

# TERRA

TERRA Vol. 21 2003, Número especial proyecto SPIES



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

# TERRA

VOLUMEN 21, 2003 • NUMERO ESPECIAL, PROYECTO SPIES  
VOLUME 21, 2003 • SPECIAL NUMBER, SPIES PROJECT

- 1 Development and application of a Soil Productivity Index for Central America and its erosion sensitivity: An introduction.  
*N. Rampazzo and W. E. H. Blum*
- 5 SOFIC: A soil productivity model for Costa Rica and Mexico based on the estimation of maize yield.  
*N. Rampazzo, A. R. Waldingbrett, A. Mentler, and W. E. H. Blum*
- 19 Diseño de un sistema de generación de lluvias para la introducción de datos en el modelo EUROSEM.  
Design for storm input for the EUROSEM model.  
*Peter Strauss, Freddy Sancho, Christian Prat y G. Arévalo G.*
- 29 Producción de maíz en suelos de pendiente compleja de Costa Rica.  
Production of corn in complex slope soils of Costa Rica.  
*F. Sancho, N. Rampazzo, A. Mentler y M. Villatoro*
- 41 Calibración y evaluación del modelo EUROSEM en América Latina: México, Nicaragua y Costa Rica.  
Calibration and evaluation of the EUROSEM model in Latin America: Mexico, Nicaragua, and Costa Rica.  
*J. A. Rey, A. Veihe, J. N. Quinton, P. Strauss y F. M. Sancho*
- 55 Producción de maíz en terrenos con pendiente compleja de México.  
Production of corn in complex slope soils of Mexico.  
*A. Aguilar†, J. F. Tah I., A. Torres E., G. Arévalo G. y J. A. Rey C.*

Indice de autores / *Authors index*

65

Indice de revisores / *Reviewers*

66

# TERRA

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

### MESA DIRECTIVA 2003-2005

Presidente  
Vicepresidente  
Secretario General  
Tesorero  
Secretario Técnico  
Secretaría de Relaciones Internacionales  
Vocales

Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez  
Dr. José A. Cueto Wong  
Ing. Andrés Espinosa Carmona  
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos  
Dr. Enrique Salazar Sosa  
Dr. Rogelio Juárez González  
Dr. Ernesto Frías Ramírez  
Dra. Christina Siebe Grabach  
M.C. Jesús P. Amado Alvarez  
Dr. Juan Pedro Flores Marges  
Dra. Claudia Hidalgo Moreno  
Dr. David Cristóbal Acevedo

EDITOR  
EDITOR ADJUNTO  
EDITORES TECNICOS

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

EDITORES DE ESTILO

EDITORA DE ESTILO  
EN INGLES

## DIVISIONES Y DISCIPLINAS

### División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

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

### División II: Relación Suelo - Clima - Biota

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

### División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

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

### División IV: Educación y Asistencia Técnica

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

TERRA registro en trámite.  
Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.  
Número especial, Proyecto SPIES, Volumen 21, 2003  
ISSN 0187 - 5779

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

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

Teléfono y Fax +01(595) 952 17 21  
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

### EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

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

Diseño de portada

### EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

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

### EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

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

# TERRA

## MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

### BOARD

President  
Vicepresident  
Secretary  
Treasurer  
Technical Adviser  
International Relations  
Voters

Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez  
Dr. José A. Cueto Wong  
Ing. Andrés Espinosa Carmona  
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos  
Dr. Enrique Salazar Sosa  
Dr. Rogelio Juárez González  
Dr. Ernesto Frías Ramírez  
Dra. Christina Siebe Grabach  
M.C. Jesús P. Amado Alvarez  
Dr. Juan Pedro Flores Marges  
Dra. Claudia Hidalgo Moreno  
Dr. David Cristóbal Acevedo

## DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

### Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

### Division III: Use of the Soil Resource

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

### Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending  
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science  
Special Number, SPIES Project, Volume 21, 2003

ISSN 0187 - 5779

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

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

Telephone - Fax: +52 (595) 952 17 21  
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

### EDITOR ASSOCIATE EDITOR TECHNICAL EDITORS

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

### STYLE EDITORS

### ENGLISH EDITOR

### EDITORIAL STAFF

#### Cover design

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

### NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

### INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

# DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A SOIL PRODUCTIVITY INDEX FOR CENTRAL AMERICA AND ITS EROSION SENSITIVITY - AN INTRODUCTION -

N. Rampazzo<sup>1†</sup> and W.E.H. Blum<sup>1</sup>

## BACKGROUND

During the last few years „Sustainable Land Use“ has become a keyword within the discussion about agricultural land use, especially for food production and quality in the tropics and subtropics. In this context, considering the fact that each soil has not only an agricultural (ecological) function but also technical, industrial and socio-economic ones, considerable differences in the interpretation and perception of „sustainability“ have been revealed (Blum, 1993; Blum, 1994a,b; Blum and Aguilar Santelises, 1994).

