los problemas de salinidad, drenaje y producción agrícola en el Distrito de Riego 038 río Mayo Sonora el cual presenta afectaciones por sales en 32% de su superficie. Con datos de clima y agronómicos generados entre 1970-2001, se elaboraron modelos de regresión lineal simple para estudiar la relación entre la superficie ensalitrada con la temperatura ambiente, superficie afectada por niveles freáticos superficiales, volumen de riego, salinidad del agua de riego, precipitación pluvial, producción agrícola y productividad del agua. Asimismo, se correlacionó el manto freático con la temperatura, volumen de riego y precipitación pluvial. La producción se correlacionó con la salinidad del suelo, temperatura ambiente, superficie afectada por niveles freáticos superficiales y volumen de riego. Además, por medio de modelos de regresión lineal múltiple se determinaron las relaciones tanto de la superficie ensalitrada como de la producción agrícola, con la temperatura, superficie afectada por niveles freáticos superficiales, volumen de riego, superficie cosechada y precipitación pluvial. Los resultados evidenciaron que el aumento de superficie ensalitrada está relacionado con el incremento de temperatura; mismo que se asoció con la disminución del volumen de cosechas y con el aumento de superficie con niveles freáticos. Se encontró que los volúmenes de riego impactan en el incremento de la superficie agrícola con niveles freáticos someros y con el aumento de superficie ensalitrada. Con el calentamiento global los problemas de salinidad del suelo se incrementaron entre 24.1 y 15.8% en los estratos de suelo a 30 y 60 cm de profundidad, respectivamente. Así mismo, se estimó un crecimiento del 21.9% de superficies con niveles freáticos superficiales. El impacto del calentamiento

global en el volumen de producción agrícola se estimó en una reducción del 18.9% del volumen de cosechas.

**Palabras clave:** distrito de riego; calentamiento global; drenaje; temperatura; precipitación pluvial; volumen de riego.

### SUMMARY

The impact of climate on problems of salinity, drainage and crop production in Irrigation District 038 Rio Mayo, Sonora, affected by salts in 32% of its area, is analyzed. With climate and agronomic data generated between 1970 and 2001, simple linear regression models were developed to study the relationship of the salinized areas to temperature, area affected by superficial water table levels, irrigation water volume and salinity, rainfall, crop production and water productivity. In addition, water table level was correlated with temperature, irrigation water volume and rainfall. Crop production was correlated with soil salinity, environmental temperature, areas affected by superficial water table and volume of irrigation water. Moreover, multiple regression models determined the relationships of area affected by salinity and agricultural production to temperature, area affected by superficial water table levels, irrigation volume, area harvested and rainfall. The results showed that the increase in salinized area is related to an increase in temperature, leading to reduced yields and increased area with water table levels. It was found that there is an impact of irrigation volumes on the rising water table levels and the increase of salinity-affected areas. There was an increase of affected areas of 24.1 and 15.8% in 0-30 and 30-60 cm depths, respectively, because of global warming. Also, an increase of 21.9% in drainage affected areas was estimated. Because of

---

#### Como citar este artículo:

Pulido Madrigal, L. 2016. Cambio climático, ensalitrado de suelos y producción agrícola en áreas de riego. *Terra Latinoamericana* 34: 207-218.

---

Recibido: octubre de 2015. Aceptado: enero de 2016.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 207-218:

global warming a reduction of 18.9% of the agricultural production was estimated.

**Index words:** *irrigation district; global warming; drainage; temperature; rainfall; irrigation volume.*

## INTRODUCCIÓN

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencia los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de glaciares, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007 citado por Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). Se estima que para el periodo 2061-2090 en el estado de Sonora la temperatura media aumentará entre 3.5 y 3.7 °C y la precipitación pluvial decaerá 21% (Montero *et al.*, 2010). Diversos estudios de impactos del cambio climático basados en respuestas biofísicas de los cultivos indican que podría provocar repercusiones adversas en la agricultura (Ojeda *et al.*, 2010).

El crecimiento de las plantas y su rendimiento dependen de la temperatura promedio y de las temperaturas extremas, y varían para cultivos con diferente ruta fotosintética. La amplitud óptima para los cultivos C<sub>3</sub> está entre 15 y 20 °C y para cultivos C<sub>4</sub>, entre 25 y 30 °C; para cultivos CAM una temperatura nocturna de 10 a 20 °C es óptima. Para cultivos anuales, una temperatura más alta acelera el desarrollo acortando el periodo de crecimiento y reduciendo el rendimiento, si el acortamiento del periodo de desarrollo no está plenamente compensado por un rápido aumento de una temperatura más alta (Reilly, 1996; Luo, 2011).

El clima es el principal factor que afecta la tolerancia de los cultivos a las sales. La mayoría de los cultivos pueden tolerar altos niveles de estrés a la salinidad si el clima es frío y húmedo en comparación con uno cálido y seco (Rhoades, 1990).

Existe un problema de salinidad cuando las sales se acumulan en la zona radical a una concentración tal que ocasiona pérdidas en la producción agrícola (Maas, 1990; Grieve *et al.*, 2012). El rendimiento de los cultivos disminuye cuando el contenido de sales en la solución del suelo no permite que estos extraigan suficiente agua de la zona radical, provocando así un estado de escasez de agua en las plantas por un tiempo significativo (Ayers y Westcot, 1987).

Los suelos afectados por sales son componentes naturales de los paisajes áridos. Su presencia se debe a una limitada precipitación, es decir, la evaporación excede a la precipitación durante la mayor parte del año (Richards, 1974). En las regiones áridas el lavado y transporte de sales solubles al océano no es tan completo como ocurre en las regiones húmedas; por lo que normalmente en regiones áridas el lavado es de naturaleza local y las sales solubles no pueden ser transportadas lejos. Esto ocurre no solamente porque hay menos precipitaciones pluviales disponibles para lavar y transportar las sales, sino también a consecuencia de la elevada evaporación característica de un clima árido, que tiende además a concentrar las sales en los suelos y en el agua superficial (Richards, 1974). En términos generales, las causas potenciales o fuentes de excesos de sales incluyen agua de riego salina, inadecuado drenaje, sales del suelo nativas, y procesos continuos de inundación y evaporación (Rhoades, 1990).

Después de más de 50 años de operación, el distrito de riego (DR) 038 río Mayo, Sonora, está considerado como uno de los que tienen mayores problemas de salinidad y drenaje en suelo a nivel nacional, ya que aproximadamente 32% de su superficie presenta afectaciones (De la Peña, 1993; Pulido *et al.*, 2009). En orden de importancia, las causas que dan origen al problema de salinidad y de manto freático superficial en este DR son: los métodos de riego ineficientes, el mantenimiento deficiente de la red de drenaje, las pérdidas de agua por conducción, la falta de capacitación de usuarios, las condiciones de topografía, la ubicación y condiciones de descarga de la red de drenaje, la calidad del agua de riego y la intemperización química de los materiales terrestres, es decir minerales que son constituyentes de rocas y suelos (Tanji, 1990; Pulido *et al.*, 2009).

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Estudiar la relación que tienen con la salinidad del suelo y con la producción agrícola, el calentamiento global a través de la temperatura ambiente, precipitación pluvial, niveles freáticos superficiales, volumen de agua de riego y salinidad del agua de riego en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, durante el periodo 1970-2001. 2) Determinar el impacto en términos de incrementos de superficie ensalitrada y de disminución del volumen de producción agrícola, de la temperatura ambiente, precipitación pluvial, niveles freáticos superficiales,

volumen de agua de riego y salinidad del agua de riego en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, durante el periodo 1970-2001.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización y Condiciones Físicas del Área de Estudio

La presente investigación se llevó a cabo con datos de superficie ensalitrada, superficie con un nivel freático superficial, volumen de producción agrícola, superficie de cultivo, volumen de agua de riego, concentración de sales en agua de riego, temperatura ambiente y precipitación pluvial, obtenidos en el intervalo 1970-2001 en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, México. En este tiempo se realizaron en el DR 038 estudios de salinidad y drenaje, mismos que fueron suspendidos a partir de 2001. Los estudios muestran variaciones temporales y espaciales en las áreas afectadas por salinidad y niveles freáticos superficiales, por lo cual es necesario analizar la relación que tienen estas variables con la temperatura y precipitación pluvial así como con variables relacionadas con la salinidad del suelo; como son la salinidad del agua de riego y el volumen de riego. Además, en el periodo de tiempo señalado se requiere investigar la relación entre la producción agrícola con la salinidad del suelo, temperatura, precipitación pluvial, volumen de riego y salinidad del agua de riego.

El DR 038 río Mayo se localiza entre los paralelos 26° 21' y 28° 31'N y meridianos 108° 26' y 110° 05', con una altura media de 40 m. El DR queda comprendido en los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, en el sur del estado de Sonora; tiene una superficie bruta de 112 489 ha y de riego de 96 951 ha, la cual es regada por gravedad con agua de la presa Adolfo Ruiz Cortines, y con agua de bombeo de pozos. Su clima es estepario semiárido, con precipitación media anual de 388 mm, temperatura media anual de 21.4 °C, y evaporación media anual de 2222 mm (Reyes, 1994). El área que constituye la zona de riego se integra a la planicie costera del noroeste de la República Mexicana, con suelos sensiblemente planos con pendientes menores del 1%. Su altitud oscila entre 2 y 50 metros sobre el nivel medio del mar.

En el área del DR están identificadas 10 series de suelo (Reyes, 1994). Con excepción de la serie Camoa, todas las series presentan problemas de

salinidad; se observa en el subsuelo un estrato salino-sódico (50-90 cm), con salinidad (CE) > 4 dS m<sup>-1</sup> y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mayor que 15%. Asimismo, con excepción de las series Navojoa y Camoa las restantes tienen también las características de presentar manto freático superficial. Los suelos en su mayoría presentan pH alto; el contenido de materia orgánica es menor al 1% (Reyes, 1994).

### Obtención de Información sobre Salinidad, Drenaje, Clima, Hidrométrica y de Calidad del Agua de Riego

Los datos para llevar a cabo el presente análisis se obtuvieron tanto de las oficinas del DR, como de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego del Río Mayo (S. de R. L.), y se reunieron datos de estudios de salinidad y freatimetría realizados entre 1965 y 2001. Además, se tomaron datos de hidrometría sobre volúmenes de riego, superficies de siembra, rendimiento de cultivos y calidad del agua de riego. Igualmente, se tuvieron entrevistas con técnicos del DR y de la S. de R. L., las cuales permitieron profundizar en el conocimiento de los problemas de salinidad y drenaje. Se consultaron informes de proyectos de salinidad y drenaje llevados a cabo por personal técnico del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en este DR y en otros distritos del noroeste del país (IMTA, 1997; Pulido *et al.*, 2003, 2010).

### Estudios de Salinidad y de Profundidad al Nivel Freático Practicados en el Distrito de Riego

Entre 1971-2001 se reportaron 11 estudios de salinidad que contienen mapas con la distribución espacial de las áreas afectadas por salinidad y sodio. Los estudios hasta 1985 consistieron en tomar muestras de suelo por estratos hasta una profundidad de entre 60 y 120 cm; para cada muestra de suelo se analizó en el laboratorio la salinidad (conductividad eléctrica, dS m<sup>-1</sup>) y se obtuvo el PSI excepto en 1996 y 2001; en estos años se cartografió la salinidad en el estrato a 60 cm por medio de imágenes de satélite y un sensor electromagnético (Pulido *et al.*, 2001, 2010). En el presente trabajo se considera como suelo salino aquellos con una CE > 4 dS m<sup>-1</sup> (Richards, 1974).

Los estudios de profundidad del nivel freático superficial empezaron a realizarse en 1965; se llevaron a cabo 20 estudios hasta el año 2001. Entre 1965 y



1985 las mediciones se realizaron cada mes, en pozos distribuidos en el 46% del área del DR, donde hay más problemas de salinidad. En el lapso entre 1985 y 2001 las mediciones se hicieron en 15 de los 16 módulos de riego en que está dividido el DR. Con las monitorizaciones se elaboraron mapas mensuales de isobatas para las profundidades < 1m, 1-1.5 m, 1.5-2 m, 2-3 m y > 3 m, de acuerdo con la metodología señalada por De la Peña (1979).

### **Temperatura, Precipitación Pluvial, Volumen de Agua de Riego Aplicado, Salinidad del Agua de Riego y Producción Agrícola**

Se utilizaron datos promedio anuales publicados entre 1969-2001, de temperatura y precipitación pluvial de la estación meteorológica del Campo Agrícola Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicada aproximadamente en el centro geográfico del DR 038, con coordenadas geográficas 27° 00' 40.26" N y 109° 30' 03.77" O. De igual forma, los datos de clima fueron obtenidos de IMTA (2000) y a través de la Red de Estaciones Meteorológicas de Sonora ([www.agroson.org.mx](http://www.agroson.org.mx)).

El agua de riego proviene de dos fuentes. Una es el río Mayo controlado por medio de la presa Adolfo Ruiz Cortines, cuya capacidad máxima de almacenamiento es de 1385 hm<sup>3</sup>. La otra fuente es un acuífero del que se extrae agua a través de 129 pozos profundos de los cuales anualmente se extraen 150 hm<sup>3</sup>. El agua bombeada se mezcla con el agua de los canales para riego, con lo que se complementa el suministro de agua particularmente durante el verano y en los años de menor disponibilidad en la presa. La calidad química del agua de la presa, sin restricciones para uso agrícola considerando su salinidad, ya que en promedio su conductividad eléctrica es de 0.29 dS m<sup>-1</sup>. El agua subterránea exhibe un contenido medio de sales disueltas del orden de 2.24 dS m<sup>-1</sup>, que la clasifican con un grado de restricción de ligera a moderada para su aprovechamiento agrícola; es por ello que se diluye con el agua de la presa para reducir la concentración de sales (Ayers y Westcot, 1987; Beltrán *et al.*, 1999).

### **Análisis Estadístico de los Datos**

Se correlacionaron mediante modelos de regresión lineal simple la superficie afectada por sales como

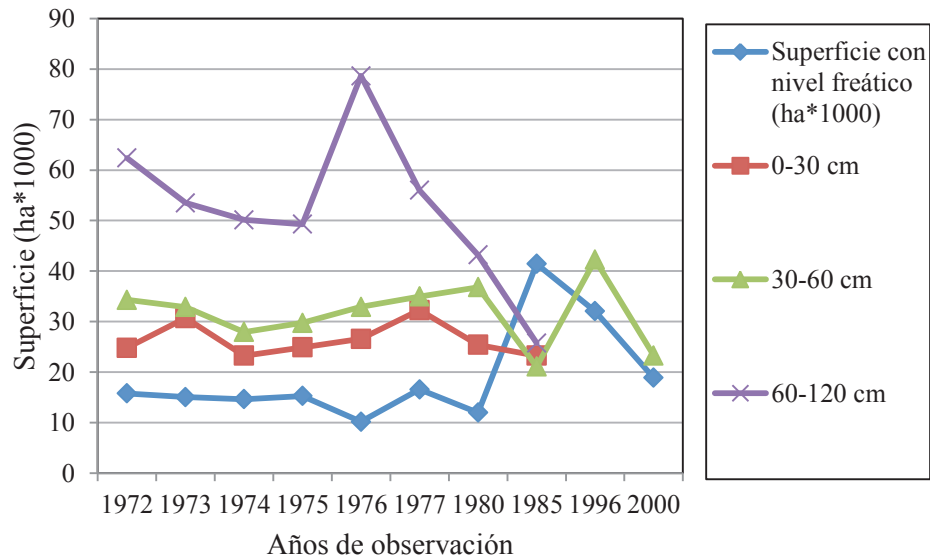
variable dependiente, y como variables independientes la temperatura ambiente, superficie afectada por niveles freáticos superficiales, volumen de riego, salinidad del agua de riego, precipitación pluvial y producción agrícola. Así mismo, se correlacionó el nivel freático superficial como variable dependiente y la temperatura, volumen de riego aplicado y precipitación pluvial como variables independientes. La producción se consideró como variable dependiente de la salinidad del suelo, de la temperatura ambiente promedio, superficie afectada por niveles freáticos superficiales y volumen de agua de riego.

Se llevaron a cabo regresiones lineales múltiples para determinar la relación entre las superficies ensalitradas con la temperatura ambiente, superficie afectada con niveles freáticos superficiales, volumen de agua de riego, y precipitación pluvial; también se correlacionó el volumen de producción agrícola con la temperatura, precipitación pluvial, superficie ensalitrada, superficie con un nivel freático superficial, volumen de riego aplicado y superficie cosechada. Las variaciones registradas de las variables referidas así como su impacto en el ensalitrado del suelo en el periodo 1972-2001 se analizaron en el presente trabajo. El análisis estadístico se hizo por medio del programa Excel 2010.

## **RESULTADOS**

### **Variación Temporal de la Salinidad del Suelo, Manto Freático Superficial, Temperatura, Precipitación Pluvial, Volumen de Riego y Producción Agrícola**

Entre los estratos de suelo analizados en cuanto a su salinidad: 0-30, 30-60 y 60-120 cm, considerando la superficie total, en promedio en el estrato 0-30 cm se analizaron 25 578 ha (23%) con variaciones de 18 949 ha (17%) y 32 275 ha (29%); en el estrato 30-60 cm en promedio se estimaron 31 458 ha (28%) con fluctuaciones entre 21 100 ha (19%) y 42 272 ha (38%), y en el estrato 60-90 cm se promediaron 50 563 ha (45%), con variaciones de 25 760 ha (23%) a 78 640 ha (70%). Los porcentajes están referidos a la superficie total (Figura 1). Los datos registrados en todos los estratos dan un promedio general de superficie ensalitrada equivalente al 32% del área total del DR. Los valores de superficie afectada más altos, superiores a 35 000 ha en los tres estratos, se registraron en el periodo 1975-1980, y en el año 1996.



**Figura 1. Variación media anual de la superficie ensalitrada en tres estratos de suelo y de la superficie con niveles freáticos superficiales, registrados durante el periodo 1972-2001 en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, México.**

Cabe observar que en todos los estudios de salinidad se encontraron variaciones en los resultados. Es así que en el estrato de 0-30 cm se estimó una desviación estándar (DESV) de 3996 ha y un coeficiente de variación (CV) del 16%; en el estrato a 30-60 cm la DESV resultó de 6020 ha, con un CV del 19%; en el estrato 60-120 cm la DESV fue de 15 189 ha y el CV fue del 30%. Las afectaciones por salinidad en los 3 estratos presentan diferencias estadísticas significativas con 95% de confianza, ya que el valor de F calculado de 17.26 resultó mayor que el valor límite de F de 3.40. Estas variaciones probablemente se debieron a las diferentes condiciones de las variables temperatura, precipitación pluvial, volumen de agua de riego aplicado y superficie afectada por un nivel freático superficial, que se observaron en ambos años; por ejemplo en el año de 1976 se tuvo una temperatura más baja y una menor precipitación pluvial que en 1996.

La superficie anual promedio de afectación por un nivel freático superficial (< 1.5 m) fue de poco más de 6000 ha durante 1965, 1975 y 1980; en contraste en 1985 resultó cercana a 41 500 ha, siete veces mayor que en aquellos tres años anteriores (Figura 1). La superficie media anual afectada por un nivel freático superficial resultó de 20 225 ha para el periodo 1970-2001, con valores mínimos y máximos de 8400 ha (8%) en 1971 y 41 431 ha (37%) en 1985. Con los datos de superficie con nivel freático superficial de los 20 estudios consultados, se obtuvo una DESV de 10 016 ha y un

CV del 48%; y con los datos de superficies afectadas dentro del periodo de temperaturas más altas que comprenden los años 1992-2001, la DESV resultó de 24 628 ha y el CV del 24%.

Durante el periodo 1981-1999 se estimaron las mayores afectaciones históricas por niveles freáticos superficiales que se hayan inventariado en el DR; los meses con mayores problemas fueron febrero y marzo, que también fueron los meses en los que se aplicaron mayores volúmenes de agua para riego. En un análisis de regresión lineal simple con datos del periodo 1971-1996 se encontró una correlación entre la superficie ensalitrada como variable dependiente y la superficie con un nivel freático superficial como variable independiente; los estadísticos  $R^2 = 0.89$  y un valor de F calculado de 48.02 significativo con  $\alpha = 0.05$ , muestran que los niveles freáticos superficiales explicaron en un 89% el ensalitrado del suelo en el estrato 0-30 cm de profundidad.

En el lapso de 1970-2001, la temperatura y la precipitación pluvial tuvieron valores medios de 18.4 °C y 415 mm, respectivamente. El promedio de la temperatura empezó a incrementarse a partir de 1992 cuando los promedios anuales superaron los 19 °C, y entre este año y 2001 el valor medio fue de 20.6 °C (Figura 2); el aumento de 2.2 °C es equivalente al 12.2%, esta elevación en la temperatura concuerda con el comportamiento registrado a nivel nacional con base en observaciones entre 1970-2008 (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). También entre 1992-2001

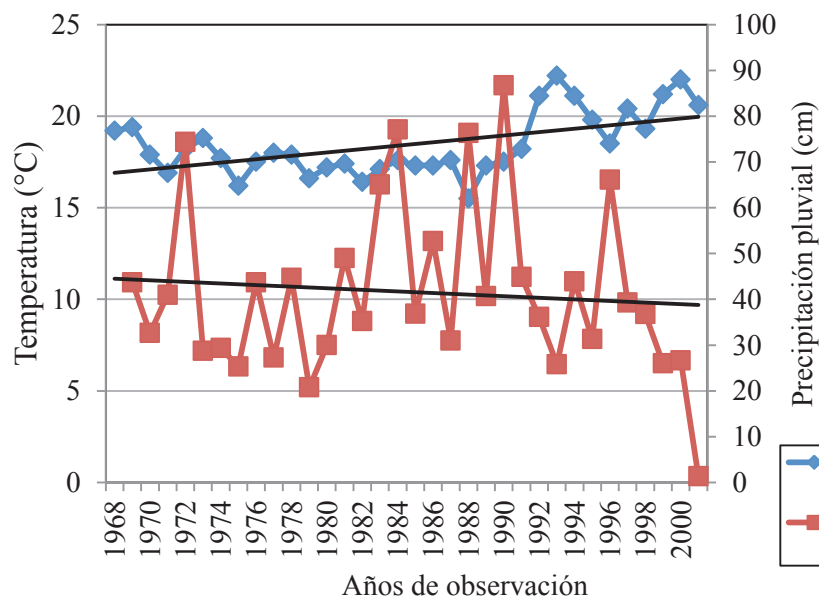


Figura 2. Variación media anual y tendencias de la temperatura y de la precipitación pluvial observadas durante el periodo 1968-2001 en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, México.

la precipitación pluvial disminuyó a un valor medio de 333 mm anuales, que se traduce en una reducción de 82 mm que equivalen al 19.6% del total anual con respecto al periodo 1968-1991.

En el periodo 1970-2001 el volumen promedio anual de agua de riego aplicado fue de 925.03 hm<sup>3</sup>, aumentó a 939.16 hm<sup>3</sup> durante el periodo 1970-1991 y disminuyó a 901.53 hm<sup>3</sup> en 1992-2001. Durante 1970-2001 la temperatura media anual fue de 18.4 °C y la precipitación pluvial media anual fue de 415 mm; en el lapso 1970-1991 la temperatura media anual fue de 17.4 °C mientras que la precipitación pluvial tuvo un promedio anual de 452 mm. Por último en el lapso 1992-2001 la temperatura media tuvo un valor de 20.6 °C y la precipitación pluvial media fue de 333 mm. Estos datos muestran que en el periodo 1970-1991, de menor temperatura que en el periodo 1970-2001 se tuvieron mayores precipitaciones pluviales y en el DR se dispuso de un mayor volumen de agua de riego comparado con el periodo 1992-2001. En este periodo la temperatura se incrementó 2.2 °C (12.1%), la precipitación pluvial se redujo 82 mm (19.8%) y el volumen de agua de riego bajó 30.2 hm<sup>3</sup> (3.2%), con respecto a la etapa 1970-2001.

La superficie media anual cosechada entre 1983-2001 fue de 103 660 ha; entre los años 1983-1992 el promedio fue de 108 240 ha, y en el periodo que va de 1993-2001, en el cual se observó un incremento de la temperatura y una reducción de la precipitación

pluvial, la superficie cosechada fue de 99 080 ha; la disminución de 9159 ha significa 9.2%. La producción agrícola media anual en el periodo 1983-2001 fue de 578 708 Mg; en el periodo de 1983-1991 el promedio fue de 522 775 Mg; y en el periodo de 1992-2001, se obtuvo una media de 623 454 Mg.

### Relación de la Temperatura con la Salinidad, Manto Freático Superficial, Volumen de Riego y Producción Agrícola

En el análisis de regresión lineal simple las variables dependientes fueron salinidad, nivel freático y producción agrícola; como variables independientes se analizaron temperatura, precipitación pluvial, volumen de riego, nivel freático y contenido de sales en el agua de riego (Cuadro 1). El efecto del aumento de la temperatura en el incremento de la superficie ensalitrada se observó en el estrato 0-30 cm que es un estrato superficial; considerando el periodo 1977-1996 en donde hay una consistencia entre el aumento de temperatura y de las áreas ensalitradas, la correlación resultó alta (modelo 1,  $R^2 = 0.91$ ). El efecto se debió a que éste es un estrato que está más expuesto al ascenso capilar de sales por la elevación de niveles freáticos y como consecuencia de la evapotranspiración. De acuerdo con este modelo, en el estrato superficial con la elevación de la temperatura aumenta la superficie ensalitrada.

Sin embargo, en los estratos subsuperficiales a 30-60, 60-90 y 0-120 cm (modelos 2-4), los valores de salinidad más altos (registrados en 1976) se cuantificaron cuando las temperaturas fueron más bajas (1970-1991); con excepción de 1996, ubicado dentro del periodo de incremento de temperatura (1992-2001) causado por el calentamiento global, en el cual se registró una superficie afectada de 42 272 ha. En los estratos subsuperficiales la correlación entre la temperatura y la superficie ensalitrada se reflejó en una reducción del área ensalitrada (modelos 2-4;  $R^2 = 0.70$ ,  $0.81$  y  $0.71$ , respectivamente).

Asimismo, la magnitud en los valores de los coeficientes de determinación calculados muestran que la temperatura no es la única variable que influye en el ensalitramiento; por lo cual se analizaron otras variables que pueden influir en el ensalitramiento del suelo como son: los niveles freáticos superficiales, la precipitación pluvial, el volumen de agua de riego y la concentración de sales en el agua de riego (De la Peña, 1979, 1982; Ayers y Westcot, 1987; Pulido *et al.*, 2001, 2009).

La influencia de niveles freáticos en el incremento de superficie ensalitrada se observó en el periodo 1971-1996, en el estrato 0-30 cm (modelo 5,  $r^2 = 0.89$ ); dentro de este lapso, en 1985, se cuantificaron las mayores afectaciones por niveles freáticos superficiales (Figura 1), igualmente, se cuantificaron las más altas superficies ensalitradas (años 1976, 1977 y 1996), que coincidieron con parte de la época con temperaturas más altas. Estos resultados confirman lo establecido por varios autores, en cuanto a que los niveles freáticos superficiales tienen relación con el ensalitramiento de los suelos (De la Peña, 1979; Ayers y Westcot, 1987; Rhoades, 1990). El incremento de superficie con manto freático se relacionó con la elevación de la temperatura, específicamente en el periodo 1971-1980 cuando la temperatura media anual varió de 16.2 a 18.8 °C (modelo 6;  $R^2 = 0.67$ ).

Pero en el periodo de mayor aumento en la temperatura (1991-2001) con variaciones de 18.2 a 22.2 °C, se distinguió una disminución de las superficies con niveles freáticos (modelo 7;  $R^2 = 0.77$  y Figura 1); ya que la superficie más afectada se registró en 1985, con 41 431 ha y en este año la temperatura media anual fue de 17.3 °C. A partir de 1985 se delimitó una disminución de las áreas afectadas por un nivel freático superficial, que en el año 2000 fue de 7700 ha, con una temperatura de 22 °C. La explicación es que

con temperaturas altas la evapotranspiración aumenta, influyendo en la profundización de niveles freáticos que se manifiestan en menores superficies afectadas.

Se estableció una relación entre la superficie ensalitrada y los volúmenes de agua de riego aplicados considerando los estratos 0-30 (modelo 8,  $R^2 = 0.85$ , periodo 1971-2001) y 30-60 cm (modelo 9,  $R^2 = 0.91$ , periodo 1971-2001). El incremento en la aplicación de volúmenes de riego se reflejó en mayores superficies ensalitradas analizando datos dentro del periodo 1970-1991. En esta fase se registraron en promedio mayores precipitaciones pluviales. Comparativamente, entre 1970-1992 se utilizaron para riego 939.16 hm<sup>3</sup>, mientras que en el periodo 1993-2001 se aplicaron 901.5 hm<sup>3</sup>; la diferencia fue de 37.63 hm<sup>3</sup> y es equivalentes al 4.2%. Los volúmenes de riego influyen en el desarrollo de superficies con niveles freáticos superficiales (modelo 11,  $R^2 = 0.69$ ); por lo que el agua de riego es una de las principales causas de un nivel freático superficial. Además, el agua de riego contiene sales disueltas que contribuyen al ensalitramiento del suelo. Al respecto, durante el ciclo agrícola 1998-1999 la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) varió de 640 hasta 1229 mg l<sup>-1</sup>; en este periodo se evaluó el impacto del contenido de sales del agua de riego en el suelo, y se observó que se elevaron los valores de CE, de 7.5 a 10 dS m<sup>-1</sup> y de PSI de 8.8 a 12.1% (Beltrán *et al.*, 1999).

Las lluvias generan humedad en el suelo que disuelve las sales y éstas ascienden a la superficie por capilaridad, por lo que el estrato 0-30 cm de profundidad es el que resultó más afectado. La presencia de áreas ensalitradas en este estrato se explica por el efecto del agua de las lluvias que disuelven las sales y aportan humedad al manto freático; y éste por efecto de la temperatura y evaporación asciende a la superficie del suelo y deja sales en el estrato superficial (modelo 10,  $R^2 = 0.54$ ). Entre 1992-2001 cuando las precipitaciones pluviales fueron más bajas, en promedio de 333 mm, y la temperatura media fue de 20.6 °C, el promedio de las superficies ensalitradas fue de 32 789 ha. Mientras que en el periodo 1970-1990 la precipitación pluvial promedio fue de 452 mm, la temperatura media de 17.4 °C, y la superficie media ensalitrada resultó de 25 578 ha; el incremento llegó al 28%. Las condiciones de una temperatura alta y una precipitación pluvial baja, como las registradas en el periodo 1992-2001, propiciaron el incremento de salinidad del suelo en el estrato 0-30 cm de profundidad.

El volumen medio de producción agrícola en el periodo 1983-2001 fue de 578 708 Mg. Al dividir este periodo en dos grupos tomando como punto de inflexión el año de 1992 que es cuando se observó un marcado incremento en la temperatura, coincidente con la tendencia observada a nivel mundial y con los registros reportados para México (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012), se encontró que en el primer grupo que incluye 1983-1992 la producción agrícola media fue de 522 180 Mg, y en el segundo grupo que comprende 1993-2001, la producción media sumó 635 236 Mg.

Se correlacionaron la producción agrícola como variable dependiente y la temperatura como variable independiente, con datos de 1987-1991 y se encontró que cuando la temperatura fue más estable (primer periodo), con un valor medio de 17.2 °C, ésta no impactó negativamente en la producción. En ese primer grupo de observaciones la producción aumentó al elevarse la temperatura sin superar los 18.2 °C (modelo 12,  $R^2 = 0.86$ ). Sin embargo, en el periodo 1994-2001 con una temperatura media anual de 20.4 °C, se encontró un impacto negativo de ésta en la producción agrícola, por cuanto se distinguió una disminución en el volumen de cosechas (modelo 13,  $R^2 = 0.71$ ). Una explicación de esta reducción en la producción es debida a que la mayor parte de cultivos producidos en el DR 038 río Mayo tienen fotosíntesis tipo  $C_3$ , cuya temperatura óptima está entre 15 y 20 °C, como el trigo, frijol, papa y tomate (Reilly, 1996; Luo, 2011). Otra explicación es que durante 1993-2001 la superficie de siembra fue de 98 084 ha, menor que la superficie cultivada entre 1983-2001 de 103 660 ha; también la baja en el volumen de producción se debió a una menor disponibilidad de agua de riego.

Con base en el modelo 13 se estimó el impacto de la temperatura en la producción. Con una temperatura media anual de 19.2 °C entre 1985-2001, la producción estimada fue de 751 256 Mg; si la temperatura media anual en el periodo 1992-2001 tuvo el valor de 20.6 °C entonces la producción estimada con el modelo 13 sería de 656 076 Mg. La diferencia o pérdida de cosecha se estimó en 95 180 Mg equivalente al 14.5%. La diferencia de temperatura entre los dos periodos que se analizaron fue de 1.4 °C, por lo que se estimó una pérdida de cosecha de 67 986 Mg equivalentes al 10.4% por cada grado centígrado de aumento, a partir de los 19.2 °C.

Se estimó el impacto en la producción en la superficie afectada por niveles freáticos superficiales, en el periodo de mayor temperatura, que coincidió con las más altas afectaciones por niveles freáticos (modelo 14,  $R^2 = 0.93$ ). Con base en el modelo 14 y considerando una superficie media afectada de 27 989 ha en el periodo 1985-2001, la producción estimada con el modelo 14 fue de 653 201 Mg. Si la superficie media anual afectada con un nivel freático superficial entre 1970-2001 fue de 20 225 ha, entonces la producción estimada con el modelo 14 fue de 724 630 Mg; la diferencia de producción representó una pérdida de 71 429 Mg equivalente al 10.9%.

Con datos de salinidad del agua de riego (Beltrán *et al.*, 1999) y de producción de los años 1998-2000 se elaboró el modelo 15 ( $R^2 = 0.61$ ); con base en éste se estimó una pérdida de cosecha del 25.3% por el incremento de la salinidad del agua de riego de 0.67 a 1.4 dS  $m^{-1}$ . Beltrán *et al.* (1999) verificaron en el trigo un decremento en la producción de grano de 1 Mg  $ha^{-1}$ , al aumentar de 0.67 a 1.4 dS  $m^{-1}$  la concentración de sales en el agua de riego.

En general, del análisis estadístico realizado mediante los modelos de regresión lineal simple del Cuadro 1, se concluye que éstos explican parcialmente la relación de la salinidad, los niveles freáticos superficiales y la producción agrícola, con variables climáticas y agronómicas; es así que se elaboraron modelos de regresión lineal múltiple. En estos modelos se analizó la salinidad como variable dependiente de la temperatura, superficie afectada con niveles freáticos, volumen de riego aplicado y precipitación pluvial. Se analizó la superficie afectada con niveles freáticos superficiales como variable dependiente, y como variables independientes la temperatura, volumen de riego aplicado y precipitación pluvial. También se analizó la relación de la producción agrícola con la temperatura, salinidad, niveles freáticos superficiales, volumen de riego y precipitación pluvial (Cuadro 2).

Con el modelo número 16 (Cuadro 2) se estimó el impacto de las variables independientes temperatura, superficie con un nivel freático superficial, volúmenes de riego aplicados y precipitación pluvial, en el aumento de la salinidad en el estrato 0-30 cm como variable dependiente. Para realizar una predicción se asumieron las siguientes condiciones: una temperatura de 20.6 °C que es el promedio anual registrado en el periodo 1992-2001; una superficie con un nivel

**Cuadro 1. Modelos de regresión lineal simple que relacionan salinidad, temperatura, superficie con niveles freáticos superficiales, producción agrícola.**

Periodo	Estrato	Modelo	Modelo de regresión	R <sup>2</sup>	Fc	Ft
	cm					
1977-1996	0-30	1	CE = 13670(T) - 210123	0.91	19.86	18.51
1971-2001	30-60	2	CE = -2731.5(T) + 80478	0.70	14.38	5.98
1971-2001	60-90	3	CE = -10153.9(T) + 234369	0.81	26.33	5.98
1971-2001	0-120	4	CE = -4314.8(T) + 115014	0.71	17.13	5.59
1977-1996	0-30	5	CE = 0.814(MF) + 14322	0.89	48.02	5.99
1971-1980	---	6	MF = 3533.1(T) - 49906	0.67	8.27	7.70
1985-2001	---	7	MF = -6524(T) + 149315	0.77	13.72	7.70
1971-2001	0-30	8	CE = 82.93 (VOL.) -34597.63	0.85	17.84	10.12
1971-2001	30-60	9	CE = 47.98 (VOL.) -14111.3	0.91	44.83	7.70
1971-2001	0-30	10	CE = 204.34(PP) + 20518	0.54	8.34	5.59
1970-2001	---	11	MF = 45.039(VOL.) - 23561	0.69	34.87	4.54
1987-1991	---	12	PROD = 66.7488(T) - 607.7286	0.86	18.95	10.12
1994-2001	---	13	PROD = -68.0967(T) + 2058.7	0.71	10.04	7.70
1985-2001	---	14	PROD = -0.0092(MF) + 910.70	0.93	27.12	18.51
1996-2000	---	15	PROD = -386.60(CEar) + 1035.82	0.90	38.18	7.70

CE = superficie ensalitrada (ha); T = temperatura (°C); MF = superficie con niveles freáticos <1.5 m (ha); PP = precipitación pluvial (cm); VOL = volumen de agua utilizado para riego (hm<sup>3</sup>); PROD = producción (Mg × 1000); CEar = conductividad eléctrica del agua de riego (dS m<sup>-1</sup>); Fc = valor de F calculado con 95% de confianza; Ft = valor de F crítico; α = 0.05 de significancia. El estrato solo aplica para superficie ensalitrada.

freático superficial < 1.5 m de profundidad de 24 628 ha que es el nivel medio anual del periodo 1997-2001; un volumen de riego de 901.53 hm<sup>3</sup> promedio anual del periodo 1993-2001 y una precipitación pluvial media anual de 333 mm registrada en el periodo 1992-2001. Como resultado se obtuvo una superficie ensalitrada de 31 739 ha, que restada a la superficie media ensalitrada de 25 578 ha en el estrato 0-30 cm del periodo 1971-2001 da un incremento de 6161 ha, equivalente al 24.1%.

Con base en el modelo número 17 (Cuadro 2) que se elaboró para el estrato 30-60 cm de profundidad, del cual se obtuvo una R<sup>2</sup> = 0.95 y una significancia estadística del 95%, se estimó la salinidad del suelo utilizando una temperatura de 20.6 °C, una superficie de 24 628 ha con nivel freático superficial, un volumen de riego de 901.53 hm<sup>3</sup> y una precipitación pluvial de 333 mm. La superficie ensalitrada resultante fue de 36 435 ha, superior a las 31 458 ha de superficie media ensalitrada estimada para el periodo 1971-2001; el incremento de superficie ensalitrada representa 15.8%.

El modelo número 18 se desarrolló con datos del estrato 60-90 cm de profundidad. En este modelo

se sustituyeron: una temperatura de 20.6 °C, una superficie con nivel freático superficial de 24 628 ha, un volumen de riego de 1255 hm<sup>3</sup> y una precipitación pluvial de 391 mm; el resultado es una superficie ensalitrada de 26 782 ha que es menor en 23 781 ha equivalentes al 47%, con respecto a la superficie media estimada de 50 563 ha del estrato a 60-90 cm para el periodo 1971-2001.

De las estimaciones en cuanto a superficie ensalitrada desarrolladas con los modelos 16-18, se concluye que con el calentamiento global en los estratos a 0-30 y 30-60 cm de profundidad se incrementaría la superficie ensalitrada. El estrato de suelo más afectado es el de 0-30 cm, seguido del estrato a 30-60 cm de profundidad; en ambos es donde se concentra el sistema radicular de la mayoría de los cultivos establecidos en este DR. Contrariamente, en el estrato de 60-90 cm se reducirían las afectaciones por sales. Ello se explica por el incremento de temperatura y disminución de precipitación pluvial; esta última responsable de un menor volumen de agua de riego. El incremento de temperatura favorece el aumento de la evapotranspiración que influye en el ascenso capilar de humedad y de sales hacia la superficie del

**Cuadro 2. Modelos de regresión lineal múltiple que relacionan la salinidad con la temperatura, niveles freáticos, volumen de agua de riego, producción agrícola, precipitación pluvial y superficie cosechada.**

Periodo	Estrato	Modelo	Modelo de regresión	R <sup>2</sup>	Fc	Ft
	cm					
1973-1980	0-30	16	CE = 42014.117-969.0305*T+0.7997*MF-18.2083*VOL+19.2406*PP	0.91	11.09	6.38
1971-2001	30-60	17	CE = 65291.175-1267.718*T+0.7369*MF-27.1452*VOL+10.7613*PP	0.94	12.93	9.12
1971-2001	60-90	18	CE = 193917.95-8459.89*T-1.6561*MF+42.1542*VOL-12.7343*PP	0.88	8.90	5.19
1971-1977	---	19	MF = -19821.3076+3566.9902*T-38.8211*VOL+17.9834*PP	0.98	27.88	19.20
1993-2001	---	20	PROD = 1066.5374+57.8349*T-0.3071*PP+2.3622*VOL-0.0375*SUP	0.93	11.68	9.12
1985-2001	---	21	PROD = 728.5121+0.0014*CE-0.0079*MF	0.98	61.52	19.0

CE = superficie ensalitrada (ha); T = temperatura (°C); MF = superficie con niveles freáticos <1.5 m (ha); PP = precipitación pluvial (cm); VOL = volumen de agua utilizado para riego (hm<sup>3</sup>); PROD = producción (Mg × 1000); SUP = superficie cosechada (ha); Fc = valor de F calculado con 95% de confianza; Ft = valor de F crítico; α = 0.05 de significancia. El estrato solo aplica para superficie ensalitrada.

suelo; es también responsable del desarrollo de niveles freáticos superficiales. Estos resultados concuerdan con lo establecido por Richards (1974), Rhoades (1990) y Suarez y Jurinak (1990).

Se correlacionó la superficie con un nivel freático superficial como variable dependiente, y la temperatura, volumen de agua de riego y precipitación pluvial, como variables independientes (modelo número 19). En este sentido asumiendo una temperatura de 20.6 °C, un volumen de agua de riego de 901.53 hm<sup>3</sup> y una precipitación pluvial de 333 mm, se estimó una superficie con un nivel freático superficial de 24 650 ha. Esta superficie es más alta que la superficie media afectada por un nivel freático superficial en el periodo 1970-2001, de 20 225 ha; por lo tanto, se estimó un aumento de superficie afectada de 4425 ha que significa 21.9%. Este incremento se supone sería causado por el calentamiento global que se está manifestando en el planeta, especialmente a partir de la década de los setenta del siglo XX (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012).

El cambio climático podría provocar repercusiones adversas en la agricultura (Ojeda *et al.*, 2010). En este sentido se desarrolló el modelo número 20 donde el volumen de producción agrícola es la variable dependiente, y la temperatura, precipitación pluvial, volumen de agua de riego y superficie cultivada son las variables independientes. Es así que se sustituyeron en el modelo 20 una temperatura de 20.5 °C, precipitación pluvial de 382 mm, volumen de riego de 910.61 hm<sup>3</sup> y una superficie cultivada de 99 610 ha; la operación dio por resultado un volumen de producción de 551 322 Mg de productos agrícolas. El impacto

negativo, como es el caso, se obtuvo restando la cifra anterior de 635 236 Mg que es la producción media anual del periodo 1993-2001, de lo cual resultó una pérdida de 83 914 Mg equivalentes al 15.2%.

Para la mayoría de los cultivos que se produjeron durante el periodo 1970-2001 en el DR 038, los niveles altos de sales causaron decrementos en su rendimiento debido a las diferencias en cuanto a la tolerancia a las sales, de acuerdo con lo establecido por Ayers y Westcot (1987), Maas (1990) y Grieve *et al.* (2012). Es por ello que se desarrolló el modelo 21, en el cual el volumen de producción agrícola es la variable dependiente y la superficie ensalitrada y la superficie con un nivel freático superficial son las variables independientes. En el modelo 21 se sustituyeron una superficie ensalitrada de 42 272 ha que es la más alta reportada en el periodo 1985-2001 y una superficie con un nivel freático superficial de 32 070 ha que se registró en 1997, de lo cual resultó un volumen de producción de 534 338 Mg; esta cantidad restada del volumen de producción medio anual de 635 236 Mg estimadas en el periodo 1993-2001, dio una disminución de 100 898 Mg equivalentes al 18.9%.

## CONCLUSIONES

- En el Distrito de Riego 038 río Mayo, Son. los efectos del calentamiento global manifestados por medio del incremento en la temperatura, disminución de la precipitación pluvial, disminución en la disponibilidad de agua de riego, y el aumento en la concentración de sales en el agua de riego, incidieron en incrementos en las superficies afectadas por sales.

- Con el calentamiento global los problemas de salinidad del suelo se incrementaron 24.1% y 15.8% en los estratos de suelo a 30 y 60 cm de profundidad, respectivamente, en el periodo 1970-2001 analizado. Asimismo, se estimó un desarrollo de mayores superficies con niveles freáticos superficiales, del orden de 21.9% en el mismo periodo. El impacto del calentamiento global en el volumen de producción agrícola se estimó en una reducción del 15.2% de la producción agrícola.
- Se recomienda realizar estudios similares en otros distritos de riego y utilizar periodos de tiempo mayores, para lo cual es necesario generar datos a través de mediciones in-situ de las variables que se analizaron en el presente estudio.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de las autoridades del Distrito de Riego 038 río Mayo y de la Sociedad de responsabilidad Limitada del Distrito de Riego del río Mayo, por las facilidades otorgadas para revisar sus archivos documentales. También a los Ings. José Manuel Delgado y Jorge Infante Reyes, técnicos respectivos el año 2001 de las instituciones señaladas, por su apoyo durante la etapa de acopio de datos y revisión de documentos.