Sustainable agricultural land use, therefore, is only possible if all the other land uses are sustainable as well (Blum, 1994a,b).

Almost all soil parameters (e.g. physical, chemical, mineralogical, biological) play an important role in the genesis and variability of soil productivity. Soil structural parameters can be divided into different groups and are more or less unstable and susceptible to changes (Rampazzo *et al.*, 1998): Moreover, all parameters influence one another leading to a typical structural status. Particularly important is the thickness and structure of the topsoil, where the plant root system is developed.

Soil erosion is one of the most challenging problems of soil degradation throughout the world. Especially in areas under tropical climatic conditions like Central America, soil loss rates of enormous dimensions can be observed. Due to the removal of topsoil by erosion, basic soil functions such as plant and food production, buffer or transformation function can be severely influenced. In order to establish the requirements of sustainable soil use, critical values for soil loss have to be defined.

Looking at the history of development for the so-called „Soil loss tolerance values“ (Schertz, 1983)

it becomes evident, that with its application certain problems arise. Due to the pragmatic way of development, a sound physical basis for the concept and application of „Soil loss tolerance values“ is missing. Therefore, the application of soil loss tolerance values outside its area of development (United States of America) is restricted. This is even more true for areas or countries where environmental conditions are completely different such as Central America. Furthermore, the concept of soil loss tolerance is primarily (but not exclusively) focussed on the relationship between soil erosion and productivity and, therefore, provides only a part of possible dangers to sustainability (Blum, 1994a,b).

Although losses of topsoil by erosion are widely considered to reduce crop productivity, this has not been evaluated and quantified for a wide range of soils and environmental frame conditions, especially in tropical and subtropical areas like Central America. Moreover, the existing models relating soil loss to soil productivity have been developed under conditions of high input agriculture whereas the majority of farmers in countries like Mexico, Costa Rica, and Nicaragua produce under low input conditions. Consequently, there is a big need for new approaches in order to quantify and predict changes in soil productivity in relation to long-term soil erosion. (Williams, 1981). Erosion-productivity modelling offers the possibility to estimate the long-term risks of different environmental scenarios on soil productivity.

Moreover, in order to focus and transfer the elaborated data, maps and scenarios have to be developed, which can picture the trend to be expected but also show which measures can succeed. It seems reasonable to provide more than an illustration of the soil survey data. Studies should result in the creation of models, which enable local planners to develop on their own scenarios and to evaluate them (Griffiths and Richards, 1989; Weir, 1991).

To illustrate very complex processes like erosion, the relative mass movements and the change of land use, it is unavoidable to use a GIS. It does not only permit the overlay of several data fields in a form defined by the user but also it aids in the analysis of

<sup>1</sup> Institute of Soil Research, University of Agricultural Sciences, Gregor-Mendel-Strasse 33, Vienna, Austria.

<sup>†</sup> (nicola.rampazzo@boku.ac.at) y Autor responsable.

Recibido: Agosto de 2000. Aceptado: Noviembre de 2002.

Publicado en Terra 21, Número Especial: 1-4.

large volumes of data which normally is very time consuming. Although GIS has been used in erosion studies (Bocco *et al.*, 1990; Garg and Harrison, 1992), it is usually with relatively simple empirical models and relatively little effort has been made to combine physically-based erosion models with GIS. Most of the studies link survey data and computations to erosion hazard maps. However, these maps do not come up to the general expectations, because they can only show the present situation and are not able to give support in the working out of alternatives. Anyway, the same maps could also be used as a starting point for developments of scenarios. The bases therefore are the productivity index, the actual and the potential land use systems, and other socio-economic conditions. In this context it is interesting to find out the consequences of the application of special soil protection measures. Including the factor time it is possible to extrapolate future developments. This model enables to assess the time horizon, in which a current land use can be performed at a certain productivity level. This leads to conclusions about the necessity of land use changes, the future economic situation and the food supply of a region.

### STATE OF THE ART

Present soil erosion-soil productivity models, such as EPIC (Williams *et al.*, 1984), rely upon empirically based relationships to describe the processes of soil erosion by water. Due to their empirical nature, they cannot be easily transferred to agroclimatic conditions other from those for which they were developed. However, erosion models do exist, such as EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998a, b) which simulate the processes of erosion using physical principles. By utilising such a model and linking it to an extended soil productivity index, it is proposed to develop a method for determining the impact of soil erosion on soil productivity in tropical environments based on sound scientific principles.