### LITERATURA CITADA

- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO, Riego y Drenaje. Núm 29, rev.1. Roma, Italia.
- Beltrán, F. M. de J., C. F. Cabrera, B. J. M. Lam y Z. A. Lozano. 1999. Efecto del uso conjunto del agua subterránea y superficial en la productividad de los suelos del Valle del Mayo. Informe 1998. INIFAP, Campo Agrícola Experimental Valle del Mayo. Navojoa, Sonora, México.
- De la Peña, I. 1979. Principios y solución de drenaje parcelario. Boletín Técnico No. 9, SARH. Ciudad Obregón, Sonora, México.
- De la Peña, I. 1982. Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen, clasificación, prevención y recuperación. Boletín Técnico No. 10, SARH. México, D. F.
- De la Peña, I. 1993. Problemas de salinidad y drenaje en México. Documento de circulación interna. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional en el Noroeste, Subgerencia de Riego y Drenaje. Cd. Obregón, Sonora, México.
- Grieve, C. M., S. R. Grattan, and E. V. Maas. 2012. Plant salt tolerance. pp: 405-459. *In*: W. W. Wallender and K. K. Tanji (eds.). Agricultural Salinity Assessment and Management. Reston, VA, USA.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1997. Proyecto ejecutivo de drenaje parcelario para recuperar 5,000 ha en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. Eric II: Extractor rápido de información climatológica, 1929-1998. Comisión Nacional del Agua; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; IMTA. Jiutepec, Morelos, México.
- Luo, Q. 2011. Temperature thresholds and crop production: A review. *Clim. Change* 109: 583-598.
- Maas, E. V. 1990. Crop salt tolerance. pp. 262-326. *In*: W. W. Wallender and K. K. Tanji (eds.). Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE Manuals and reports on engineering Practice No. 71. Reston, VA, USA.
- Martínez A., P. F. y C. Patiño Gómez. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tec. Cien. Agua* 3: 5-20.
- Montero M., M., J. Martínez Jiménez, N. I. Castillo Pérez y B. E. Espinoza Tamarindo. 2010. Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: Precipitación y temperatura máxima y mínima. pp. 39-63. *In*: P. Martínez Austria y C. Patiño Gómez (eds.). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Capítulo 3. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Ojeda B., W., M. Iñiguez Covarrubias y J. M. González Camacho. 2010. Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático. pp. 115-142. *In*: P. Martínez Austria y C. Patiño Gómez (eds.). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Capítulo 5. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido M., L., J. González Meraz, C. Fuentes Ruiz, M. Villarreal Pulido, R. Armendáriz Rubio y J. L. L. Medina Ruiz. 2001. Informe final del proyecto: Desarrollo y aplicación de una metodología para formular un plan director para el manejo y control de la salinidad en un distrito de riego. IMTA, CNA, Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido M., L., C. L. Wiegand, J. González Meraz, B. D. Robles Rubio, X. Cisneros Estrada y O. Lemus Ramírez. 2003. La salinidad del suelo y su efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados con imágenes de satélite en tres distritos de riego. *Ing. Hidrául. Méx.* 18: 83-97.
- Pulido M., L., J. González Meraz y M. Villarreal Pulido. 2009. Metodología para el diagnóstico, manejo y control de la salinidad, aplicada en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México. *Ing. Hidrául. Méx.* 24: 55-72.
- Pulido M., L., J. González Meraz, C. L. Wiegand, J. Infante Reyes y J. M. Delgado. 2010. Monitoreo de la salinidad mediante sensores remotos. *Terra Latinoamericana* 28: 15-26.
- Reilly, J., W. Baethgen, F. E. Chege, S. C. van de Geijn, Lin Erda, A. Iglesias, G. Kenny, D. Patterson, J. Rogasik, R. Rötter, C. Rosenzweig, W. Sombroek, and J. Westbrook. 1996. Agriculture in a changing climate: Impacts and Adaptation. pp. 427-467. *In*: R. T. Watson, M. C. Zinyowera, and R. H. Moss (eds.). Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific technical analyses. Chapter 13. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
- Reyes, Q. C. 1994. Estudio agrológico semidetallado del Distrito de Riego 038 Río Mayo. Comisión Nacional del Agua. Distrito de Riego 038 Río Mayo. Navojoa, Sonora, México.



- Rhoades, J. D. 1990. Overview: Diagnosis of salinity problems and selection of control practices. pp. 18-41. *In*: K. K. Tanji (ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manu. Rep. Eng. Practices 71. New York, NY, USA
- Richards, L. A. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México.
- Suarez, D. and J. J. Jurinak. 1990. The chemistry of salt-affected soils and waters. pp. 57-88. *In*: W. W. Wallender and K. K. Tanji (eds.). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manuals and reports on engineering Practice No. 71. Reston, VA, USA.
- Tanji, K. K. 1990. Nature and extent of agricultural salinity. pp. 1-17. *In*: K. K. Tanji (ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manu. Rep. Eng. Practices 71. New York, NY, USA.

# CLORURO/ANIONES Y SODIO/CACIONES EN SOLUCIONES NUTRITIVAS Y COMPOSICIÓN MINERAL DE CULTIVARES DE TOMATE

## Chloride/Anions and Sodium/Cations Ratios in the Nutrient Solution and Mineral Composition of Tomato Cultivars

Saúl Parra Terraza<sup>1‡</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. Carretera Culiacán-El Dorado km 17.5. Apdo. Postal 726. 80000 Culiacán, Sinaloa, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (saul.parra@uas.edu.mx)

### RESUMEN

Problemas de sanidad en suelos del valle de Culiacán ha ocasionado que la siembra de tomate se realice en suelos cercanos a la costa, donde el agua de riego es de menor calidad, por contener concentraciones de cloro (Cl) y sodio (Na) con riesgo de toxicidad para las plantas o de interactuar con los nutrientes de la solución nutritiva (SN), reduciendo su disponibilidad. Esta investigación evaluó en invernadero los efectos de relaciones Cl<sup>-</sup>/aniones y Na<sup>+</sup>/cationes en la SN sobre las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas y tallos de dos cultivares de tomate (*Solanum lycopersicum* L. cvs. Polaris e ISIS). El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 3<sup>2</sup>, con cuatro repeticiones. Los factores fueron: 1) relación Cl<sup>-</sup>/aniones (25, 50 y 75/100), y 2) relación Na<sup>+</sup>/cationes (25, 50 y 75/100). Se realizó un análisis de varianza y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). En hojas del cultivar ISIS, la combinación 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes y 25/100 Cl<sup>-</sup>/aniones aumentó la concentración de Na, mientras que las combinaciones 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes con 25, 50 y 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones redujeron la concentración de K. La relación 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones en la SN redujo las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas del cultivar Polaris, y de Na, Ca y Mg en tallos de cultivar ISIS. La relación 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes en la SN incrementó las concentraciones de Na en hojas y tallos de cultivar Polaris y disminuyó las concentraciones de Ca y Mg en hojas de cultivar ISIS. Los resultados de este estudio indican que una proporción de 75% de Cl<sup>-</sup> en la SN, respecto al total de aniones, y una proporción de 50-75% de Na<sup>+</sup>, respecto al total de cationes, afectan las concentraciones nutrimentales en hojas y tallos de tomate de cultivares Polaris e ISIS.

**Palabras clave:** concentración de nutrimentos; desbalance nutrimental; salinidad.

### SUMMARY

Health problems in soils of the Culiacan valley have resulted in moving tomato cultivation toward the coast, where irrigation water is of lower quality. The high Na and Cl concentrations in the water can cause toxicity to plants or, by interacting with the nutrient solution (SN), can reduce nutrient availability. The objective of this study was to evaluate the effects of Cl<sup>-</sup> anion and Na<sup>+</sup> cation ratios in the nutrient solution on concentrations of Na, K, Ca and Mg in leaves and stems of two cultivars of tomato (*Solanum lycopersicum* L. cvs. Polaris and ISIS) produced in greenhouse. The experimental design was completely random with a factorial 3<sup>2</sup> arrangements and four replications. The factors were 1) Cl<sup>-</sup> anion (25, 50 and 75/100) ratios, and 2) Na<sup>+</sup> cation (25, 50 and 75/100) ratios. An analysis of variance was performed and treatment means were compared using the Tukey test ( $P \leq 0.05$ ). In ISIS leaves, application of 75/100 Na<sup>+</sup>/cations and 25/100 Cl<sup>-</sup>/anions increased Na concentration ( $P \leq 0.05$ ), while 75/100 Na<sup>+</sup>/cations with 25, 50 and 75/100 Cl<sup>-</sup>/anion combinations reduced K concentration ( $P \leq 0.05$ ). The 75/100 Cl<sup>-</sup> anion ratio in the nutrient solution reduced Na, K, Ca and Mg concentrations in leaves of the Polaris cultivar and Na, Ca, Mg concentrations in stems of the ISIS cultivar. The 75/100 Na<sup>+</sup> cation ratio in the nutrient solution increased Na concentration in leaves and stems of the Polaris cultivar and decreased Ca and Mg concentrations in leaves of the ISIS cultivar. The results of this study show that 75% of total Cl<sup>-</sup> anions in the SN and 50-75% of total Na<sup>+</sup> cations affect nutrient concentrations in leaves and stems of the Polaris and ISIS tomato cultivars.

#### Como citar este artículo:

Parra Terraza, Saúl. 2016. Relaciones cloruro/aniones y sodio/cationes en soluciones nutritivas y la composición mineral de dos cultivares de tomate. Terra Latinoamericana 34: 219-227.

Recibido: febrero de 2015. Aceptado enero de 2016.  
Publicado en Terra Latinoamericana 34: 219-227.

**Index words:** *nutrient concentration; nutrient imbalance; salinity.*

## INTRODUCCIÓN

El cloro (Cl) es un micronutriente para las plantas superiores y sus funciones en el metabolismo vegetal son diversas: regulador estomático, osmótico, enzimático y del pH celular, productor de oxígeno en la fotosíntesis, estabilizador del potencial de membrana, participante en la turgencia celular, y en la resistencia o tolerancia a enfermedades (Xu *et al.*, 2000; White y Broadley, 2001; Wenrong *et al.*, 2010). El efecto del Cl en los cultivos está bien documentado, pero en un gran número de casos su efecto se asocia al sodio (Na), cuyo exceso sería el principal responsable de la reducción del crecimiento, con poca atención al Cl (Tavakkoli *et al.*, 2011). El cloruro (Cl<sup>-</sup>) es el principal anión en la mayoría de los suelos salinos (Wenrong *et al.*, 2010) y una alta concentración de Cl<sup>-</sup> en el suelo puede provocar relaciones extremas entre iones afectando el rendimiento de los cultivos (Fageria, 2001). El Na y Cl son igualmente importantes, ya que ambos pueden ser tóxicos para las plantas si se acumulan en altas concentraciones en el citoplasma (Teakle y Tyerman, 2010; Tavakkoli *et al.*, 2011).

El Na es un elemento considerado benéfico, porque estimula el crecimiento de algunas especies de plantas, por ejemplo la espinaca (*Amaranthus* sp.) y la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) (Marschner, 1995), pero para la mayoría de especies vegetales, altas concentraciones de Na afectan su crecimiento al generar deficiencias de K, Ca y Mg (Parida y Das, 2005) o toxicidad por Na (Tester y Davenport, 2003).

Altas concentraciones de Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> en el medio afectan la absorción de N, P, K, Ca, S y Zn mediante interacciones de antagonismo y afectan la capacidad selectiva de las membranas (Shiyab *et al.*, 2013; Hussain *et al.*, 2015).

Sinaloa es el principal productor de tomate a nivel nacional; sin embargo, por problemas de sanidad en suelos provocados por nemátodos fitoparásitos y especies de *Fusarium oxysporum*, los horticultores sinaloenses están sembrando el tomate en suelos cercanos a la costa, donde el agua de riego es de menor calidad, contiene concentraciones de Cl y Na con restricción de uso por toxicidad (4-10 meq Cl L<sup>-1</sup> y 3-10 meq Na L<sup>-1</sup>) (Hanson *et al.*, 2006). Altas relaciones de adsorción de Na en el agua de riego deterioran

las propiedades del suelo, afectan el rendimiento de los cultivos (Ghafoor *et al.*, 2004) y disminuyen la disponibilidad de Ca en los suelos y su absorción por las plantas (Imran *et al.*, 2010; Naeem *et al.*, 2013). Los iones Cl y Na pueden interactuar con los nutrientes de la solución nutritiva (SN) reduciendo su disponibilidad y provocando desbalances nutrimentales, deficiencias y toxicidad en las plantas (Tester y Davenport, 2003).

Los productores del valle de Culiacán usan SN de baja salinidad (CE < 2.5 dS m<sup>-1</sup>) para la fertirrigación del tomate; estas SN están compuestas de seis macronutrientes (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) y cinco micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn, y Mo). Aunque el Cl es un micronutriente esencial para las plantas no se aplica en las SN, porque los aportes de Cl de la atmósfera varían anualmente de 17.6 a 36 kg ha<sup>-1</sup> (Reynolds *et al.*, 1997), aunque las cantidades de Cl depositadas en los suelos mediante el riego y la fertilización pueden ser mayores a 1000 kg ha<sup>-1</sup> (White y Broadley, 2001), lo cual excede la demanda de las plantas, por lo que la toxicidad por Cl es un peligro latente. Poco se conoce del uso de SN de baja salinidad que contengan concentraciones de Cl y Na con peligro de provocar toxicidad a las plantas de tomate. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar los efectos principales y la interacción de tres relaciones de Cl/aniones (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>) [25/100, 50/100 y 75/100] y tres relaciones de Na<sup>+</sup>/cationes (Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>) [25/100, 50/100 y 75/100] en soluciones nutritivas, sobre la composición mineral (Na, K, Ca y Mg) de hojas y tallos en dos híbridos de tomate.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Desde el 14 de octubre al 9 diciembre de 2011 se realizaron dos experimentos en un invernadero del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), Coordinación Culiacán (24° 44' 01.3" N, 107° 27' 16.4" O; altitud de 26 m); la temperatura máxima promedio del aire fue 40.3 °C y la mínima 18 °C. Las semillas de tomate de crecimiento indeterminado cv. "Polaris", tipo roma, y cv. "ISIS", tipo bola, se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades con volumen individual de 30 cm<sup>3</sup>; como sustrato se utilizó una mezcla de turba y vermiculita (1:1 v/v). El diseño para ambos experimentos fue completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos 3<sup>2</sup>, y cuatro repeticiones, para un total de 36 unidades experimentales por experimento, donde

cada unidad experimental consistió de 30 plántulas. Los factores y niveles evaluados fueron: 1) tres relaciones (25/100, 50/100 y 75/100) porcentuales Cl<sup>-</sup>/aniones (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>), y 2) tres relaciones (25/100, 50/100 y 75/100) porcentuales Na<sup>+</sup>/cationes (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>) (Cuadro 1). Al combinar las tres relaciones porcentuales Cl<sup>-</sup>/aniones con las tres relaciones porcentuales Na<sup>+</sup>/cationes resultaron nueve SN, las cuales se diseñaron a partir de modificaciones de la solución universal de Steiner (1984), ya que esta solución no incluye Cl<sup>-</sup> ni Na<sup>+</sup> en su composición, y consistieron en incrementar la concentración de Cl<sup>-</sup> con relación a NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, así como la concentración de Na<sup>+</sup> con relación a K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>. En el Cuadro 2 se presenta la composición química de las SN, una vez que fueron calculadas y ajustadas a un potencial osmótico de -0.072 MPa, de acuerdo a los lineamientos propuestos por Steiner (1984). Las SN se prepararon con sales inorgánicas grado reactivo y agua destilada y se les añadieron las concentraciones de micronutrientes (mg L<sup>-1</sup>) siguientes: Fe 2.5, Mn 0.5, B 0.5, Cu 0.02 y Zn 0.05. El Fe se proporcionó como Fe-EDTA y el pH de las SN se ajustó a 5.5±0.1 con HCl 1N o NaOH 1N. Diez días después de la siembra se inició la aplicación de las SN, cuyas concentraciones se incrementaron cada 10 d en el orden: 50, 75 y 100%. Las plántulas se regaron diariamente a las 08:00 y 14:00 h asperjando al follaje los tratamientos con atomizadores (1 L de capacidad) hasta el escurrimiento de la solución por los orificios inferiores

de las cavidades. Cuarenta días después de la siembra se evaluó el efecto de los factores sobre la composición mineral y se seleccionaron 20 plántulas por tratamiento de cada cultivar y se integraron en cuatro repeticiones compuestas, cada una, con cinco plántulas, las que se fraccionaron en hojas y tallos. En estos órganos se realizó el análisis químico para determinar las concentraciones de Na, K, Ca y Mg conforme a las metodologías reportadas por Motsara y Roy (2008). Na y K fueron determinados con un fotómetro de flama y Ca y Mg con espectrómetro de absorción atómica. El análisis de varianza de las variables consideradas se realizó para los factores principales y para su interacción, con el paquete estadístico SAS versión 8 (SAS, 1999).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Concentración de Nutrientes en Hojas y Tallos de Tomate “cv. Polaris”

No se encontró efecto significativo de la interacción Cl<sup>-</sup>/aniones × Na<sup>+</sup>/cationes para los nutrientes Na, K, Ca y Mg, por lo cual el análisis de los resultados fue para los efectos de los factores principales. Así, hubo diferencias ( $P \leq 0.05$ ) en las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas debido a los niveles de la relación Cl<sup>-</sup>/aniones, donde al utilizar las relaciones 25/100 y 50/100 Cl<sup>-</sup>/aniones se obtuvieron valores más altos de las concentraciones de cationes, respecto a las hojas

**Cuadro 1. Relaciones porcentuales entre los iones de las soluciones nutritivas utilizadas.**

Tratamiento	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Σ A <sup>†</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Σ C <sup>‡</sup>
----- % mol m <sup>-3</sup> -----										
1	45	3.75	26.25	25	100	26.25	33.75	15	25	100
2	30	2.50	17.50	50	100	26.25	33.75	15	25	100
3	15	1.25	8.75	75	100	26.25	33.75	15	25	100
4	45	3.75	26.25	25	100	17.50	22.5	10	50	100
5	30	2.50	17.50	50	100	17.50	22.5	10	50	100
6	15	1.25	8.75	75	100	17.50	22.5	10	50	100
7	45	3.75	26.25	25	100	8.75	11.25	5	75	100
8	30	2.50	17.50	50	100	8.75	11.25	5	75	100
9	15	1.25	8.75	75	100	8.75	11.25	5	75	100

<sup>†</sup> Sumatoria de aniones; <sup>‡</sup> Sumatoria de cationes.

**Cuadro 2. Composición química de las soluciones nutritivas usadas en el experimento.**

Tratamiento	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	CE <sup>‡</sup>
	----- mol <sub>c</sub> m <sup>-3</sup> -----								
1	8.31	0.69	4.84	4.61	4.84	6.23	2.77	4.61	2.10
2	5.39	0.45	3.15	9.00	4.72	6.07	2.70	4.50	2.10
3	2.63	0.22	1.53	13.14	4.60	5.91	2.63	4.38	2.10
4	7.91	0.66	4.61	4.39	3.08	3.96	1.76	8.79	2.02
5	5.14	0.43	3.00	8.57	3.00	3.86	1.71	8.57	2.02
6	2.51	0.21	1.46	12.54	2.93	3.76	1.67	8.36	2.02
7	7.55	0.63	4.40	4.19	1.47	1.89	0.84	12.58	2.00
8	4.91	0.41	2.87	8.19	1.43	1.84	0.82	12.28	2.00
9	2.40	0.20	1.40	12.00	1.40	1.80	0.80	12.00	2.00

‡ CE = conductividad eléctrica en dS m<sup>-1</sup>.

donde se utilizó las relaciones 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones (Cuadro 3). Hubo una relación inversa entre la relación Cl<sup>-</sup>/aniones y las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas, ya que al incrementar de 25/100 a 75/100 la relación Cl<sup>-</sup>/aniones en la SN, las concentraciones de los nutrimentos disminuyeron 36.5, 16.7, 25 y 26.3%, respectivamente. La reducción de Na, K, Ca, y Mg es difícil de explicar, por la carencia de trabajos realizados en condición de baja salinidad y alta proporción de Cl<sup>-</sup> en la SN; en la relación 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones hubo una mayor absorción de Cl en hojas (3.84%), la cual es alta, considerando un rango óptimo de 0.2 a 0.4 g Cl kg<sup>-1</sup> de materia seca (Marschner, 1995), equivalentes a 0.02 a 0.04% de Cl, aunque las plantas usualmente contienen de 2 a 20 g Cl kg<sup>-1</sup> de materia seca (0.2 a 2% de Cl)

**Cuadro 3. Concentración de Na, K, Ca y Mg en hojas de plántulas de tomate cv. Polaris por efecto de las relaciones de Cl<sup>-</sup>/aniones y Na<sup>+</sup>/cationes en la solución nutritiva.**

Factor	Na	K	Ca	Mg
	----- % -----			
Relación porcentual de Cl <sup>-</sup> /aniones				
25/100	1.04 a <sup>†</sup>	1.62 a	4.24 a	1.14 a
50/100	0.88 ab	1.59 a	4.05a	1.08 a
75/100	0.66 b	1.35 b	3.18 b	0.84 b
Relación porcentual de Na <sup>+</sup> /cationes				
25/100	0.46 c	2.04 a	4.53 a	1.12 a
50/100	0.85 b	1.50 b	3.74 b	0.95 b
75/100	1.27 a	1.02 c	3.20 b	1.02 ab

<sup>†</sup> Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

(Wenrong *et al.*, 2010). La mayor absorción de Cl, pudo provocar un desbalance nutricional que se reflejó en una menor absorción de Na, K, Ca y Mg, por que una alta concentración de Cl en la solución puede reducir la actividad química de los iones y provocar relaciones desbalanceadas Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> (Fageria, 2001), y hacer susceptible a la planta al daño por iones específicos (Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>) y desbalances nutricionales. Komosa y Gorniak (2015) encontraron una relación positiva entre la concentración de Cl en la SN y la concentración de Cl en hojas de tomate, similar a lo encontrado en el presente trabajo. De igual manera, en ambos trabajos las concentraciones de K y Ca fueron reducidas. Genc *et al.* (2010) reportaron que concentraciones mayores de 10 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup> de Cl redujeron la concentración de Mg en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.), resultado similar fue obtenido en esta investigación con la relación 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones, equivalente a 12.28 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup> de Cl (Cuadro 2), y difiere de lo reportado por Komosa y Gorniak (2015), quienes mencionan que las concentraciones de Mg en hojas de tomate no fueron afectadas por el Cl en la SN.

El factor Na<sup>+</sup>/cationes provocó diferencias ( $P \leq 0.05$ ) en las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas (Cuadro 3), y de Na, K y Ca en tallos (Cuadro 4). Hubo una relación directa entre la relación Na<sup>+</sup>/cationes y la concentración de Na en hojas y tallos, ya que al aumentar la relación Na<sup>+</sup>/cationes en la SN las concentraciones de Na aumentaron ( $P \leq 0.05$ ). Con 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes en la SN la concentración de Na se incrementó 176.1% en hojas y 155.3 % en tallos, comparado con 25/100 Na<sup>+</sup>/cationes (Cuadros 3 y 4), atribuible a la alta proporción de Na (75%) en la SN,

**Cuadro 4. Concentración de Na, K, Ca y Mg en tallos de plántulas de tomate cv. Polaris por efecto de las relaciones de Cl/aniones y Na<sup>+</sup>/cationes en la solución nutritiva.**

Factor	Na	K	Ca	Mg
	----- % -----			
Relación porcentual de Cl/aniones				
25/100	0.97 a <sup>†</sup>	2.43 a	1.43 a	0.68 a
50/100	0.99 a	2.34 a	1.41 a	0.77 a
75/100	0.75 a	2.74 a	1.55 a	0.71 a
Relación porcentual de Na <sup>+</sup> /cationes				
25/100	0.47 b	3.26 a	1.49 ab	0.67 a
50/100	1.00 a	2.69 b	1.63 a	0.82 a
75/100	1.20 a	1.56 c	1.27 b	0.68 a

<sup>†</sup> Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

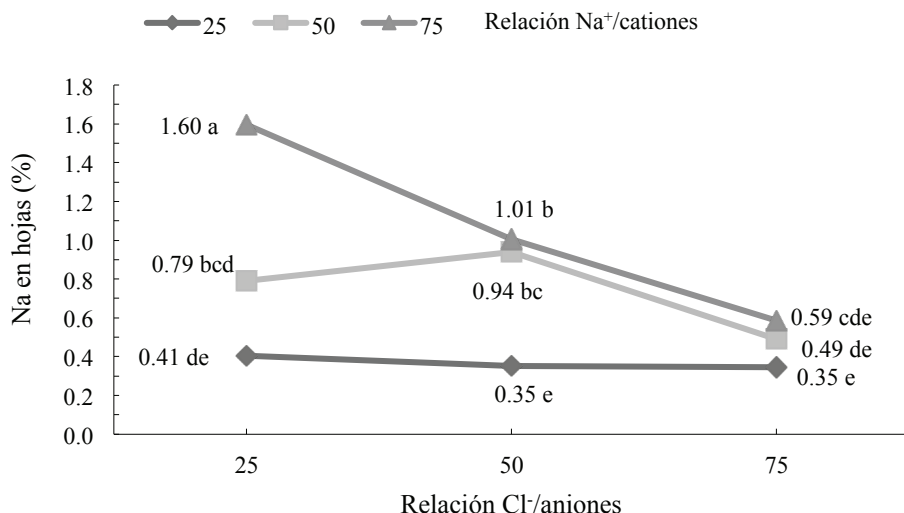
respecto a los cationes K<sup>+</sup> (8.75%), Ca<sup>2+</sup> (11.25%) y Mg<sup>2+</sup> (5%) (Cuadro 1), lo que favoreció la absorción de Na. Este resultado es parecido a lo reportado por Komosa y Gorniak (2015), quienes mencionan que aumentos de Na en el medio de crecimiento aumentaron la absorción y translocación de Na en el cultivo de tomate. La relación 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes provocó una reducción significativa ( $P \leq 0.05$ ) de K en hojas y tallos (50.9 y 52.1%, respectivamente) comparado con 25/100 Na<sup>+</sup>/cationes, probablemente por antagonismo o competencia provocado por la mayor concentración de Na en la SN, que disminuyó la conductividad hidráulica o la permeabilidad de los tejidos al agua, desplazando al K<sup>+</sup> de los sitios de intercambio (Halperin y Lynch, 2003) reduciendo la absorción de K<sup>+</sup> (Parida y Das, 2005; Naeini *et al.*, 2006; Lu *et al.*, 2009) y su acumulación en las hojas (Komosa y Gorniak, 2015), y por la menor concentración de K (8.75%) en la SN 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes, respecto a la SN 25/100 Na<sup>+</sup>/cationes, la cual tuvo 26.25 %K (Cuadro 1).

El antagonismo entre Na y K resulta por la semejanza de sus radios iónicos y energías de hidratación (Schachtman y Liu, 1999; Biggin *et al.*, 2001), por lo que Na compite con K por los sitios de unión eléctrica a nivel celular, afectando la entrada de K al interior de la célula al usar sus sistemas de transporte (Tale *et al.*, 2013). Además, el Na facilita la salida de K hacia el exterior de las células, debido a que altera la integridad de las membranas celulares al desplazar al Ca (Marschner, 1995; Vaghela *et al.*, 2010). En condición salina el Na provoca inactivación de enzimas y de

funciones celulares esenciales, consecuentemente los cultivos en suelos salinos pueden presentar una alta concentración de Na y baja concentración de K (Munns y Tester, 2008). El antagonismo Na-K observado en condición salina ( $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$ ), coincide con lo encontrado en el presente estudio, realizado en situación de baja salinidad ( $CE < 2.1 \text{ dS m}^{-1}$ ), pero con alta proporción de Na en la SN. La relación 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes redujo 29.4% la concentración de Ca en hojas y 14.8% en tallos (Cuadros 3 y 4), explicable por el antagonismo del Na con el Ca (Vaghela *et al.*, 2010), debido al mayor porcentaje de Na (75%) y menor de Ca (11.25%) en la solución 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes, comparado con 25/100 Na<sup>+</sup>/cationes, cuyos porcentajes de Na y Ca fueron 25% y 33.75% cada uno (Cuadro 1), y coincide con Epstein (1972), quien menciona que el exceso de un catión puede reducir la absorción de otros cationes por las plantas, por lo que una baja relación de Ca/cationes es desfavorable para la absorción de Ca (Läuchli, 1990) y es favorable para la acumulación de iones tóxicos y para la salida de solutos al alterar la estabilidad y permeabilidad de la membrana plasmática. En condiciones salinas, Husain *et al.* (2004) y Vaghela *et al.* (2010) encontraron que altas concentraciones de Na en la solución del suelo redujeron la concentración de Ca en trigo (*Triticum aestivum* L.), y en el arbusto (*Salvadora persica* L.), respectivamente. En el presente trabajo el antagonismo Na-Ca se presentó en SN con baja salinidad ( $CE < 2.1 \text{ dS m}^{-1}$ ), no obstante dicha competencia comúnmente se ha reportado en situación salina ( $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$ ), donde la absorción de Na por las plantas se incrementa, mientras que Ca disminuye, debido a la interacción entre iones, precipitación y aumentos en la fuerza iónica, que reducen la actividad del Ca (Alam, 1999). En contraste, al aumentar la concentración de Ca en el medio se incrementa su absorción, mientras que la de Na disminuye (Lazof y Bernstein, 1999; Vaghela *et al.*, 2010).

#### Concentración de Nutrientes en Hojas y Tallos de Tomate “cv. ISIS”

Hubo efecto significativo ( $P \leq 0.05$ ) de la interacción Cl/aniones  $\times$  Na<sup>+</sup>/cationes en la SN para las concentraciones de Na y K en hojas (Figuras 1 y 2). Cuando la interacción fue significativa, no se discutieron los efectos principales de los factores, ya que el análisis de la interacción es de mayor utilidad que los efectos principales (Montgomery, 2002). En

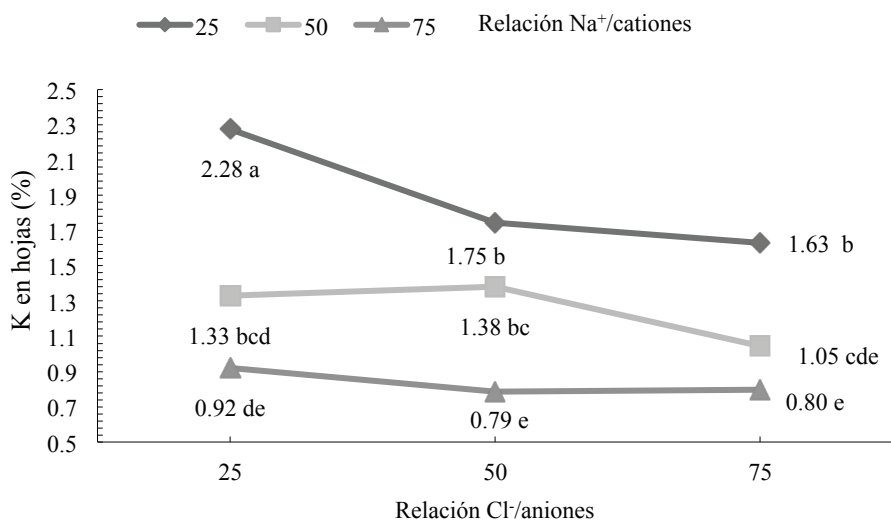


**Figura 1.** Efecto de la interacción Cl<sup>-</sup>/aniones × Na<sup>+</sup>/cationes en la solución nutritiva sobre la concentración de Na en hojas de tomate cv. ISIS. Puntos con letras iguales en cada columna y en cada línea no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

hojas las concentraciones de Na obtenidas con las tres relaciones Na<sup>+</sup>/cationes presentaron diferencias significativas entre las relaciones 25 y 50/100 Cl<sup>-</sup>/aniones y similar con 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones (Figura 1).

En las relaciones 25 y 50/100 Cl<sup>-</sup>/aniones las concentraciones mayores de Na (1.60 y 1.01%) en hoja se obtuvieron cuando se aplicó la relación 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes y las menores concentraciones (0.41 y 0.35 %Na) con 25/100 Na<sup>+</sup>/cationes. Los resultados de Shiyab *et al.* (2013) en tomate (*Lycopersicon esculentum* L.); Wang *et al.* (2015) en pasto (*Leymus chinensis* L.),

y Maqsood *et al.* (2015) en maíz (*Zea mays* L.) parcialmente explican este resultado debido a que ellos también encontraron mayor concentración de Na en los órganos vegetales con los aumentos de Na en la SN, pero no evaluaron la interacción con Cl<sup>-</sup>. En la relación 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones, aunque no hubo diferencias en las concentraciones de Na obtenidas con las tres relaciones Na<sup>+</sup>/cationes, se lograron los menores porcentajes de Na en las hojas, comparado con 25 y 50/100 Cl<sup>-</sup>/aniones. Munns *et al.* (2006) mencionan que glicofitas, como el trigo (*Triticum aestivum* L.) disminuyen el transporte



**Figura 2.** Efecto de la interacción Cl<sup>-</sup>/aniones × Na<sup>+</sup>/cationes en la solución nutritiva sobre la concentración de K en hojas de tomate cv. ISIS. Puntos con letras iguales en cada columna y en cada línea no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

de Na a las hojas, especialmente a los cloroplastos (Sudhir y Murthy, 2004) y acumulan el Na en raíces y tejidos vasculares, mientras que especies como la cebada (*Hordeum vulgare* L.) excluyen al Na de sus tejidos foliares, lo que permite mayor tolerancia al Na (Khan *et al.*, 2001), por lo tanto las reducciones en las concentraciones de Na obtenidas en el presente trabajo pueden ser una respuesta de las plantas para evitar daños por toxicidad. Las concentraciones de K obtenidas con las relaciones Na<sup>+</sup>/cationes presentaron diferencias significativas en las tres relaciones Cl<sup>-</sup>/aniones (Figura 2). En estas relaciones, los mayores valores de K (2.28, 1.75 y 1.63%) se obtuvieron con 25/100 Na<sup>+</sup>/cationes y los menores (0.92, 0.79 y 0.80%) con 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes. Las reducciones en los porcentajes de K en las hojas por la relación 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes en la SN se atribuyen principalmente al antagonismo Na-K debido a la alta proporción de Na (75%), respecto al catión K<sup>+</sup>, lo que genera mayor disponibilidad de Na y menor de K en la SN (Cuadro 1). Este resultado refleja un doble desbalance nutrimental en las hojas por alta absorción de Na y baja absorción de K, lo que coincide con los desbalances que se presentan en plantas que crecen en suelos salinos (Munns y Tester, 2008; Wang *et al.*, 2015). El antagonismo Na-K, se discutió anteriormente en hojas y tallos de tomate “cv. Polaris”. Hubo diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) del factor Cl<sup>-</sup>/aniones para las concentraciones de Ca y Mg en hojas (Cuadro 5) y Ca, Mg y Na en tallos (Cuadro 6). Las menores concentraciones de Ca y Mg en hojas y tallos fueron obtenidas con la relación 75/100

Cl<sup>-</sup>/aniones, mientras que las mayores se obtuvieron con 25/100 Cl<sup>-</sup>/aniones. Ocurrió una relación inversa entre la relación Cl<sup>-</sup>/aniones y las concentraciones de Ca y Mg en hojas y tallos, ya que al incrementar la relación Cl<sup>-</sup>/aniones en la SN las concentraciones de estos nutrimentos disminuyeron. Este resultado coincide con el obtenido en hojas del cultivar Polaris, por lo que en ambos cultivares la relación 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones redujo las concentraciones de Ca y Mg. La concentración de Na en tallos fue significativamente menor para la relación 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones respecto a 25/100 Cl<sup>-</sup>/aniones (Cuadro 6), posiblemente a desbalances nutrimentales en las plántulas, provocado por la mayor concentración de Cl en tallos (3.8%) en la relación 75/100 Cl<sup>-</sup>/aniones, comparado con 3% de Cl en la relación 25/100 Cl<sup>-</sup>/aniones.

Hubo diferencias ( $P \leq 0.05$ ) entre tratamientos ante el uso de la relación Na<sup>+</sup>/cationes para las concentraciones de Ca y Mg en hojas (Cuadro 5), y Ca, Mg, Na y K en tallos (Cuadro 6), donde las menores concentraciones de Ca y Mg en ambos órganos se obtuvieron con la relación 75/100 Na<sup>+</sup>/cationes, mientras que las mayores fueron obtenidas con 25/100 Na<sup>+</sup>/cationes. Este resultado indica una relación inversa entre la relación Na<sup>+</sup>/cationes y las concentraciones de Ca y Mg, ya que al incrementar la relación Na<sup>+</sup>/cationes las concentraciones de estos nutrimentos disminuyeron, lo que puede atribuirse al antagonismo Na-Ca (Wakeed *et al.*, 2009) y Na-Mg provocado por la mayor concentración de Na (Cuadro 1), respecto a los cationes Ca y Mg en la SN lo que favoreció la absorción de Na

**Cuadro 5. Concentración de Ca y Mg en hojas de plántulas de tomate cv. ISIS por efecto de las relaciones de Cl<sup>-</sup>/aniones y Na<sup>+</sup>/cationes en la solución nutritiva.**

Factor	Ca	Mg
	----- % -----	
Relación porcentual de Cl <sup>-</sup> /aniones		
25/100	3.11 a <sup>†</sup>	0.96 a
50/100	2.95 a	0.87 a
75/100	2.48 b	0.70 b
Relación porcentual de Na <sup>+</sup> /cationes		
25/100	3.30 a	0.99 a
50/100	2.63 b	0.79 b
75/100	2.61 b	0.75 b

<sup>†</sup> Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro 6. Concentración de Na, K, Ca y Mg en tallos de plántulas de tomate cv. ISIS por efecto de las relaciones de Cl<sup>-</sup>/aniones y Na<sup>+</sup>/cationes en la solución nutritiva.**

Factor	Na	K	Ca	Mg
	----- % -----			
Relación porcentual de Cl <sup>-</sup> /aniones				
25/100	0.98 a <sup>†</sup>	2.55 a	1.59 a	0.75 a
50/100	0.90 ab	2.35 a	1.55 a	0.63 ab
75/100	0.78 b	2.16 a	1.38 b	0.60 b
Relación porcentual de Na <sup>+</sup> /cationes				
25/100	0.36 b	2.89 a	1.43 b	0.57 b
50/100	1.08 a	2.71 a	1.74 a	0.79 a
75/100	1.21 a	1.43 b	1.36 b	0.62 b

<sup>†</sup> Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).



y limitó la de Ca y Mg. Hubo una relación directa entre la relación  $\text{Na}^+$ /cationes y la concentración de Na en tallos, en contraste, la relación fue inversa respecto al K, ya que las concentraciones de este nutriente en tallos disminuyeron con los aumentos de la relación  $\text{Na}^+$ /cationes (Cuadro 6) debido al antagonismo Na-K (Lu *et al.*, 2009).

## CONCLUSIONES

La respuesta de los cultivares de tomate “Polaris e ISIS” a las relaciones  $\text{Cl}^-$ /aniones y  $\text{Na}^+$ /cationes en la solución nutritiva fueron diferentes. Hubo una relación inversa entre los tratamientos de la relación  $\text{Cl}^-$ /aniones y las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas de tomate cultivar Polaris y las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en tallos de cultivar ISIS. Hubo una relación directa entre los tratamientos de la relación  $\text{Na}^+$ /cationes y las concentraciones de Na en hojas y tallos de cultivar Polaris; en contraste, para las concentraciones de K, Ca y Mg en hojas, K y Ca en tallos de Polaris y para Ca y Mg en hojas y tallos de cultivar ISIS, la relación fue inversa. Los resultados indican que soluciones nutritivas de baja salinidad ( $\text{CE} < 2.5 \text{ dS m}^{-1}$ ), con alta proporción de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  provocaron desbalances nutrimentales debido al antagonismos  $\text{Cl}^-$ - $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ - $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ - $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ - $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ - $\text{Mg}^{2+}$  que alteraron las concentraciones de los cationes  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  en hojas y tallos de plántulas de tomate.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Sinaloa por su apoyo financiero, a través del Programa de Fortalecimiento y Apoyo a Proyectos de Investigación (PROFAPI-2010).

## LITERATURA CITADA

- Alam, S. M. 1999. Nutrient uptake by plants under stress conditions. pp. 285-313. *In*: M. Pessarkli (ed.). Handbook of plant and crop stress. CRC Press. New York, NY, USA.
- Biggin, P. C., G. R. Smith, I. Shrivastava, S. Choe, and M. S. Sansom. 2001. Potassium and sodium ions in a potassium channel studied by molecular dynamics simulations. *Biochim. Biophys. Acta* 1510: 1-9.
- Epstein, E. 1972. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.
- Fageria, V. D. 2001. Nutrient interactions in crop plants. *J. Plant Nutr.* 24: 1269-1290.
- Genc, Y., M. Tester, and G. K. McDonald. 2010. Calcium requirement of wheat in saline and non-saline conditions. *Plant Soil* 327: 331-345.
- Ghafoor, A., M. Qadir, and G. Murtaza. 2004. Salt-affected soils: Principles of management. Allied Book Center. Lahore, Pakistan.
- Halperin, S. J. and J. P. Lynch. 2003. Effects of salinity on cytosolic  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  in root hairs of *Arabidopsis thaliana*: In vitro measurements using the fluorescent dyes SBFI and PBFI. *J. Exp. Bot.* 54: 2035-2043.
- Hanson, B. R., S. R. Grattan, and A. Fulton. 2006. Agricultural salinity and drainage (revised ed.). Division of Agriculture and Natural Resources Publication 3375. University of California. Davis, CA, USA.
- Husain, S., S. von Caemmerer, and R. Munns. 2004. Control of salt transport from roots to shoots of wheat in saline soil. *Funct. Plant Biol.* 31: 1115-1126.
- Hussain, R. A., R. Ahmad, E. A. Waraich, and F. Nawaz. 2015. Nutrient uptake, water relations, and yield performance of different wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *J. Plant Nutr.* 38: 2139-2149.
- Imran, M. R., M. A. Maqsood, Rahmatullah, and S. Kanwal. 2010. Increasing SAR of irrigation water aggravated boron toxicity in maize (*Zea mays* L.). *J. Plant Nutr.* 33: 1301-1306.
- Khan, M. A., B. Gul, and D. J. Weber. 2001. Effect of salinity on the growth and ion content of the *Salicornia rubra*. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 2965-2977.
- Komosa, A. and T. Gorniak. 2015. The effect of chloride on yield and nutrient interaction in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown in rockwool. *J. Plant Nutr.* 38: 355-370.
- Läuchli, A. 1990. Calcium, salinity, and the plasma membrane. pp. 26-35. *In*: R. T. Leonard and P. K. Hepler (eds.). Calcium in plant growth. Am. Soc. Plant Physiol. Rockville, Md, USA.
- Lazof, D. B. and N. Bernstein. 1999. The NaCl-induced inhibition of shoot growth: The case for disturbed nutrition with special consideration of Ca. *Adv. Bot. Res.* 29: 113-189.
- Lu, S., S. Shang, X. Xu, H. Korpelainen, and C. Li. 2009. Effect of increased alkalinity on  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  contents, lipid peroxidation and antioxidative enzymes in two populations of *Populus cathayana*. *Biol. Plant.* 53: 597-600.
- Maqsood, M. A., M. K. Khan, M. A. Naeem, S. Hussain, T. Azis, and J. Schoenau. 2015. High sodium in irrigation water caused B toxicity at low soil solution and shoot B concentration in maize (*Zea mays* L.). *J. Plant Nutr.* 38: 728-741.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Montgomery, D. C. 2002. Diseño y análisis de experimentos. Traducción al Español de Rodolfo Piña García. Editorial Limusa. México, D. F.
- Motsara, M. R. and R. N. Roy. 2008. Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 19. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Munns, R. and M. Tester. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Ann. Rev. Plant Biol.* 59: 651-681.
- Munns, R., R. A. James, and A. Läuchli. 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J. Exp. Bot.* 57: 1025-1043.
- Naeem, M. A., M. A. Maqsood, S. Hussain, M. K. Khan, and S. Kanwal. 2013. Irrigation with brackish water modifies the boron requirement of mungbean (*Vigna radiata* L.) on typical calcareous soil. *Arch. Agron. Soil Sci.* 59: 133-145.

- Naeini, M. R., A. H. Khoshgoftarmanesh, and E. Fallahi. 2006. Partitioning of chlorine, sodium, and potassium and shoot growth of three pomegranate cultivars under different levels of salinity. *J. Plant Nutr.* 29: 1835-1843.
- Parida, A. K. and A. B. Das. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 60: 324-349.
- Reynolds, B., D. Fowler, R. I. Smith, and J. R. Hall. 1997. Atmospheric inputs and catchment solute fluxes for major ions in five Welsh upland catchments. *J. Hydrol.* 194: 305-329.
- SAS Institute. 1999. Statistical Analysis System Institute. Versión 8, SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Schachtman, D. and W. Liu. 1999. Molecular pieces to the puzzle of the interaction between potassium and sodium uptake. *Trends Plant Sci.* 4: 281-287.
- Shiyab, S. M., M. A. Shatnawi., R. A. Shibli., N. G. Al Smeirat, J. Alayad, and M. W. Akash. 2013. Growth, nutrient acquisition, and physiological responses of hydroponic grown tomato to sodium chloride salt induced stress. *J. Plant Nutr.* 36: 665-676.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. Sixth Int. Congr. on Soilless Culture. pp. 633-649. *In: proceeding 6th International Congress on Soilless Culture.* Wageningen, The Netherlands.
- Sudhir, P. and S. D. S. Murthy. 2004. Effects of salt stress on basic process of photosynthesis. *Photosynthetica* 42: 481-486.
- Tale, A. S., N. A. K. K. Sima, and H. H. Mirzaei. 2013. Effects of sodium chloride on physiological aspects of *Salicornia persica* growth. *J. Plant Nutr.* 36: 401-414.
- Tavakkoli, E., F. Fatehi, S. Coventry, P. Rengasamy, and G. K. McDonald. 2011. Additive effects of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions on barley growth under salinity stress. *J. Exp. Bot.* 62: 2189-2203.
- Teakle, N. L. and S. D. Tyerman. 2010. Mechanisms of Cl(-) transport contributing to salt tolerance. *Plant Cell Environ.* 33: 566-589.
- Tester, M. and R. Davenport. 2003. Na<sup>+</sup> tolerance and Na<sup>+</sup> transport in higher plants. *Ann. Bot.* 91: 503-527.
- Vaghela, P. M., A. D. Patel, I. B. Pandey, and A. N. Pandey. 2010. Implications of calcium nutrition on the response of *Salvadora persica* (Salvadoraceae) to soil salinity. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41: 2644-2660.
- Wakeel, A., F. Abd-El-Motagally, D. Steffens, and S. Schubert. 2009. Sodium-induced calcium deficiency in sugar beet during substitution of potassium by sodium. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172: 254-260.
- Wang, L., C. Fang, and K. Wang. 2015. Physiological responses of *Leymus chinensis* to long-term salt, alkali and mixed salt-alkali stresses. *J. Plant Nutr.* 38: 526-540.
- Wenrong, C., Z. L. He, X. E. Yang, S. Mishra, and P. J. Stoffella. 2010. Chlorine nutrition of higher plants: Progress and perspectives. *J. Plant Nutr.* 33: 943-952.
- White, P. J. and M. R. Broadley. 2001. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: A review. *Ann. Bot.* 88: 967-988.
- Xu, G., H. Magen, J. Tarchitzky, and U. Kafkafi. 2000. Advances in chloride nutrition of plants. *Adv. Agron.* 68: 97-150.

# EFFECTO DEL OZONO SOBRE LA POBLACIÓN MICROBIANA DEL SUELO Y EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE FRESA

## Effect of Ozone on Soil Microbial Populations and Growth of Strawberry Plants

Carlos Manuel Bucio Villalobos<sup>1‡</sup>, Fidel René Díaz Serrano<sup>1</sup>,  
Oscar Alejandro Martínez Jaime<sup>1</sup> y Juan José Torres Morales<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Guanajuato-DICIVA. Km 9 Carretera Irapuato-Silao, Colonia El Copal. 36821 Irapuato, Guanajuato, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (buciovillalobos@yahoo.com.mx)

<sup>2</sup> Universidad de Guanajuato-DCSI, Prolongación Río Lerma s/n, Colonia Suiza. 38069 Celaya, Guanajuato, México.

---

### RESUMEN

Una de las formas de control de microorganismos fitopatógenos del suelo es el uso de fumigantes, los cuales, se ha demostrado, tienen efecto contaminante del ambiente. Con la finalidad de ofrecer una alternativa amigable con el entorno se propuso la presente investigación con el objetivo de evaluar la eficacia del ozono disuelto en el agua aplicada como riego, para reducir las poblaciones de microorganismos habitantes del suelo en una plantación de fresa, además de evaluar su posible efecto positivo indirecto sobre el crecimiento de las plantas. Con la ayuda de un generador se aplicó ozono disuelto en el agua a través del sistema de riego por goteo establecido en una parcela plantada con fresa de la variedad Camino Real. Se tomaron muestras de suelo en 10 sitios aleatorios de las parcelas experimentales un día antes de la aplicación y un día después, a estas se les cuantificó poblaciones de hongos, bacterias y nematodos. Los resultados de la aplicación del ozono disuelto en el agua de riego mostró una reducción de las poblaciones totales de hongos, bacterias y nematodos habitantes del suelo de  $22.8 \times 10^4$  a  $8.5 \times 10^4$ , de  $4.3 \times 10^6$  a  $1.2 \times 10^6$  unidades formadoras de colonias (UFC) por gramo de suelo y de 20.3 a 10.4 nematodos filiformes por 100 mL de suelo, respectivamente, lo que demostró una eficacia del ozono como fumigante sobre los tres tipos de microorganismos evaluados, similar a la del metam sodio (testigo). La aplicación única de ozono al inicio de la plantación no tuvo efecto sobre el crecimiento de las plantas de fresa.

**Palabras clave:** *fumigantes; fitopatógenos del suelo; metam sodio.*

### SUMMARY

Soil borne plant pathogens can be controlled using fumigants, which also are potential environmental pollutants. In order to provide an environment-friendly alternative, this research aimed to evaluate the effectiveness of ozone dissolved in water and applied through irrigation in reducing populations of soil-borne microorganisms and its possible indirect positive effect on plant growth. Ozone dissolved in water with a generator was applied through a drip irrigation system established in a plot planted with strawberry variety Camino Real. Soil was sampled at 10 sites in the experimental plots, before and after application. Samples were processed in a laboratory and populations of bacteria, fungi and nematodes were quantified. Applying ozone in irrigation water reduced populations of fungi, bacteria and nematodes from  $22.8 \times 10^4$  to  $8.5 \times 10^4$ , from  $4.3 \times 10^6$  to  $1.2 \times 10^6$  colony formation units (CFU) per gram of soil, and from 20.3 to 10.4 filiform nematodes per 100 mL of soil, respectively. The efficacy of ozone as a fumigant against the three types of microorganisms evaluated was similar to that of metam sodium (control). The single application of ozone at the beginning of planting had no effect on strawberry plants growth.

**Index words:** *fumigants; soil pathogens; metam sodium.*

### INTRODUCCIÓN

El cultivo de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch.) ha sido importante para México desde mediados del siglo XX, cuando se inició la demanda del producto en el

---

#### Como citar este artículo:

Bucio Villalobos, C. M., F. R. Díaz Serrano, O. A. Martínez Jaime y J. J. Torres Morales. 2016. Efecto del ozono sobre la población microbiana del suelo y el crecimiento de plantas de fresa. *Terra Latinoamericana* 34: 229-237.

---

Recibido: agosto de 2015. Aceptado: marzo de 2016.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 229-237.

mercado estadounidense. La superficie sembrada en nuestro país durante el año 2013 fue de 6721 hectáreas, con una producción de 329 463 toneladas, lo que representó más de 3740 millones de pesos, siendo Michoacán, Baja California y Guanajuato, los estados con mayor superficie plantada (SIAP, 2014). La importancia del cultivo de la fresa no se basa solamente en la superficie destinada a su cultivo, también es generador de divisas para el país debido a la exportación de la fruta, principalmente a los EE UU, además de que su cultivo requiere mucha mano de obra, dado que la mayoría de las actividades se realizan de manera manual, adicionando los jornales utilizados durante su procesamiento industrial.

Entre las problemáticas que enfrenta el cultivo de la fresa, se puede señalar la susceptibilidad de las variedades comerciales a las plagas y enfermedades. Para este último caso, la fresa puede ser afectada por un gran número de enfermedades; Maas (1984) describe 104 diferentes, de las cuales 24 corresponden a enfermedades fungosas que afectan las raíces y la corona de las plantas, destacándose entre estas últimas aquellas provocadas por los hongos habitantes del suelo, como: *Rhizoctonia* spp., *Fusarium* spp., *Phytophthora* spp. y *Verticillium albo atrum*, entre otros, los cuales provocan enfermedades tipo “secadera”. Para su control se han utilizado diversos métodos entre los que sobresalen el uso de fumigantes y fungicidas con los consecuentes riesgos de contaminación del medio ambiente. Otros fitopatógenos de la fresa habitantes del suelo son los nematodos *Meloidogyne* spp., *Pratylenchus* spp., *Xiphinema* spp., *Aphelenchoides fragariae*, *Ditylenchus dipsaci* y *Belonolaimus* spp., además de la bacteria vascular *Pseudomonas solanacearum* (Maas, 1984).

Los fumigantes agrícolas son productos de amplio espectro de acción usados contra diversos fitopatógenos del suelo. No son selectivos, por lo que es necesario que su aplicación se realice previa al establecimiento del cultivo. El metam sodio y el bromuro de metilo son fumigantes que han mostrado eficacia en el control de diversos patógenos del suelo. Este último fumigante, aunque muy eficiente, ha tenido que ser retirado del mercado debido a que daña la capa de ozono, razón por la cual se han realizado diversas investigaciones para encontrar productos alternativos. Stromberger *et al.* (2005) evaluaron fumigantes que pudieran sustituir al bromuro de metilo tales como la cloropicrina, el 1,3-dicloropropeno, el iodometano y el bromuro

de propargil, encontrando potencial de uso en ellos al tener un efecto de control sobre algunos hongos habitantes del suelo, pero con la desventaja de también ser potencialmente contaminantes del ambiente.

La alternativa que aquí se presenta es el uso de ozono, el cual es un producto inocuo para el suelo, el agua o los productos agrícolas. Tiene además un amplio espectro de acción, por lo que su aplicación puede servir para controlar diversas especies no solo de hongos fitopatógenos, sino también de bacterias y nematodos, además de que puede ser aplicado sobre el cultivo ya establecido, con la ventaja de ser usado en el momento que sea necesario, contrastando con los productos fumigantes de acción más fuerte que, aunque con demostrada acción contra organismos fitopatógenos, pueden tener un efecto tóxico sobre las plantas que posteriormente se establezcan, como lo demostraron Peeden *et al.* (2011), quienes encontraron que aunque las poblaciones de los hongos fitopatógenos *Pythium* y *Fusarium* se redujeron de 3255 y 10 058 a 1175 y 1096 UFC g<sup>-1</sup> de suelo seco, respectivamente, la residualidad del bromuro de metilo después de cuatro semanas de su aplicación, ocasionó que el follaje de las plantas de fresa se redujera de 29.8 a 10.4 g de peso seco planta<sup>-1</sup>.

Por ser un potente agente oxidante, el ozono ha sido utilizado como germicida en la industria alimenticia (Naitou y Takahara, 2008) y en el tratamiento de agua de uso urbano, para el control de un amplio rango de organismos patógenos, incluyendo bacterias, protozoos y virus (EPA, 1999; Galvis *et al.*, 2005). También se ha demostrado su efecto al aplicarlo en forma de gas sobre hongos que afectan productos vegetales en el almacén; Vijayanandraj *et al.* (2006), encontraron alteraciones en la germinación de esporas y la morfología colonial al aplicar ozono sobre *Aspergillus niger*, hongo causante de la pudrición negra de la cebolla. Tiedemann (1992), reportó un incremento de la susceptibilidad de plantas de trigo al hongo *Septoria nodorum*, al exponer su follaje a concentraciones de 80, 160 y 240 µg m<sup>-3</sup> de ozono; en contraste la resistencia de las mismas plantas, pero inoculadas con el hongo *Bipolaris sorokiniana*, se vio incrementada cuando las concentraciones de ozono fueron altas, lo que sugiere un efecto ambivalente del ozono al ser capaz tanto de predisponer a las plantas al ataque de fitopatógenos como a inducirles resistencia a esos mismos microorganismos (Zuccarini, 2009). Además del efecto del ozono sobre hongos fitopatógenos, este gas ha resultado también efectivo contra algunas bacterias, como lo demostraron Mohan

*et al.* (2005), al lograr una reducción de la viabilidad de *Xanthomonas oryzae*, por lo que sugirieron lavar la semilla de arroz con agua ozonizada y con ello evitar posteriores brotes de la enfermedad en el campo.

Adicional al efecto del ozono sobre diversos microorganismos, se ha demostrado que este gas puede alterar la morfología y fisiología de las plantas. En concentraciones moderadamente elevadas su efecto sobre las plantas puede ser negativo, como lo demostró Volk *et al.* (2006), al encontrar una disminución de la productividad de gramíneas establecidas en una pradera, lo cual es consecuencia de diversos cambios bioquímicos y moleculares que se dan en las plantas al interactuar con el ozono como contaminante ambiental (Kangasjärvi *et al.*, 2005; Dizengremel *et al.*, 2009; Wilkinson y Davies, 2009). Contrariamente, otras investigaciones reportaron efectos positivos sobre las plantas, Zuccarini (2009), encontró un efecto elicitor del ozono y la consecuente defensa de las plantas a diferentes tipos de estrés. Varios experimentos han demostrado la capacidad del ozono para estimular la producción y acumulación de fitoalexinas y otras sustancias en diferentes especies de plantas (Keen y Taylor, 1975), por lo que Zuccarini (2009) concluyó que el ozono es un importante elemento que puede ser utilizado en plantas para inducir resistencia a estrés biótico o abiótico, con la particular ventaja del bajo impacto ambiental. No se encontraron trabajos sobre el uso agrícola del ozono aplicado al suelo disuelto en el agua de riego para el control de microorganismos del suelo. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficacia del ozono disuelto en agua, aplicado en el sistema de riego por goteo, para reducir las poblaciones de bacterias, hongos y nematodos habitantes del suelo en una plantación de fresa, y en consecuencia verificar su posible efecto positivo sobre el crecimiento de las plantas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Fue utilizada una parcela con una superficie de 23 000 m<sup>2</sup> dentro de un rancho agrícola comercial ubicado en el kilómetro cinco de la carretera Abasolo-Pastor Ortíz, comunidad de Tamazula del municipio de Abasolo, Gto., con coordenadas 20° 24' 59.03" N y 101° 33' 59.54" O y una altitud de 1701 m. Para poder aplicar de manera práctica los fumigantes ajustándose a las condiciones del agricultor, la parcela fue dividida en dos subparcelas, recibiendo una de ellas el tratamiento

con metam sodio, fumigante de amplio uso entre los productores de fresa de la zona, utilizándose como testigo regional, y la otra subparcela fue tratada con ozono. El metam sodio se aplicó el tres de septiembre del 2010 de acuerdo a las recomendaciones técnicas propias del fabricante. En cada subparcela fueron seleccionados al azar 10 sitios de muestreo en donde se tomaron el mismo número de muestras de suelo y planta por fecha; dichos sitios de muestreo fueron permanentes a lo largo de todo el experimento con la finalidad de evitar la variación poblacional espacial de los microorganismos del suelo. Las primeras muestras fueron solo de suelo y se tomaron un día antes de las aplicaciones de metam sodio y ozono. Debido a que el ozono es de acción inmediata, al día siguiente de su aplicación se tomaron nuevas muestras de suelo, mientras que para el caso del metam sodio, que permanece varias semanas haciendo su efecto, las nuevas muestras se tomaron 25 días después de su aplicación. Posteriormente el muestreo fue mensual y consistió de muestras tanto de suelo, con un total de 12 fechas, de septiembre de 2010 a agosto de 2011, como de planta, con un total de ocho fechas, de diciembre de 2010 a agosto de 2011, ya que fue a partir de diciembre que se determinó que las plantas de fresa tenían suficiente tamaño. Tomando como unidad experimental a cada sitio de muestreo, en total se analizaron en el laboratorio 10 muestras de suelo y 10 de plantas por cada tratamiento, en cada una de las fechas señaladas. Dado que el muestreo fue destructivo, en cada ocasión se tomaron muestras de suelo y planta adyacentes al lugar de la toma de la muestra anterior. Las muestras de suelo se tomaron con la ayuda de una barrena a 30 cm de profundidad, mientras que las plantas fueron extraídas del mismo punto de muestreo donde se tomó el suelo. Ambos tipos de muestras se colocaron en bolsas de polietileno y fueron refrigeradas a 4 °C hasta su procesamiento.

La generación de ozono se hizo utilizando un ozonizador marca SOLZAID® modelo S2750 con una capacidad de generación de 3 g de ozono por hora y su aplicación fue a través del riego por goteo. Al aire capturado por este equipo se le extrajo la humedad al forzarlo a pasar por un tubo de metacrilato con desecante; posteriormente el aire se hizo circular por una celda donde se produjo la descarga eléctrica que provocó la excitación de las moléculas de oxígeno y su consecuente transformación en ozono. El ozono así producido fue inyectado durante cinco horas a una bolsa plástica con capacidad de 20 000 litros llena previamente con agua,

procurando iniciar el proceso alrededor de las 4:00 a.m. para lograr una temperatura lo más baja posible. La capacidad oxidante del ozono en el agua para riego fue estimada utilizando un medidor portátil marca HANNA tipo ORP (oxidation and reduction potential), cuidando llegar a una concentración de ozono que alcanzara un poder oxidante entre 400 y 500 mili voltios, momento en que estuvo en condiciones de ser enviada como agua de riego a la subparcela. Esta aplicación se realizó el 28 de septiembre de 2010 después de humedecer el suelo con un riego previo y de la aplicación del ozono en la subparcela correspondiente, en esta misma fecha se realizó la plantación de fresa de la variedad Camino Real (día corto) en ambas subparcelas, bajo un sistema “tres bolillo”, a doble hilera en surcos de 1.2 m de ancho obteniendo una densidad de 100 000 plantas ha<sup>-1</sup>.

Las poblaciones generales de bacterias, hongos y nematodos habitantes del suelo fueron cuantificadas en las muestras de suelo tomadas. Para la siembra y conteo de las bacterias y hongos se empleó la técnica de diluciones con siembra en placa (Madigan *et al.*, 1997), utilizando agar nutritivo para bacterias y papa dextrosa agar para hongos (DIFCO™). Cada muestra se sembró por triplicado, incubándose las cajas Petri a temperatura ambiente (24-26 °C) por 24 horas para las bacterias y cuatro días para los hongos, después de lo cual se contaron las unidades formadoras de colonias (UFC) presentes. Por otro lado, la cuantificación de nematodos se hizo siguiendo la técnica combinada de tamizado-centrifugado (Barker *et al.*, 1986), expresando el resultado final como número de nematodos por cada 100 mL de suelo.

El crecimiento de las plantas de fresa fue estimado utilizando las plantas recolectadas mensualmente en el campo. Para ello las plantas fueron cuidadosamente

sacadas del suelo con la ayuda de una pala para recuperarlas con todo y raíz y proceder de inmediato a su lavado a chorro de agua corriente hasta que el suelo adherido fue totalmente eliminado, para posteriormente evaluar la masa seca de la raíz y el follaje, después de introducir dichos tejidos a una estufa a 60 °C por 24 horas.

Para cada fecha de muestreo, los datos registrados de las variables dependientes fueron sometidos a la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov para verificar normalidad en cada muestra y a la prueba de Levene para constatar si había homogeneidad de varianzas entre las dos muestras; cuando estos supuestos se cumplieron, se aplicó la prueba T-Student, y cuando no se cumplieron, se utilizó la prueba U de Mann-Whitney (Statgraphics Plus Ver. 5.1 Professional, 2001), todo lo anterior bajo el criterio de comparación de dos muestras aleatorias independientes, donde los tratamientos fueron antes y después de la aplicación para las poblaciones de los microorganismos del suelo (bacterias, hongos y nematodos), y fueron ozono y metam sodio para el caso del crecimiento vegetal (follaje y raíces).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efecto de los Fumigantes sobre las Poblaciones Microbianas del Suelo

Se obtuvieron diferencias estadísticas significativas en las poblaciones de los tres microorganismos, al comparar antes y después de la aplicación de los fumigantes (Cuadro 1). El metam sodio produjo una reducción mayor en las poblaciones de hongos y nematodos, llegando a disminuir hasta 4.8 veces ambos microorganismos, mientras que para el caso

**Cuadro 1. Población microbiana del suelo en dos subparcelas, antes y después de aplicar los fumigantes metam sodio y ozono.**

Variable de respuesta	Tipo de fumigante	Prueba estadística	Valor de P	Medias	
				Antes	Después
Bacterias (UFC g <sup>-1</sup> de suelo seco)	Metam sodio	T = 2.83376	0.01100**	14.2 × 10 <sup>6</sup> a	10.4 × 10 <sup>6</sup> b
	Ozono	T = 6.23887	0.00005**	4.30 × 10 <sup>6</sup> a	1.2 × 10 <sup>6</sup> b
Hongos (UFC g <sup>-1</sup> de suelo seco)	Metam sodio	U = 0.00000	0.00010**	27.5 × 10 <sup>4</sup> a†	5.7 × 10 <sup>4</sup> b†
	Ozono	T = 6.26960	0.00004**	22.8 × 10 <sup>4</sup> a	8.5 × 10 <sup>4</sup> b
Nematodos (Nº/100 mL de suelo seco)	Metam sodio	T = 5.6571	0.00000**	36.3 a	7.5 b
	Ozono	T = 3.60033	0.00205**	20.3 a	10.4 b

T = T-Student; U = Mann-Whitney. † Medianas. Medias/Medianas con distinta letra en sentido horizontal indican diferencias significativas.

de las bacterias la reducción fue de solo 1.3 veces. Se confirma con esto la eficacia del metam sodio como fumigante del suelo tal y como se ha demostrado en el pasado al aplicarlo para el control de bacterias (Kritzman y Ben-Yephet, 1989), hongos (Stephens *et al.*, 1999) y nematodos (Boutsis *et al.*, 2011), trayendo como consecuencia de su uso, incrementos en el rendimiento de fresa hasta de un 18 % (Camprubí *et al.*, 2007). En cambio, en el ozono, el mayor efecto se observó en las bacterias, con una disminución de 3.5 veces su población; en los hongos y nematodos, las reducciones fueron de 2.6 y 1.9 veces, respectivamente.

En la dinámica poblacional de bacterias, hongos y nematodos habitantes del suelo, durante el periodo de septiembre de 2010 a agosto de 2011, ocurrió una disminución inicial importante de las poblaciones de los tres microorganismos (Figuras 1, 2 y 3), mostrando posteriormente una tendencia de estabilidad que se extendió hasta el mes de noviembre para las bacterias y los nematodos, y hasta enero para el caso de los hongos.

Algunos trabajos han reportado el efecto del ozono aplicado en forma de gas sobre organismos fitopatógenos, tal es el caso de Igura *et al.* (2003), quienes utilizando agua ozonizada para disminuir las conidias de *Fusarium oxysporum* en condiciones sin suelo, encontraron una disminución de cuatro veces la población inicial de conidias en escala logarítmica cuando emplearon 1 ppm de ozono disuelto en agua a temperaturas de 15, 20 y 30 °C. Asimismo, Nicoué *et al.* (2004), obtuvieron un efecto positivo y significativo del ozono aplicado como gas sobre la disminución de los hongos *Rhizopus stolonifer* y *Botrytis cinerea*, los cuales ocasionan la pudrición de la fruta de fresa; otros estudios *in vitro* muestran que a concentraciones de ozono de 0.05 y 0.01 ppm después de 36 horas, el conteo de *R. stolonifer* y *B. cinerea* disminuyeron en 99 y 98%, respectivamente. Por su parte, Mohan *et al.* (2005), lograron una reducción en la viabilidad de *Xanthomonas oryzae* con agua ozonizada, por lo que sugirieron lavar la semilla de arroz con agua ozonizada y con ello evitar posteriores brotes de la enfermedad en el campo. Se ha señalado el efecto benéfico del ozono aplicado en forma de gas (1ppm) sobre la disminución en la esporulación y el crecimiento del micelio de hongos que afectan productos vegetales en el almacén (Vijayanandraj *et al.*, 2006). Otros trabajos como el de Santos *et al.* (2016), señalaron la reducción en escala logarítmica de 3.8 veces el conteo de levaduras y la completa inhibición de hongos del género *Aspergillus*

y *Penicillium* en granos de arroz tratados con ozono a una concentración de 5 mg L<sup>-1</sup> y un flujo de 13.97 min. Por otro lado, también se han reportado efectos negativos sobre el follaje de plantas de trigo (Tiedemann, 1992), con tratamientos prolongados y altas concentraciones, causando lesiones en las hojas y permitiendo un rápido crecimiento después de la inoculación con *Septoria nodorum* y *Bipolaris sorokiniana*.

En la presente investigación el ozono se disolvió y concentró en el agua, lo que proporcionó la ventaja de ser aplicado en el suelo en donde nuevamente se liberó como gas, interactuando con las poblaciones de microorganismos y contribuyendo a la disminución, tanto de hongos como de bacterias, tal como se ha reportado para este tipo de organismos en la literatura, pero afectó además a los nematodos, para lo cual no se encontraron reportes del uso del ozono para su control. En general, no se encontró información en la literatura sobre un trabajo similar en donde se haya utilizado ozono disuelto en agua de riego para el tratamiento del suelo, con el objetivo de disminuir las poblaciones de microorganismos en el mismo y posteriormente ver el efecto indirecto en el crecimiento vegetal. La fácil volatilidad del ozono, una vez liberado del agua, ayuda a su distribución en el suelo favoreciendo su acción biocida; otros compuestos han demostrado su efectividad deletérea contra microorganismos gracias a su volatilidad; así Chambers *et al.* (2013), demostraron una reducción del crecimiento de *Botrytis cinerea*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Colletotrichum acutatum*, *Phomopsis obscurans* y *Gnomonia fragariae* al aplicar compuestos volátiles aplicados en frutos de fresa.

Después de las rápidas disminuciones iniciales de las poblaciones de bacterias, hongos y nematodos mencionadas anteriormente, las dinámicas poblacionales de los tres microorganismos se mantuvieron bajas y relativamente estables, no aumentando significativamente a lo largo de los meses en los que se realizó la evaluación, terminando en agosto de 2011 con aproximadamente el mismo comportamiento inicial después de la aplicación de los fumigantes (Figuras 1, 2 y 3). Además, se pudo observar que para este mismo periodo, los valores de las poblaciones de los tres microorganismos encontradas en la parcela con ozono fueron similares a los valores registrados en el testigo regional donde se aplicó el metam sodio. Cabe mencionar que después de la aplicación inicial de ambos fumigantes en septiembre

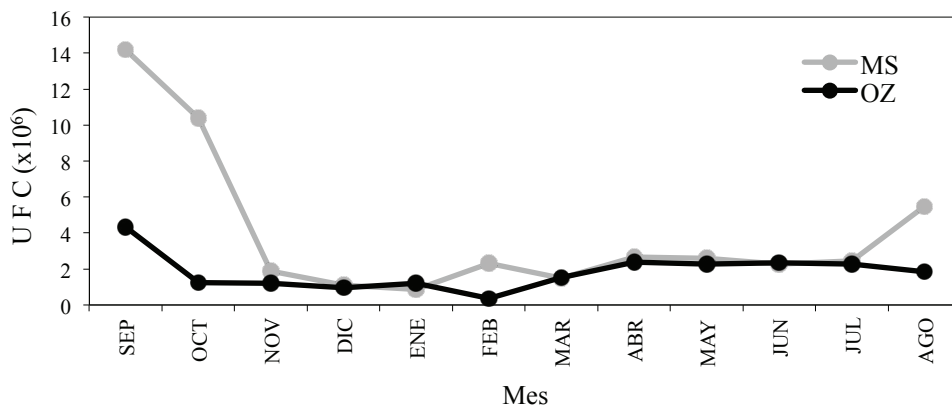


Figura 1. Medias del número de bacterias (UFC) por fecha de muestreo en los tratamientos con metam sodio (MS) y ozono (OZ).

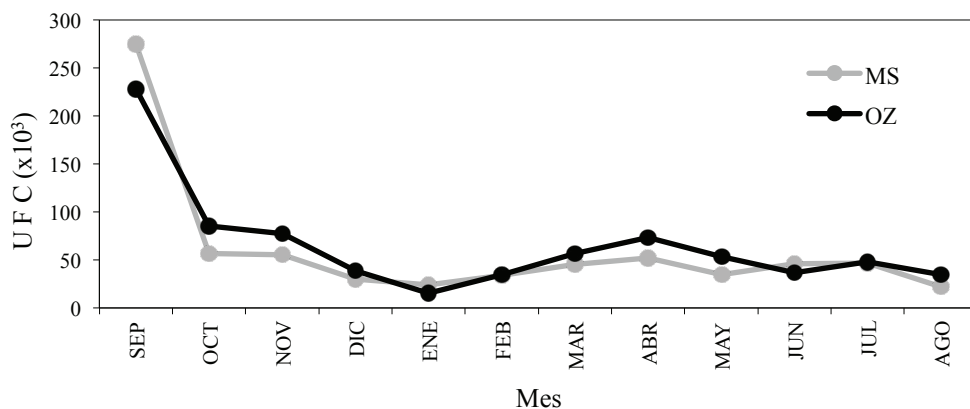


Figura 2. Medias del número de hongos (UFC) por fecha de muestreo en los tratamientos con metam sodio (MS) y ozono (OZ).

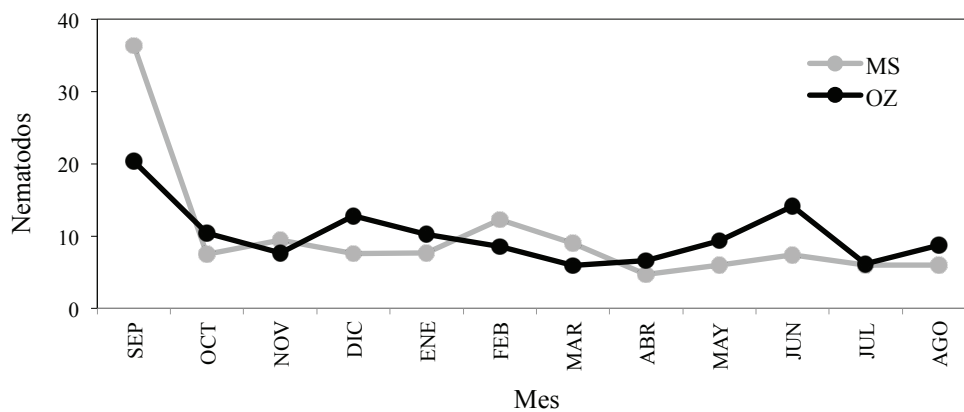


Figura 3. Medias del número de nematodos por fecha de muestreo en los tratamientos con metam sodio (MS) y ozono (OZ).



de 2010, estos no se volvieron a aplicar, razón que explica en parte la posterior tendencia a la estabilidad de las poblaciones microbianas. El efecto deletéreo del metam sodio no perdura con el paso del tiempo, ya que este tipo de productos son biodegradados por microorganismos del suelo (Warton *et al.*, 2001) o se pierden por lixiviación o volatilidad en el ambiente, en particular el ozono utilizado como compuesto fumigante disuelto en el agua de riego permanece tan solo por 30 minutos, aproximadamente.

**Efecto sobre el Crecimiento Vegetal**

El crecimiento de las plantas de fresa fue evaluado cuantificando la masa seca del follaje o parte aérea y las raíces (Figuras 4 y 5). Se compararon mensualmente las medianas de los pesos de follaje y raíces para los tratamientos de ozono y metam sodio, mediante

la aplicación de la prueba U de Mann-Whitney. De diciembre de 2010 a agosto de 2011, en ningún caso se encontraron diferencias estadísticas significativas entre medianas, solo en el mes de junio se obtuvieron las mayores diferencias numéricas (Figuras 4 y 5), se observó que para el peso del follaje, el tratamiento de metam sodio registró una mediana de 29.8 g en contraste con 15.85 g del tratamiento de ozono ( $U = 19.0, P = 0.0685$ ), similarmente para el peso de raíces, el metam sodio obtuvo una mediana de 8.35 g comparada con 4.30 g obtenidos con el ozono ( $U = 19.0$  y  $P = 0.0675$ ). El follaje de las plantas aumentó con el paso de los meses, sobre todo a partir del mes de abril, debido al ascenso en la temperatura del ambiente. Una tendencia similar ocurrió en el crecimiento de las raíces, por estar ambos tejidos relacionados, es decir, que para lograr un crecimiento en el follaje, se requiere que también las raíces lo hagan. Este comportamiento siguió un

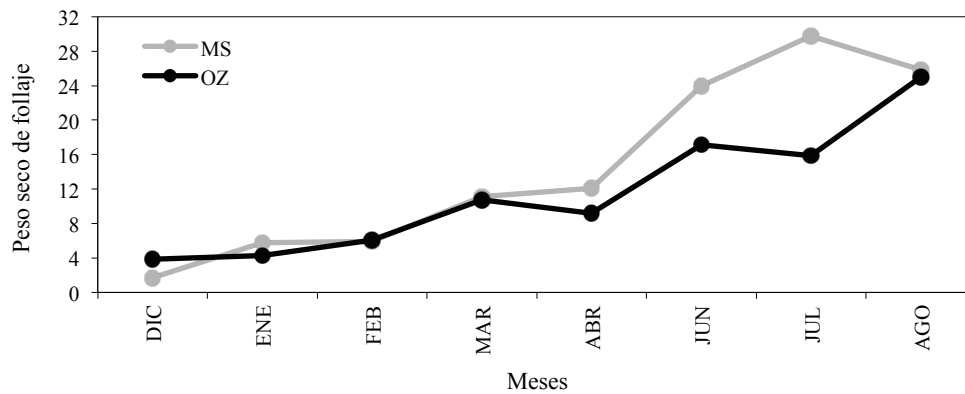


Figura 4. Medianas del peso seco de follaje por fecha de muestreo en los tratamientos con metam sodio (MS) y ozono (OZ).

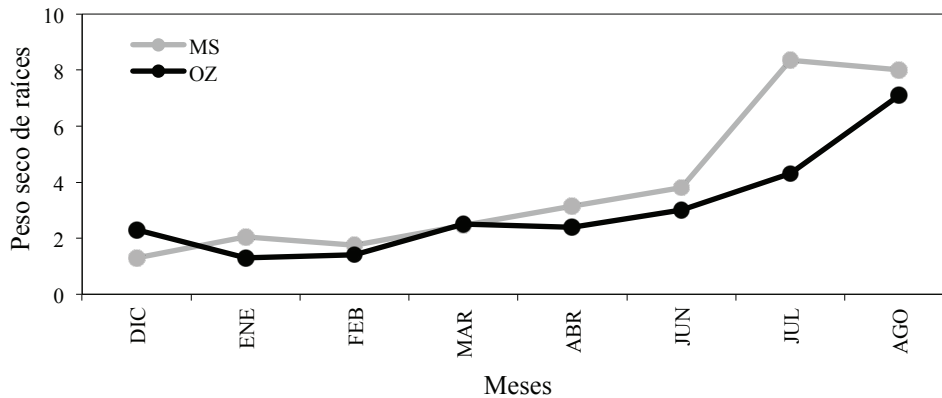


Figura 5. Medianas del peso seco de raíces por fecha de muestreo en los tratamientos con metam sodio (MS) y ozono (OZ).

patrón sigmoide, parecido a lo que se ha demostrado en otros estudios con el crecimiento de hojas, coronas, raíces, flores y frutos a lo largo del ciclo vegetativo de la fresa (Menzel y Smith, 2014). El mayor crecimiento del follaje logrado en la variedad Camino Real fue de 29.8 g de peso seco por planta para el testigo regional y de 25.0 g para el tratamiento con ozono, obtenidos en los meses de junio y julio, respectivamente; lo cual resultó ligeramente menor a lo obtenido por Strassburger *et al.* (2011) quienes en la misma variedad reportaron 32.1 g de peso seco.

La única aplicación de ozono en la subparcela correspondiente disminuyó inicialmente y de manera significativa las poblaciones de bacterias, hongos y nematodos habitantes del suelo, sin embargo, de acuerdo con la información presentada esto no influyó sobre el crecimiento de las raíces y el follaje de las plantas de fresa; de hecho, a partir del mes de marzo ambos crecimientos se mantuvieron por debajo del mostrado en las plantas desarrolladas en la parcela tratada con metan sodio (testigo regional). El efecto estimulante del ozono sobre las plantas de fresa podría haberse presentado solo en el caso de haber realizado un mayor número de aplicaciones del mismo distribuidas a lo largo del tiempo, tomando en consideración que la descomposición del ozono da como resultado oxígeno, que puede ser utilizado por las raíces de las plantas para su respiración y por ende en la absorción de nutrimentos, pero es necesario tener cuidado de no llegar a niveles de concentración de ozono que resulten tóxicos a las plantas, como en el estudio realizado por Keutgen *et al.* (2005), quienes encontraron una disminución del área foliar de las plantas de fresa al exponerlas por dos meses a un ambiente de 78 ppb de ozono, los mismos autores, en un trabajo posterior, modificaron la concentración de ozono a 156  $\mu\text{g m}^{-3}$  no encontrando efecto negativo en el rendimiento del fruto, reportando además que hay variedades de fresa más susceptibles que otras (Keutgen y Pawelzik, 2008). Finalmente, el uso del ozono dirigido al suelo mediante su aplicación con el agua de riego, sigue dos propósitos, el primero busca reducir las poblaciones microbianas fitopatógenas habitantes del suelo, y a consecuencia de esto, el segundo pretende conseguir un estímulo en el crecimiento de las plantas, por lo que se sugiere continuar estudiando el fenómeno, hasta lograr una dosis óptima y un número adecuado de aplicaciones que permitan conseguir resultados satisfactorios.

## CONCLUSIONES

- Se mostró un efecto deletéreo sobre hongos, bacterias y nematodos, con la aplicación única de ozono en el agua de riego al inicio del cultivo de fresa, disminuyendo significativamente las poblaciones iniciales de estos organismos en el suelo, y a consecuencia de esta disminución, no se presentó un estímulo positivo sobre el crecimiento del follaje y las raíces de las plantas de fresa de la variedad Camino Real, por lo que se sugiere realizar futuras investigaciones bajo un programa de aplicaciones continuas.
- El metam sodio demostró ser un fumigante efectivo contra los tres tipos de microorganismos evaluados, habiendo reducido las poblaciones de nematodos y hongos en una mayor proporción que el ozono.

## LITERATURA CITADA

- Barker, K. R., J. L. Townshend, G. W. Bird, I. J. Thomason, and D. W. Dickson. 1986. Determining nematode population responses to control agents. pp. 283-296. *In*: K. D. Hickey (ed.). Methods for evaluating pesticides for control of plant pathogens. APS Press. St. Paul, MN, USA.
- Boutsis, G., G. P. Stamou, and M. D. Argyropoulou. 2011. Short term effects of soil disinfection with metham sodium and organic alternatives on nematode communities. *Commun. Ecol.* 12: 161-170.
- Camprubí, A., V. Estaún, M. A. El Bakali, F. Garcia-Figueres, C. Calvet. 2007. Alternative strawberry production using solarization, metham sodium and beneficial soil microbes as plant protection methods. *Agron. Sust. Dev.* 27: 179-184.
- Chambers, A. H., S. A. Evans, and K. M. Folta. 2013. Methyl anthranilate and gamma-decalactone inhibit strawberry pathogen growth and achene germination. *J. Agric. Food Chem.* 61: 12625-12633.
- Dizengremel, P., D. Le Thiec, M. P. Hasenfratz-Sauder, M. N. Vaultier, M. Bagard, and Y. Jolivet. 2009. Metabolic-dependent changes in plant cell redox power after ozone exposure. *Plant Biol.* 11: 35-42.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1999. Alternative disinfectants and oxidants guidance manual. Office of Water, Environmental Protection Agency. Washington, DC, USA.
- Galvis C., A., G. Aponte M., D. F. Echeverry I., M. I. González M., y D. A. Cardona Z. 2005. Evaluación del funcionamiento de un generador de ozono a escala piloto en la desinfección de agua para consumo humano. *Ing. Compet.* 7: 65-72.
- Igura, N., M. Fujii., M. Shimoda, and I. Hayakawa. 2004. Inactivation efficiency of ozonated water for *Fusarium oxysporum* conidia under hydroponic greenhouse conditions. *J. Int. Ozone Assoc.* 26: 517-521.
- Kangasjärvi, J., P. Jaspers, and H. Kollist. 2005. Signaling and cell death in ozone-exposed plants. *Plant Cell Environ.* 28: 1021-1036.

- Keen, N. T. and O. C. Taylor. 1975. Ozone injury in soybeans, isoflavonoid accumulation is related to necrosis. *Plant Physiol.* 55: 731-733.
- Keutgen, A. J., G. Noga, and E. Pawelzik. 2005. Cultivar-specific impairment of strawberry growth, photosynthesis, carbohydrate and nitrogen accumulation by ozone. *Environ. Exp. Bot.* 53: 271-280.
- Keutgen, A. J. and E. Pawelzik. 2008. Influence of pre-harvest ozone exposure on quality of strawberry fruit under simulated retail conditions. *Postharv. Biol. Technol.* 49: 10-18.
- Kritzman, G. and Y. Ben-Yephet. 1989. Effect of metham sodium on several bacterial diseases. *Acta Hort.* 255: 49-54.
- Madigan, M. T., J. M. Martinko, and J. Parker. 1997. *Brock biology of microorganisms*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Mass, J. L. (ed). 1984. *Compendium of strawberry diseases*. American Phytopathological Society (APS). Madison, WI, USA.
- Menzel, C. M. and L. Smith. 2014. The growth and productivity of Festival strawberry plants growing in a subtropical environment. *New Zealand J. Crop and Hort. Sci.* 42: 60-75.
- Mohan, N., K. Patel, K. Padmanabhan, and S. Ananthi. 2005. Ozone for plant pathological applications. *Ozone: Sci. Engin.* 27: 499-502.
- Naitou, S. and H. Takahara. 2008. Recent developments in food and agricultural uses of ozone as an antimicrobial agent-food packaging film sterilizing machine using ozone. *Ozone: Sci. Engin.* 30: 81-87.
- Nicoué, E. E., J. P. Emond, J. C. Vuilleumard, and M. C. do Nascimento Nunes. 2004. Destruction de *Rhizopus stolonifer* et *Botrytis cinerea* par des traitements ozone/ions. *Phytoprotection* 85: 81-87.
- Peeden, K., B. Liu, and F. Louws. 2011. Microbial ecology of soils and strawberry roots in non-treated soils that appear to enhance plant growth compared to fumigated soils. *Phytopathology* 101: S139.
- Santos, R. R., L. R. D. Faroni, P. R. Cecon, A. P. S. Ferreira, and O. L. Pereira. Ozônio como agente fungicida em grãos de arroz. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 20: 230-235.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2014. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México. <http://www.siap.gob.mx> (Consulta: octubre 23, 2014).
- Statgraphics Plus. Ver. 5.1 Professional. 2001. STSC and Statistical Graphics Corporation. Bakersville, MD, USA.
- Stephens, P. M., C. W. Davoren, and T. Wicks. 1999. Effect of methyl bromide, metham sodium and the biofumigants Indian mustard and canola on the incidence of soilborne fungal pathogens and growth of grapevine nursery stock. *Aust. Plant Pathol.* 28: 187-196.
- Strassburger, A. S., R. M. N. Peil, J. E. Schwengber, D. de Souza M., and C. A. Barbosa M. 2011. Strawberry growth: Effect of cultivar and plant position in the bed. *Cienc. Rural* 41: 223-226.
- Stromberger, M. E., S. Klose, H. Ajwa, T. Trout, and S. Fennimore. 2005. Microbial populations and enzyme activities in soils fumigated with methyl bromide alternatives. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1987-1999.
- Tiedemann, A. V. 1992. Ozone effects on fungal leaf diseases of wheat in relation to epidemiology. *J. Phytopathol.* 134: 177-186.
- Vijayanandraj, V. R., P. D. Nagendra Prasad, N. Mohan, and M. Gunasekaran. 2006. Effect of ozone on *Aspergillus niger* causing black rot disease in onion. *Ozone: Sci. Engin.* 28: 347-350.
- Volk, M., P. Bungener, F. Contat, M. Montani, and J. Fuhrer. 2006. Grassland yield declined by a quarter in 5 years of free-air ozone fumigation. *Global Change Biol.* 12: 74-83.
- Warton, B., J. N. Matthiessen, and M. M. Roper. 2001. The soil organisms responsible for the enhanced biodegradation of metham sodium. *Biol. Fertil. Soils* 34: 264-269.
- Wilkinson, S. and W. J. Davies. 2009. Ozone suppresses soil drying -and abscisic acid (ABA)- induced stomatal closure via an ethylene dependent mechanism. *Plant Cell Environ.* 32: 949-959.
- Zuccarini, P. 2009. Tropospheric ozone as a fungal elicitor. *J. Biosci.* 34: 125-138.

# NEUTRALIZAR LA DEGRADACIÓN DE LAS TIERRAS, UNA ASPIRACIÓN GLOBAL. ¿ES POSIBLE LOGRARLO EN MÉXICO?

## Land Degradation Neutrality, a Global Aspiration. Is it Possible to Achieve in Mexico?

Armando López Santos<sup>1‡</sup>

<sup>1</sup> Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Km 40 Carretera Gómez Palacio-Chihuahua. 35230 Cd. Bermejillo, Durango, México.

Integrante del Intergovernmental Working Group de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (IWG-UNCCD).

<sup>‡</sup> Autor responsable (alopez@chapingo.uruza.edu.mx)

---

### RESUMEN

Neutralizar la degradación de las tierras (LDN, por sus siglas en inglés) o equilibrar su deterioro, es un reto planteado por el Comité de Ciencia y Tecnología (CCT) de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés), de la que México forma parte, es un concepto moderno que va más allá del recurso edáfico, que expresa un objetivo aspiracional global y una meta voluntaria nacional para contrarrestar el avance de la degradación de tierras al 2030. De ponerse en marcha, implicaría detener o revertir la tendencia de disminución de calidad físico-biótica (agua-suelo-planta-atmósfera) que sostiene el funcionamiento de los ecosistemas, de manera que esto permita conseguir un estado de equilibrio suficiente para mantener un nivel de salud ecosistémica y una garantía en la seguridad alimentaria para las generaciones futuras. El objetivo del presente ensayo fue analizar qué posibilidades tiene México para poner en marcha los principios y acciones necesarias para prevenir, detener y revertir el ritmo de degradación de sus tierras. Un breve análisis de las circunstancias, tanto a nivel global como en el contexto nacional, donde se vislumbran dificultades para conciliar la política ambiental con las metas de crecimiento económico o asumir las consecuencias por la sobre-explotación evidente de los recursos territoriales, de lo contrario LDN solo llegará a ser un reto frustrado ante la tendencia de la degradación de las tierras y comprometiendo con ello cada vez más la calidad de vida de las futuras generaciones.

**Palabras clave:** *calidad de la tierra; espacios biofísicos; salud ambiental.*

### SUMMARY

Land degradation neutrality (LDN), or balance impairment, is a challenge posed by the Committee on Science and Technology (CST) of the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), of which Mexico is a member. It is a modern concept that goes beyond the edaphic resource, expressing a global goal and a national voluntary target to counteract the advance of land degradation by 2030. This means stopping or reversing the trend of decreasing physical-biotic quality (water-soil-plant-atmosphere) and supporting ecosystems functioning to achieve a state of sufficient balance to maintain a level of ecosystem health and guarantee food security for future generations. The aim of this essay was to analyze Mexico's possibilities for implementing the principles and actions necessary to prevent, halt and reverse the rate of degradation of its lands. A brief analysis of the circumstances, both globally and in the context of Mexico, where environmental policy goals and economic growth must be reconciled. Otherwise, the consequences of over-exploiting resources must be faced and LDN will become only a frustrated challenge to the trend of land degradation and the quality of life of future generations will be increasingly compromised.

**Index words:** *land quality; physical-biotic space; environmental health.*

### INTRODUCCIÓN

El concepto formal de tierra, establece que es la superficie del planeta terrestre, que abarca la tierra y los recursos de la misma refiriéndose al área de

---

#### Como citar este ensayo:

López Santos, A. 2016. Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México? *Terra Latinoamericana* 34: 239-249.

---

Recibido: agosto de 2015. Aceptado: febrero de 2016.

Publicado como ensayo en  
*Terra Latinoamericana* 34: 239-249.

la superficie del globo terrestre, abarcando todos los atributos de la biosfera inmediatamente por arriba y por debajo de esa superficie, incluyendo aquellos atributos climáticos cercanos a la superficie, el suelo y las formas del terreno, el componente hidrológico, –incluyendo lagos poco profundos, ríos, humedales y pantanos– las capas sedimentarias cercanas a la superficie, agua subterránea asociada, reservas geohidrológicas, poblaciones de animales y vegetales, modelos de asentamientos humanos y los resultados físicos de la actividad humana pasada y presente (FAO-UNEP, 1997).

En la actualidad el 23% de la superficie del planeta presenta algún grado de degradación con tasas estimadas entre 5-10 millones de hectáreas, afectando alrededor de 1,500 millones de personas a nivel mundial (Stavi y Lal, 2014). El origen de ésta problemática es multifactorial (actividades humanas, variaciones climáticas, cambios/evolución de la naturaleza) y al mismo tiempo multifacético (ambiental, productiva, social, etc.), donde se combinan con distinto orden y magnitud: las políticas públicas (gobernanza), la cultura de uso, manejo y protección de los recursos naturales, el medioambiente, las características biofísicas del territorio y la variabilidad climática (Grainger, 2015; Gnacadja, 2015; UNCCD, 2015).

Entre los años 70's y 90's del Siglo XX se identificaron y reconocieron por su magnitud a nivel global cuatro tipos de degradación de las tierras en su componente edáfico: 1) erosión hídrica ( $10.9 \times 10^8$  ha); 2) erosión eólica ( $5.5 \times 10^8$  ha); 3) degradación física ( $2.4 \times 10^8$  ha); y 4) degradación química ( $0.8 \times 10^8$  ha); magnitudes que varían de un país a otro (Gnacadja, 2012). Por ejemplo, en el caso de México, una estimación promedio basada en distintos reportes (Garrido y Cotler, 2010; SEMARNAT, 2011; CONAFOR-UACH, 2013) indica que el 69.7% ( $135.4 \times 10^6$  ha) de sus tierras ( $194.98 \times 10^6$  ha) presentan algún grado de degradación para el componente edáfico, donde la erosión hídrica aparece como la más importante con un 25.4% ( $49.4 \times 10^6$  ha), seguida por la degradación química y la erosión eólica con el 20.1% ( $39 \times 10^6$  ha) cada una, y por último la degradación física con el 4.1% ( $7.9 \times 10^6$  ha); problemática exacerbada en años recientes ante una mayor variabilidad climática (SEMARNAT-INECC, 2012).

México como parte de la UNCCD –desde su creación en 1994 con 194 países miembros–

ha contribuido como Región Latinoamericana y Caribeña en la construcción de acuerdos encaminados a fortalecer la filosofía de la sustentabilidad y la promoción de medidas de mitigación de los efectos de degradación de tierras en sus diferentes formas (FAO-UNEP-CONAZA, 1994; Carabias, 2005; UNCCD, 2011). Los antecedentes marcan esfuerzos en ésta materia desde la década de los años 40's con la Ley de Conservación de Suelos y Agua, y hasta los años 80' y 90's que se presentaron formas más organizadas de la administración pública con la promulgación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en 1988, así como mediante la creación de dos entidades administrativas como son la Comisión Nacional del Agua (CNA) en 1989 y la Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en 1994 (SEMARNAT, 2013).

LDN debe ser reconocido como el resultado de un gran debate basado en información sobre la magnitud actual y tendencias probables sobre el deterioro de los recursos naturales, lo cual compromete la calidad de vida de las generaciones futuras (UNCCD, 2012; UNCCD, 2014a; FAO-ITPS, 2015; Gnacadja, 2015; Grainger, 2015); por ello, el objetivo del presente ensayo fue analizar las posibilidades que tiene México para poner en marcha los principios y acciones necesarias para prevenir, detener y revertir el ritmo de degradación de sus tierras.

## IMPORTANCIA DE LA DEGRADACIÓN DE LA TIERRA Y RETOS

Los términos suelo y tierra empleados en el presente documento, por un tiempo fueron debatidos debido a su gran relación –suelo/tierra o suelo/paisaje– después de gran diversidad de aportaciones, la FAO-UNEP (1997) diferencia ambos términos de manera que la tierra se concibe como una entidad mayor donde están contenidos tres componentes primordiales: recursos edafológicos o los suelos, los recursos hidrológicos y los recursos bióticos, en el que por supuesto también aparece la sociedad.

### Degradación de la Tierra y Cambio Climático Global

La degradación de las tierras bajo el enfoque de la UNCCD (2013a, b) se define como: “*pérdida o reducción en zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas,*

de la productividad biológica y económica, de la agricultura de temporal y de riego, agostaderos, tierras forestales y bosques, resultado de los usos de la tierra o una combinación de procesos, incluyendo aquellos derivados de actividades humanas y patrones de poblamiento que habitualmente producen: 1) Erosión del suelo por agua o viento; 2) Deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; y 3) Pérdida de la vegetación a largo plazo.”

La UNCCD (2013a), menciona además que la degradación es la resultante de dos factores fundamentales: variaciones climáticas (VC) de larga y corta duración y actividades humanas (AH); las VC de corta duración se distinguen por sequías y ondas de calor, afectando de diversas formas la estabilidad y resiliencia de los sistemas socio-ecológicos (SSE); en tanto que las AH caracterizadas por los cambios en el uso del suelo mediante prácticas de deforestación para dar paso a la agricultura, ganadería y la urbanización. Parte de esta problemática se ha concentrado en los SSE de las tierras secas, las cuales ocupan aproximadamente el 45% de la superficie del planeta donde habitan alrededor de 2 mil millones de personas, representando el 33.8% de la población mundial (Al-Kaisi *et al.*, 2012; Cruse, 2012; UNCCD, 2013b).

En el reporte más reciente de Nkonya *et al.* (2011) sobre la valoración de la degradación global de las tierras (GLADA, por sus siglas en inglés), este problema se estima en alrededor de 1964 millones de hectáreas, superficie en la que contribuyen en mayor medida (83.6%) los dos tipos de erosión mencionadas: hídrica y eólica, con el 55.7 y 27.9%, respectivamente;

enseguida con el 15.9% se encuentran la química y física con 11.8 y 4.02%, respectivamente. La regiones que presentan los mayores impactos en este sentido son por orden de importancia: Asia, 38%; África, 25.2%; América Latina, 15.6%; y Europa, 11.3%; las regiones con el menor grado de degradación de sus territorios son: Australia-Pacífico, 5.2%; y América del Norte, 4.9% (Cuadro 1).

Aunado a lo anterior, Stavi y Lal (2014) mencionan que la degradación de la tierra al sumar los cuatro valores relativos de severidad definidos (ligera, moderada, severa y muy severa) en éste mismo reporte (GLADA) muestran que de mayor a menor grado se encuentran: Europa 91%; Centro y Sudamérica 77%; Asia-Pacífico 73%; África, Norte y medio Este 71%; África Sub-Sahara 67%, Norte América 48% y Norte de Asia 47%; de los que destacan por el grado de severidad de degradación de la tierra los países africanos ubicados en alrededor del desierto del Sahara (Figura 1).

Además de lo anterior, se reconoce que los impactos directos del cambio climático en los sistemas naturales, económicos y en la salud humana por altas temperaturas y cambios en los patrones de lluvia, son cada vez más evidentes, siendo el sector de la producción primaria (agropecuaria y forestal) uno de los más afectados; las ondas de calor, la sequía y los incendios forestales han sido una combinación adversa para la estabilidad de los SSE alrededor del mundo (Cruse, 2012; Al-Kaisi *et al.*, 2012; Lal *et al.*, 2012).

Según la UNCCD (2013b) en el transcurso de una década (2000-2010) se han registrado temperaturas extremas con más frecuencia (IPCC, 2012). Por

**Cuadro 1. Extensión de la degradación de la tierra inducida por el hombre (millones ha).**

Tipo degradación	Mundial	Asia	Asia Occidental	África	América Latina	América del Norte	Australia Pacífico	Europa	% del total
1. Erosión hídrica	1094	440	84	227	169	60	83	115	55.7
2. Erosión eólica	548	222	145	187	47	35	16	42	27.9
3. Degradación química	233	70	53	60	76	---	1	26	11.8
Agotamiento de nutrientes	135	15	6	45	72	---	---	3	6.87
Salinidad	76	53	47	15	4	-	1	4	3.87
Contaminación	22	2	+	+	+	-	-	19	1.12
4. Degradación física	79	12	4	18	13	1	2	36	4.02
5. Otra	10	3	1	2	1	-	1	2	0.51
Total	1964	747	287	494	306	96	103	221	
% del total	100	38		25.2	15.6	4.9	5.2	11.3	

+ = incremento de la degradación con valores inferiores a 1; - = disminución de la degradación con valores inferiores a 1. Fuente: Nkonya *et al.*, 2011.

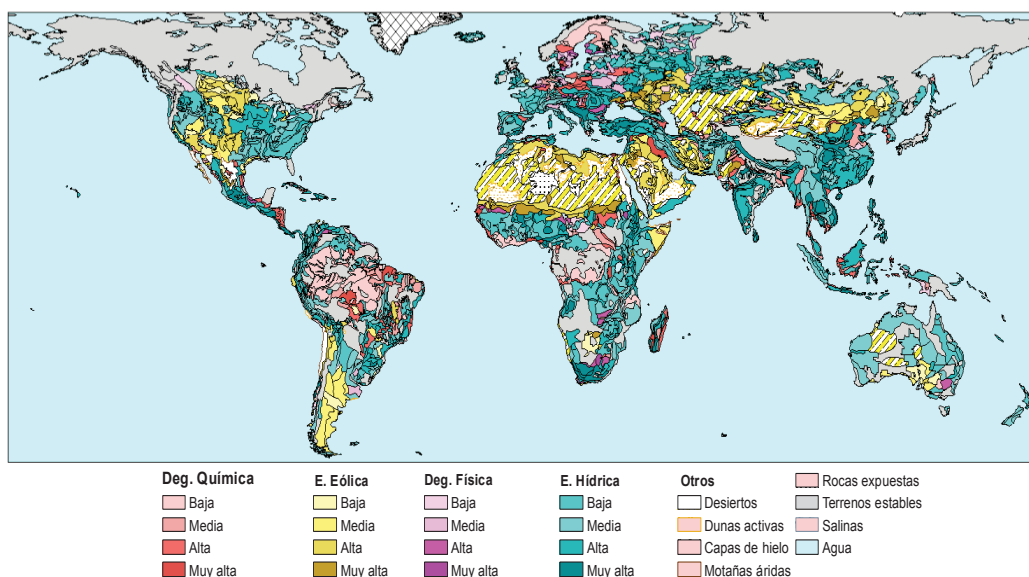


Figura 1. Degradación de la tierra por influencia antrópica a nivel global (Fuente: ISRIC, 2015).

ejemplo, en China, más de 400 millones de habitantes se ven afectados por la desertificación, que genera una pérdida económica directa anual superior a 10 mil millones de dólares americanos (USD), en tanto que en la India, las pérdidas debidas a la erosión se multiplicaron por seis entre 1989 y 1994; para ilustrar situaciones críticas ocurridas y que podrían repetirse con más frecuencia véase la información reportada por este organismo internacional que presenta casos extremos en varias regiones del mundo con alteraciones

ligadas a las altas temperaturas y sequías, cuyos costos tienden a ser altos (Cuadro 2).

Al respecto, Cruse (2012) al referirse al tema de los impactos del cambio climático en la agricultura, menciona que: “...en tales circunstancias debe haber una mejora de los cultivos, no solo para sobrevivir en tales condiciones, sino producir durante un período significativo del ciclo de vida, siendo cada vez más importante, y al mismo tiempo también un reto increíble”; situación en la que otros investigadores han

Cuadro 2. Fenómenos meteorológicos récord desde 2000, vinculados a la variabilidad de las lluvias y temperaturas, así como sus repercusiones económicas y sociales.

Región impactada (año)	Fenómeno	Impacto/costos
Amazonía Occidental (2010)	Sequía, récord de bajo nivel de agua en el río Negro	Área de 3.2 millones de km <sup>2</sup> con significativo aumento de la mortalidad arbórea
Europa Occidental (2011)	Primavera más cálida y seca registrada en Francia desde 1880	Cosecha de cereal en Francia, 12% menor.
Estados Unidos (Texas, Oklahoma, Nuevo México, Luisiana) (2011)	Verano más cálido y mayor sequía desde 1880	Arden 3 millones de acres (1.5 millones de hectáreas) en incendios forestales/daños provisionales: 6000-8000 millones de USD.
Estados Unidos, parte continental (2012)	Julio, mes más cálido registrado desde 1895 y duras condiciones de sequía.	Drástico aumento de los precios mundiales de los alimentos debido a la pérdida de cosechas.
Rusia Occidental (2010)	Verano más cálido desde 1501	500 incendios forestales en el área de Moscú, pérdida de cosechas de un 25%, 55 000 víctimas mortales/pérdidas económicas, 15 000 millones de USD.

Fuente: UNCCD, 2013b.

puesto especial atención ante la severidad de la sequía en años recientes (Al-Kaisi *et al.*, 2012; Lal *et al.*, 2012; ).

En el transcurso del presente siglo habrá cambios importantes en los sistemas hidrológicos en todo el mundo, en la partes altas de las cuencas se pronostican aumentos en las escorrentías por la presencia de lluvias más intensas y el derretimiento de los cuerpos de nieve y hielo, mientras que en las parte bajas la tendencia es hacia la escasez de agua por la disminución del flujo natural de los ríos, disminución que pondrá en fuerte competencia los diferentes usos de la tierra (Zhou *et al.*, 2010), donde se sabe que la agricultura bajo riego globalmente extrae alrededor del 74%, de la que el 90% se evapora como consecuencia de su mismo uso (uso consuntivo); de tal manera que la agricultura sujeta a la irrigación se verá más afectada (IPCC, 2007; Gudmundsson *et al.*, 2011; IPCC, 2012).

Los cambios tanto en los patrones de las lluvias, como en las escorrentías en términos de la disponibilidad de agua, plantea situaciones aún más críticas a nivel global, ya que alrededor del 80% de la población mundial (7.4 mil millones en 2016) vive en zonas donde el suministro de agua dulce no es seguro (Black, 2010). Normalmente, son zonas en las que se encuentran los hogares más pobres y vulnerables de los países en desarrollo quienes más sufren los impactos de la variabilidad climática.

A escala mundial existe una correlación directa entre la pobreza y la degradación de las tierras. En torno al 42% de los pobres de todo el mundo hay zonas degradadas y marginales para su sustento, en comparación con el 32% de los moderadamente pobres y el 15% del resto de la población (UNCCD, 2013b).

### **Degradación de Tierras y Cambio Climático en México**

La superficie total de México, sin incluir superficie marítima constituida por el Mar Territorial y la Zona Económica Exclusiva, definidas a través de tratados internacionales con los países vecinos, es de poco más de 1.964 millones de km<sup>2</sup>; de los cuales 1.959 millones de km<sup>2</sup> son continentales y poco más de 5 mil km<sup>2</sup> son islas, ocupando con ello el décimo tercer lugar en extensión territorial a nivel mundial y el quinto en el continente americano, después de Canadá, Estados Unidos, Brasil y Argentina (SEMARNAT-INECC,

2012). De esta superficie se estima que poco más del 50% son de clima árido y semiárido donde se asienta alrededor del 18% de la población nacional (González, 2012).

En este tipo de ambientes, limitados por la disponibilidad de agua se vive una situación crítica por la depresión productiva de las economías locales, exacerbada en muchos casos por los impactos de la sequía sobre actividades económicas y los recursos naturales, primordialmente: agua, suelo, flora y fauna, expresada en procesos de desertificación en muchos casos (UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA, 2004; IPCC, 2012).

Estudios recientes reportados entre 2010 y 2013, si bien muestran discrepancias en cuanto a las magnitudes para los cuatro tipos de la degradación edáfica (Cuadro 3), coinciden en que el problema se ha exacerbado por el ritmo de explotación de los recursos naturales. Considerando las tres fuentes consultadas (Garrido y Cotler, 2010; SEMARNAT, 2011; CONAFOR-UACH, 2013) se estima que el promedio de la degradación edáfica, con una incertidumbre de 10.6%, es de 1.3 millones de km<sup>2</sup>, lo que representa cerca del 70% del territorio nacional, valor muy cercano a lo reportado en la definición de la Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación, LBNDTD (CONAFOR-UACH, 2013).

Además de la magnitud de la degradación de las tierras en México (Cuadro 3), hay que considerar que en la LBNDTD para el análisis integrado de la degradación de las tierras que incluye los componentes edáfico, hídrico y florístico, se reporta que esta problemática en algún grado alcanza una superficie de 1.762 millones de km<sup>2</sup> que represente alrededor del 90.7% del TN, aclarando que entre la degradación severa y extrema suman 0.928 millones de km<sup>2</sup> (47.8% del TN), precisando esta fuente (CONAFOR-UACH, 2013) que: “...este es un problema asociado a la disminución o pérdida de la capacidad productiva de las tierras del país...” (Figura 2).

El grado y tipo de degradación de la tierra está definido a partir de la presión de uso y factor ambiental dominante; por ejemplo encontramos que en los distritos de riego debido a la excesiva extracción de agua del subsuelo para el sostenimiento de cultivos con requerimientos muy altos como es el caso de la producción de forrajes, predominan problemas asociados a la pérdida de la fertilidad y salinización



**Cuadro 3. Magnitud de la degradación de las tierras en México (km<sup>2</sup>) e incertidumbre asociada.**

Tipo de degradación	Garrido y Cotler (2010)	SEMARNAT (2011)	CONAFOR-UACH (2013)	Promedio	DeStd	Error Std	IC95	IE
							----- % -----	
Química	665 842	347 754	157 364	390 320	256 898	148 320	74 160	19.0
IRTN	34.30%	17.90%	8.10%	20.10%				
Erosión hídrica	573 379	229 246	679 966	494 197	235 562	136 002	68 001	13.8
IRTN	29.50%	11.80%	35.00%	25.40%				
Erosión eólica	595 459	184 562	388 552	389 524	205 450	118 617	59 308	15.2
IRTN	30.70%	9.50%	20.00%	20.10%				
Física	32 041	116 566	91 310	79 972	43 388	25 050	12 525	15.7
IRTN	1.60%	6.00%	4.70%	4.10%				
Con degradación	1 866 721	878 128	1 317 191	1 354 013	495 324	285 976	142 988	10.6
IRTN	96.10%	45.20%	67.80%	69.70%				
Sin degradación	76 039	1 064 632	625 569	588 747	495 324	285 976	142 988	24.3
IRTN	4%	55%	32%	30%				

IRTN = importancia relativa del territorio nacional; Promedio = promedio de lo reportado por las tres fuentes consultadas; DeStd=desviación estándar; IC95% = intervalo de confianza al 95%; Error Std = DeStd/ $\sqrt{3}$  (fuentes consultadas); IC 95% = error Std \* 2; IE% = incertidumbre esperada en por ciento.

de los suelos (FCCT, 2012), en tanto que en áreas de temporal y zonas de bosque, debido a características fisiográficas donde se combinan ambientes secos y de montaña, se produce una fragilidad mayor de los suelos a daños por erosión hídrica (Cotler, 2007), de manera que los distintos tipos de degradación se distribuyen conforme a estos dos factores.

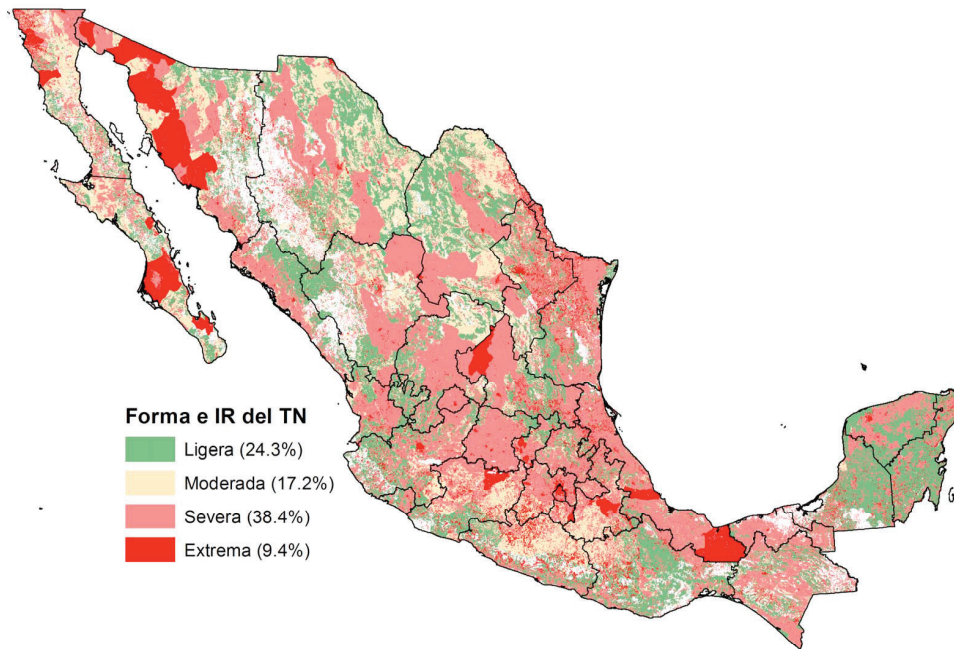
Estos territorios en los que a lo largo de muchos años se han acentuado cambios en los SSE, ha traído como consecuencia que las necesidades de las economías gradualmente se hayan vuelto dependientes del exterior de su propio ambiente (González, 2012); por ejemplo, la agricultura (riego y temporal) y la urbanización (de este territorio) han cambiado dramáticamente paisajes naturales (Postel y Richter, 2010; González, 2012), cuyos efectos deben ser evaluados (Logar *et al.*, 2013), no solo desde el punto de vista biofísico, sino también socioeconómico, a fin de vislumbrar medidas de mitigación y adaptación (PNUD, 2005; UNCCD, 2013b).

Desde el punto de vista sociopolítico y cultural hay varios casos documentados que dan cuenta sobre la manera tan dramática como se han modificado los paisajes naturales. Primero en Mesoamérica, a partir del final del siglo XIV y durante todo el siglo XV, y después en el Norte del territorio nacional, desde el exterior (Desde el Reino de España), coinciden

varios autores (Ardjis, 1999; Bonilla, 1999; Granados, 1999; Cruz-León *et al.*, 2010): literalmente comienza la destrucción de la cultura, los paisajes autóctonos y sus recursos naturales, principalmente por medio de la tala de bosques utilizadas para facilitar las actividades mineras en los alrededores de muchas ciudades como Guanajuato, Zacatecas, y Pachuca entre otras.

Varios estudios dan cuenta clara de la dimensión de los cambios en la gobernanza de los SEE en el Norte de México, tanto para aquellos ocurridos durante la colonización (Plana, 1991; Martínez-Saldaña, 1998; Salas y Berlanga, 2011), así como en el proceso de reestructuración social con la creación del Ejido como una forma de propiedad social de la tierra (campesinización) y su contraparte, la propiedad privada, mediante la Reforma Agraria y la creación de sistemas de irrigación basado en la construcción de grandes presas, obras que en su tiempo igualmente fueron criticadas y apoyadas (Hernández, 1975; Hewitt, 1980), y que hasta la fecha siguen siendo motivo de polémica desde el punto de vista socio-ambiental (Chairez *et al.*, 2006; Postel y Richter, 2010).

Desde el punto de vista de la productividad e ingresos económicos, la reforma al artículo 27 Constitucional y los acuerdos comerciales, establecidos principalmente desde finales de la década de los 90's, entre México, Estados Unidos y Canadá (TLCAN),



**Figura 2. Formas e importancia relativa (IR) del territorio nacional (TN) de la degradación de las tierras atribuible a influencia antrópica. (Fuente: Re-elaborado con base en CONAFOR-UACH, 2013).**

han acelerado los procesos de cambio en todos los órdenes de los SEE, los cuales siguen siendo objeto de análisis en términos de la relación costo/beneficio, ante los desafíos de la pobreza creciente que padecen las economías campesinas (Boltvinik y Damián, 2004).

El Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2013), en su informe más reciente sobre las variaciones de la pobreza a lo largo del territorio nacional indica que 53.3 millones mexicanos se encuentran en situación de pobreza, y 11.5 millones en condición de pobreza extrema, donde destacan los estados de Hidalgo, Guerrero, Oaxaca y Chiapas de la parte Centro Sur y en las zonas áridas y semiáridas de Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, en los que los grados de pobreza a nivel estatal se encuentran en los rangos más críticos que van del 40 al 50% y del 60 al 70%, respectivamente.

Esto explica, en parte, la razón por la que en más del 40% del territorio nacional las pérdidas por las sequías en años recientes (2010-2012) haya afectado a 19 entidades del país, superando con ello los 15 mil millones de pesos, que equivale al 6.39% del Producto Interno Bruto (PIB) del sector agropecuario (SEMARNAT-INECC, 2012).

### **El Reto para Poner en Marcha los Principios LDN y Acciones Derivadas**

**Retos global.** El reto global es pues revertir la tendencia de la degradación asumiendo los costos que esto representa; por ello, desde el Reporte de la Comisión Brundtland se ha reconocido la necesidad, entre los países miembros de la ONU en el marco de las premisas planteadas en el documento: “El Mundo que Queremos” (ONU, 1987), de realizar valoraciones en un marco de referencia que tenga en consideración la pregunta: ¿Qué pasaría y cuáles serían los costos si desde ahora “tomamos cartas en el asunto” o no hacemos nada? (Nkonya *et al.*, 2011; UNCCD, 2015). Esto significa que desde ahora deberá considerarse el costo de los daños al medioambiente para empezar a hacer enmiendas o no hacer nada, pero en cualquier caso asumir las consecuencias.

Al respecto, para dimensionar la magnitud de los costos de éste gran reto global se citan los siguientes estudios: Dregne y Chou (1992) en un estudio sobre la dimensión de la desertificación global plantearon que el costo mundial para ese entonces fue de 42 billones de USD (BUSD), lo cual a precios actuales representa

el 8% del PIB; Nkonya *et al.* (2011) en una compilación conocida como GLADA, reportan que para 24 países el costo aproximado de la degradación entre 1992 y 2007 fue de 30.1 BUSD, cantidad que representaría el 5.9% del PIB. Stern (2007), en un estudio también planteó que para mitigar los efectos del cambio climático sería requerido el 1% del Producto Bruto Mundial (PBM) lo que a precios actuales representa 5.9 BUSD.

La UNCCD (2014b) ubica tres rubros estratégicos a nivel global que conciernen de igual manera a otras Convenciones como la de Diversidad Biológica (CDB) y la de Cambio Climático (CMNUCC) que tienen que ver con seguridad alimentaria, seguridad en el uso de agua, y migración, cuyo diagnóstico de referencia es el siguiente:

1) Seguridad alimentaria.- La seguridad alimentaria en la actualidad tiene una pérdida paulatina de la productividad debido a la degradación de la tierra estimada entre 3-5%, lo que representa alrededor de 490 BUSD por año;

2) Seguridad en el uso del agua.- La seguridad en el uso del agua como una necesidad básica presenta alto riesgo en el corto plazo, pues se estima que para el 2025 más de 2.4 billones de personas alrededor del mundo podrían vivir en áreas sujetas a periodos intensos de escasas de este preciado recurso; y

3) Migración.- La migración vinculada a muchos factores, se estima que en los siguientes 10 años 50 millones de personas podrían estar en riesgo de desplazamiento. Lo cual podría ser mayor si continúa la degradación de la tierra en las tasas actuales, por lo que el manejo sustentable de la tierra podría ofrecer una opción concreta más allá de “luchar o volar”, lo cual significa quedarse a afrontar los retos a costa del bienestar propio y el de la familia o emigrar en busca de nuevos horizontes.

**Reto de México.** El reto de México en la meta aspiracional LDN planteada, implica revertir la tendencia de la degradación de la tierra mediante acciones concertadas entre el gobierno, mediante políticas públicas reorientadas, y los diversos sectores de la sociedad (FCCT, 2012), primordialmente con la población afectada y grupos sociales involucrados, como las Organizaciones no Gubernamentales y académicos, en formar parte de acciones de mitigación y adaptación de acuerdo a los lineamientos definidos en el acuerdo 8 de la Conferencia de Partes (COP 11) para el Grupo Intergubernamental de Trabajo (IWG, por sus siglas en inglés) de la UNCCD (Gnacadjá, 2015).

La estimación de costos de la degradación de la tierra, no sería tanto problema, ya que a decir de Almagro (2004): “...en México existe una larga tradición en elaboración de cuentas nacionales, iniciadas desde 1980 por el Banco de México, lo que a partir de 1983 forma parte de las actividades del INEGI”.

Es así que, como parte de los productos del Sistema de Cuentas Nacionales de México, el INEGI presenta las “Cuentas económicas y ecológicas de México” en valores corrientes, con lo cual es posible identificar el impacto ambiental de las actividades económicas, en cuanto al agotamiento de los recursos naturales y la degradación del medio ambiente (INEGI, 2013). Sin embargo, el Gasto en protección ambiental como proporción del PIB ha sido ligeramente menor al 1.0% en años recientes (2012-2014) (INEGI, 2014).

Durante 2013, el costo económico por los daños ambientales ocasionados por las actividades económicas fue del 5.7% del PIB a precios de mercado. Este rubro es equivalente a dos tipos de costos: 1) por el agotamiento de los recursos naturales que incluye hidrocarburos, recursos forestales y agua subterránea; y 2) por la degradación ambiental, que incluye degradación del suelo, residuos sólidos, contaminación del agua y contaminación atmosférica. Ambos cerraron con un monto de 909 968 millones de pesos (INEGI, 2013).

Sin embargo, la contabilidad ambiental en breve deberá considerar aspectos aún más complejos y de más alto costo socioecológico, derivado de la puesta en marcha de la Reforma Energética, pues como se sabe se reformuló el marco legal, no solo los petrolíferos, sino también los recursos afines, ya que se expidieron nueve Leyes y se reformaron 12 Leyes concurrentes, donde destaca la Ley de Aguas Nacionales (SENER, 2014).

La extracción de gas natural mediante la técnica de perforación profunda y fracturación hidráulica, conocida coloquialmente como “Fracking”, prevista en la mencionada Reforma Energética, de llevarse a cabo, representa una de las mayores amenazas para grandes extensiones del territorio nacional, principalmente para el Norte árido de México, donde el agua como uno de los más preciados recursos podría verse seriamente comprometido por razones de cantidad y calidad, además de los gases que emanen a la superficie con vapores con capacidad para desecar la vegetación contigua a los sitios de extracción.

Además de lo anterior, se daría una competencia

intersectorial por la disponibilidad del agua, por ejemplo agricultura contra “Fracking”, y la calidad del agua para el consumo humano y animal no sería garantizada, como ha ocurrido en casos semejantes (Colborn *et al.*, 2011; Osborn *et al.*, 2011; Small *et al.*, 2014). Osborn *et al.* (2011) en un estudio sobre el impacto de la extracción de gas mediante Fracking en Pensilvania y Nueva York, encontraron concentraciones de metano 17 veces más altas, con hasta 64 mg L<sup>-1</sup> que el promedio en el 85% de los pozos de abastecimiento de agua potable.

### CONCLUSIONES

- La comunidad internacional desde hace tiempo ha reconocido a la degradación de la tierra como problema importante desde varios puntos de vista: económico, social y ambiental. La tendencia de degradación de la tierra deja ver complicaciones futuras para la humanidad. Por el momento se estima que la filosofía del desarrollo sustentable y la aspiración LDN es alcanzable siempre y cuando se tomen medidas en el corto plazo, porque la acumulación de daños a los recursos naturales y el medioambiente podrían llegar a un nivel de entropía o nivel tal que sea imposible su recuperación.

- México se encuentra en un nuevo paradigma, que no es ajeno a otros países en desarrollo, que buscan conciliar la política ambiental con las metas de crecimiento económico, en esta ocasión enfocada a lograr la neutralidad paulatina de la degradación de las tierras al 2030, o asumir las consecuencias por la sobreexplotación evidente de los recursos de sus tierras, de lo contrario LDN solo llegará a ser un reto frustrado ante la tendencia de la degradación de las tierras y comprometiendo con ello cada vez más la calidad de vida de las futuras generaciones.

### AGRADECIMIENTOS

El presente documento, parte de una experiencia vivida por el autor entre 2014 y 2015 como integrante del IWG-UNCCD, formado por 23 especialistas de cinco Regiones Continentales: África (3), Asia (5), Centro y Este de Europa (5), Oeste de Europa y otros grupos (5), y Latinoamérica y Caribe (5). Por ello, se agradece las facilidades otorgadas por parte de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), en

su carácter de Punto Focal de la UNCCD, para ser nominado y ser parte de dicho organismo internacional. Se agradece de manera especial a Jorge Luis García González de la CONAFOR, al Coordinador Regional de la UNCCD en Chile Heitor Matallo, así como a Monique Barbut, Secretaria Ejecutiva de la UNCCD, así como a los miembros del Secretariado, especialmente a Sergio Zelaya y Sasha Alexander. Finalmente, también se agradece a los principales responsables del IWG quienes asumieron con todo profesionalismo su responsabilidad en este organismo internacional, ellos son: Nicholas Hanley y Bongani Masuku, Coordinador y Vicecoordinador respectivamente.

### LITERATURA CITADA

- Al-Kaisi, M. M., R. W. Elmore, J. G. Guzman, H. M. Hanna, Ch. E. Hart, M. J. Helmers, E. W. Hodgson, A. W. Lenssen, A. P. Mallarino, A. E. Robertson, and J. E. Sawyer. 2012. Drought impact on crop production and the soil environment: 2012 experiences from Iowa. *J. Soil Water Conserv.* 68: 19-24.
- Almagro V., F. 2004. Medición del desarrollo sustentable, reto de las cuentas nacionales. La experiencia de México en el cálculo del producto interno bruto ecológico. *Rev. Latinoam. Econ.* 35: 93-119.
- Aridjis, H. 1999. La destrucción de las indias y sus recursos renovables. pp. 21-26. *In: A. Sánchez Vélez (ed.). La Destrucción de las indias y sus recursos renovables 1492-1992.* Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Black, R. 2010. Water map shows billions at risk of water insecurity. *Science & Environment, BBC News.* <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-11435522> (Consulta: marzo 30, 2013).
- BM (Banco Mundial). 2015. Indicadores PIB (US\$ a precios actuales). <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD> (Consulta: marzo 27, 2015).
- Boltvinik, J. y A. Damián. 2004. Introducción. La necesidad de ampliar la mirada para enfrentar la pobreza. pp. 11-42. *In: M. Scheingart, J. Boltvinik y A. Damián. La pobreza en México y el mundo. Realidades y desafíos. Siglo XXI. México, D. F.*
- Bonilla R., B. 1999. Historia de la silvicultura mexicana y la destrucción de sus bosques. pp. 165-185. *In: A. Sánchez Vélez (ed.). La destrucción de las indias y sus recursos renovables.* Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Carabias, J. 2005. Recursos naturales, desarrollo sustentable y educación: Una visión global. pp. 35-50. *In: A. Barahona y L. Almeida (eds.). Educación para La Conservación. Coordinación de Servicios Editoriales, Facultad de Ciencias, UNAM. México, D. F.*
- Cháirez A., C., J. Palerm, L. Tijerina, L. Jiménez y T. Martínez-Saldaña. 2006. La regulación del río Nazas ¿acierto o desacierto? *AgroNuevo* 11: 33-60.
- Colborn, T., C. Kwiatkowski, K. Schultz, and M. Bachran. 2011. Natural gas operations from a public health perspective. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 17: 1039-1056.

- CONAFOR-UACH (Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo). 2013. Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Zapopan, Jalisco, México.
- CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social). 2013. Resultados de pobreza a nivel nacional y por entidades federativas 2010-2012. [www.coneval.gob.mx](http://www.coneval.gob.mx) (Consulta: julio 31, 2013).
- Cotler A., H. 2007. Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña. INE-SEMARNAT. <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/395/cotler.html> (Consulta: junio 22, 2011).
- Cruse, R. M. 2012. Agriculture: Is climate change a serious issue? 3212 Agronomy/Iowa State University. Ames, IA, USA.
- Cruz-León, A., T. Martínez-Saldaña y M. Á. Damián-Huato. 2010. Las mulas olvidadas por la historia agrícola colonial: una restitución. *Agric. Soc. Desa.* 7: 221-228.
- Dregne, H. E. and N. T. Chou. 1992. Global desertification dimensions and costs. *In: Degradation and restoration of arid lands.* Lubbock: Texas Tech. University. <http://www.ciesin.columbia.edu/docs/002-186/002-186.html> (Consulta: marzo 27, 2015).
- FAO-ITPS (Food and Agriculture Organization of the United Nations - Intergovernmental Technical Panel on Soils). 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR). Main Report. FAO/ITPS. Rome, Italy.
- FAO-UNEP (Food and Agriculture Organization of the United Nations - United Nations Environment Programme). 1997. Negotiating a sustainable future for land. Structural and Institutional Guidelines for Land Resources Management in the 21st Century. FAO/UNEP. Rome, Italy.
- FAO-UNEP-CONAZA (Food and Agriculture Organization of the United Nations - United Nations Environment Programme-Comisión Nacional de Zonas Áridas). 1994. Plan de acción para combatir la desertificación en México (PACD-MEXICO). Comisión Nacional de Zonas Áridas-Secretaría de Desarrollo Social. ISBN: 968-838-243-4. México, D. F.
- FCCT (Foro Consultivo Científico y Tecnológico). 2012. Foro Nacional para la Elaboración del Programa Especial de Ciencia y Tecnología en Materia de Agua, realizado en la Ciudad de México el 23 de abril, 2012. Organizado por el Foro Consultivo Científico y Tecnológico, A.C., la Comisión Nacional del Agua y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [http://www.foroconsultivo.org.mx/eventos\\_realizados/foro\\_agua\\_2012/pecyt\\_agua.pdf](http://www.foroconsultivo.org.mx/eventos_realizados/foro_agua_2012/pecyt_agua.pdf). (Consulta: septiembre 25, 2012).
- Garrido, A. y H. Cotler. 2010. Degradación de suelos en las cuencas hidrográficas de México. pp. 104-107. *In: H. Cotler A., A. Garrido Pérez, N. Luna González, C. Enríquez Guadarrama y M. L. Cuevas Fernández (eds.). Las cuencas hidrográficas de México, diagnóstico y priorización.* Pluralia. México, D. F.
- Gnacadjá, L. 2012. Moving to zero-net rate of land degradation. Statement by Executive Secretary. UN convention to combat desertification, Rio de Janeiro. <http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/secretariat/2012/UNCCD%20ES%20Statement%20at%20PR%20in%20NY%20on%2026%20March%202012.pdf>. (Consulta: marzo 29, 2013).
- Gnacadjá, L. 2015. New challenges in science and policies to combat desertification. *J. Arid Environ.* 112: 1-4.
- González M., F. 2012. Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. SEMARNAT-INECC. México, D. F.
- Grainger, A. 2015. Is land degradation neutrality feasible in dry areas? *J. Arid Environ.* 112: 14-24.
- Granados S., D. 1999. Recursos y culturas de las zonas áridas de México. pp. 129-139. *In: A. Sánchez Vélez (ed.). La Destrucción de las indias y sus recursos renovables 1492-1992.* Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Gudmundsson, L., L. M. Tallaksen, and K. Stahl. 2011. Projected changes in future runoff variability a multi model analysis using the A2 emission scenario. Technical Report No. 49. Water and Global Change. <http://www.eu-watch.org/publications/technical-reports> (Consulta: marzo 29, 2013).
- Henández A., P. 1975. ¿La explotación colectiva en la Comarca Lagunera es un fracaso? B. Costa-Amic. México, D. F.
- Hewitt de A., C. 1980. La modernización de la agricultura mexicana, 1940-1970. 2da edición en español. Siglo XXI. México, D. F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Producto interno bruto (PIB) y cuentas nacionales. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/cuadrosestadisticos/GeneraCuadro.aspx?s=est&nc=749&c=25748> (Consulta: febrero 26, 2016).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013. Cuentas económicas y ecológicas de México 2013. Boletín de prensa núm. 554/14, Aguascalientes, Ags., México. <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Boletines/Boletin/Comunicados/Especiales/2014/diciembre/comunica7.pdf> (Consulta: marzo 28, 2015).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. Ginebra, Suiza.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Lal, R., J. A. Delgado, J. Gulliford, D. Nielsen, Ch. W. Rice, and R. S. van Pelt. 2012. Adapting agriculture to drought and extreme events. *J. Soil Water Conserv.* 67: 162-166.
- Logar, I. and J. C. J. M. van den Bergh. 2013. Methods to assess costs of drought damages and policies for drought mitigation and adaptation: Review and recommendations. *Water Resour. Manage.* 27: 1707-1720.
- Martínez-Saldaña, T. 1998. La diáspora tlaxcalteca, la expansión agrícola mesoamericana al Norte de México. Ediciones Tlaxcallan, DIF Tlaxcala, Gobierno del Estado de Tlaxcala. México, D. F.
- Nkonya, E., N. Gerber, P. Baumgartner, J. von Braun, A. de Pinto, V. Graw, E. Kato, J. Kloos, and T. Walter. 2011. The economics of land degradation. Toward an integrated global assessment. *Development Economics and Policy.* Vol. 66. Peter Lang Publishing Group. Frankfurt, Alemania.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 1987. Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Nota del Secretario General. Desarrollo y Cooperación Económica Internacional: medio ambiente. <http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/42/427> (Consulta: marzo 27, 2015).

- Osborn, S. G., A. Vengosh, N. R. Warner, and R. B. Jackson. 2011. Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *PNAS* 108: 8172-8176.
- Plana, M. 1991. El reino del algodón en México: La estructura agraria de La Laguna, 1855-1910. Ayuntamiento de Torreón 91-93. Torreón, Coah., México.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2005. Marco de políticas de adaptación al cambio climático: Desarrollo de estrategias, políticas y medidas. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Postel, S. y B. Richter. 2010. Ríos para toda la vida. La gestión del agua para las personas y la naturaleza. SEMARNAT-INE. México, D. F.
- Sala D., M. y G. Berlanga G. 2011. El Río Nazas a través de sus obras hidráulicas. Torreón, Coah., México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Conócenos. Antecedentes. <http://www.semarnat.gob.mx/conocen/antecedentes> (Consulta: febrero 23, 2016).
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2011. Estrategia nacional de manejo sustentable de tierras. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-607-7908-42-5. México, D. F.
- SEMARNAT-CNA (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional del Agua). 2008. Programa nacional hídrico 2007-2012. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PNH\\_05-08.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PNH_05-08.pdf). ISBN 968-817-836-5 e ISBN 978-968-817-836-2. México, D. F.
- SEMARNAT-INECC (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2012. México. Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. SEMARNAT-INECC. ISBN: 978-607-8246-50-2. México, D. F.
- SENER (Secretaría de Energía). 2014. Promulgación de la Reforma energética, Leyes secundarias. [http://www.energia.gob.mx/webSener/leyes\\_Secundarias/](http://www.energia.gob.mx/webSener/leyes_Secundarias/) (Consulta: marzo 30, 2015).
- Small, J. M., P. C. Stern, E. Bomberg, S. M. Christopherson, B. D. Goldstein, A. L. Israel, R. B. Jackson, A. Krupnick, M. S. Mauter, J. Nash, D. W. North, S. M. Olmstead, A. Prakash, B. Rabe, N. Richardson, S. Tierney, T. Webler, G. Wong-Parodi, and B. Zielinska. 2014. Risks and risk governance in unconventional shale gas development. *Environ. Sci. Technol.* 48: 8289-8297.
- Stavi, I and R. Lal. 2014. Achieving zero net land degradation: Challenges and opportunities. *J. Arid Environ.* 112: 44-51.
- Stern, N. 2007. The economics of climatechange: The stern review. Cambridge University press. UK.
- UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA (Universidad Autónoma Chapingo-Comisión Nacional de las Zonas Áridas - Secretaría de Desarrollo Social - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2004. Escenarios climatológicos de la República mexicana ante el cambio climático. UACH, Depto. de Suelos. Chapingo, México.
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). 2011. Desertificación, una síntesis visual. Manual de la CNULD en español. ISBN: 978-92-95043-53-4. Luxemburgo.
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). 2012. Zero net land degradation. A sustainable development goal for Rio+20 to secure the contribution of our planet's land and soil to sustainable development, including food security and poverty eradication. Printed by Ediouro Grafica e Editora. ISBN 978-92-95043-62-6. Brasil.
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). 2013a. Desertification, a visual synthesis. United Nations Conventions to Control Desertification. UNCCD Publications. <http://www.unccd.int/en/resources/publication/Pages/default.aspx> (Consulta: julio 1, 2013).
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). 2013b. 2da Conferencia Científica de la CLD; Aspectos económicos de la desertificación, la degradación de las tierras y la sequía: Metodologías y análisis para la toma de decisiones. <http://2sc.unccd.int/es/inicio>. I(Consulta: marzo 28, 2013).
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). 2014a. Land degradation neutrality resilience at local, national and regional levels. United Nations Convention to Combat Desertification. UN Campus, Platz der Vereinten Nationen 1, 53113 Bonn, Germany.
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). 2014b. The UNCCD: Laying the ground work for future security (2014-2015). Secretariat of the United Nations to Combat Desertification. UN Campus, Platz der Vereinten Nationen 1, 53113 Bonn, Germany.
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). 2015. Climate change and desertification: Anticipating, assessing & adapting to future change in drylands. Impulse report for 3rd SC-UNCCD. Ed. UNCCD co-edition of Agropolis International. ISBN: 978-2-35682-379-3 Montpellier, France.
- Zhou, Y., F. Zwahlen, Y. Wang, and Y. Li. 2010. Impact of climate change on irrigation requirements in terms of ground water resources. *Hydrogeol. J.* 18: 1571-1582.

## Revisores de este número Reviewers of this number

Avilés Marín, Silvia Mónica	Instituto de Ciencias Agrícolas, UABC. Mexicali, B. C., México.
Benavides Mendoza, Adalberto	Depto. de Horticultura, UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
Camillo de Carvalho, Marco A.	Depto. de Agronomía, Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Alta Floresta (MT). Brasil.
Carcaño Montiel, Moisés	Instituto de Ciencias BUAP. Edificio 103-E. Ciudad Universitaria. Puebla, Puebla, México.
Covarrubias Ramírez, Juan M.	INIFAP, C.E. Saltillo. Saltillo, Coah., México.
Cristóbal Acevedo, David	Depto. de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México, México.
Delgado Martínez, Rafael	Unidad Académica Multidisciplinaria Agronomía y Ciencias, UAT. Cd. Victoria, Tamps., México.
Espinosa Ramírez, Martín	INIFAP, C.E. Río Bravo. Río Bravo, Tamaulipas, México.
Espinosa Victoria, David	Instituto de Recursos Naturales, Colpos, Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México.
Esquivel Cote, Rosalva	Programa de Edafología, Colpos, Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México.
Etchevers Barra, Jorge D.	Lab. de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental. Colpos, Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México.
García Rodríguez, Jorge L.	Subgerente de Inventario y Monitoreo de Suelos Forestales. CONAFOR. México, D. F.
García Roque, Cassiano	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul, Brasil.
Hidalgo Moreno, Claudia I.	Profesora Investigadora. Colpos, Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México.
Lara Herrera, Alfredo	Unidad Académica de Agronomía, Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas, Zac., México.
Murillo Amador, Bernardo	Programa de Agricultura en Zonas Áridas del CIBNOR. La Paz, B.C.S. México.
Nieto Garibay, Alejandra.	Programa de Agricultura en Zonas Áridas, CIBNOR. La Paz, B. C. S., México.
Orozco Corral, Alfonso L.	Grupo La Norteña. Depto. de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cd. Cuauhtémoc, Chih., México.
Quiñones, Evangelina	Biotecnología Vegetal, CIATEJ. Guadalajara, Jalisco, México.
Rodríguez, Julio Cesar	Depto. de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
Sánchez Viveros, Gabriela	Facultad de Ciencias Agrícolas-Xalapa, Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver., México.
Sandoval Villa, Manuel	Programa de Edafología, Colpos, Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México.
Troyo Diéguez, Enrique	CIBNOR. La Paz, B. C. S., México.
Turrent Fernández, Antonio	INIFAP, C.E. Valle de México. Coatlinchan, Texcoco, Edo. de México.
Vázquez Lule, Alma Delia	Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México, D. F.