Lal (1988) asserts that the direct method of determining the relationship between soil loss and yield is a reasonable modelling approach to erosion-productivity study. Such types of models are useful for solving the conflicting problems of long-term data requirements and urgent needs for immediate policy decisions. According to Fetwi (1993), current E-P models can roughly be grouped as follows:

### Physically-based Models

Physically based models offer the possibility of application under a wide range of environmental frame conditions. During the last two decades, rising efforts have been given on the development of such models. Through the high number of indispensable input parameters their application is limited. Therefore, it is essential to develop transfer functions for areas, where the necessary input data are not available.

One of the most comprehensive physically based erosion-productivity models is the erosion productivity impact calculator, EPIC (Williams *et al.*, 1983, 1984; Williams and Renard, 1985). This model contains components for simulating erosion, plant growth and related processes. These include: hydrology, weather simulation, erosion and sedimentation, nutrient cycling, plant growth, tillage, soil temperature, economics, and plant environment control. The erosion component of EPIC, however, is based on relationships of the empirical model USLE (Wischmeier and Smith, 1978). Therefore, it could be argued, that the physical basis of EPIC, regarding its erosion component is weak.

Another model of this type is the SOIL-LIFE model (Stocking and Pain, 1983). It is a simple mathematical model developed to predict the life span of soils and describes indirectly the effect on productivity. It is designed to estimate the number of years a soil remains productive, but it is not able to describe the effect of erosion on yield and productivity.

### Empirical Models

Most empirical models make use of statistically derived functions, which can be obtained more or less easily from available data. Their main drawback is that they are usually specific to the conditions from which they were derived and may not be extrapolated without validation within the new area of interest.

The erosion-productivity model EPROM and the proposed theoretical erosion-productivity model THEPROM are simple empirical models, which provide an approximation of the impact of soil erosion on future production. The models do not take into account nutrient losses by erosion.

A YIELD-SOIL DEPTH model, worked out by Christensen and McElyea (1988), is a simple empirical regression model to describe the

relationship between soil depth and yield. Such a model, evaluating yield and not productivity does not take into account erosion processes and their effects and cannot be related to any parameter of soil loss or runoff.

The SOIL LOSS-YIELD model assumes that yield variation caused by erosion can be explained by the rate of soil loss.

The soil erosion-productivity model SE-P (Timlin *et al.*, 1986) was developed to determine the effect of soil loss on maize yield. The model is designed to work for one crop and calculates daily water budget for a given reduction in soil depth and predicts yield.

### Classificatory Models

These models are based on assigning index values to individual soil parameters (Stocking, 1984) and combining them in multiplicative, additive or limiting-factor approaches to predict the effect of their interaction. They can be seen as a subgroup of empirical models.

There is a problem in validating the erosion-productivity models, which predict yield rather than changes in the soil properties which affect productivity. Yield can be influenced by so many factors other than erosion that, unless very long-term studies are carried out so that seasonal variability in climate and single season effects of diseases and pests can be eliminated statistically, no useful yield data can be obtained.

The productivity index model PI (Pierce *et al.*, 1983, 1984) estimates long-term effects of erosion on the productivity potential of soils considering changes in soil profile characteristics with depth. It can be used to examine the vulnerability or rate of productivity decline of a soil when subjected to simulated erosion. A vulnerable soil is one that quickly becomes less favourable to crop growth as superficial material is removed (Wilson *et al.*, 1991). The reason for that is assumed to be a change in the combination of soil properties leading in a change of the root microenvironment. The model incorporates factors for available water-holding capacity (AWC), soil reaction (pH) and bulk density (dB). PI does not take account of the loss of plant nutrients and organic matter by erosion. Models like PI are easier to validate because changes in soil properties can be monitored, although, again, some change extremely slowly and cannot be quantified in short-term studies.

The potential yield index model PYI (Craft *et al.*, 1985, 1992) is based on the soil's capacity to supply a favourable environment for root growth, nutrient and water uptake. The model considers particle size distribution, bulk density, available water capacity, phosphorus and potassium for each soil horizon. PYI is relatively simple, requires minimal data, and is responsive to climatic change, fertilizer inputs, crop rooting depth, and soil properties. The model has not been tested for severely eroded soils.

### OBJECTIVES OF THE PROJECT

- Selection of field experimental transects and catchment areas in Costa Rica, Mexico, and Nicaragua, stressing the influence of soil erosion and land use practice on soil productivity;
- Standardisation of field and laboratory methodology;
- Development, calibration and validation of an extended soil productivity-model (SOFIC) with special reference to application for selected watersheds of Central America;
- Testing, modification, and validation of the European Soil Erosion Model (EUROSEM) and its sensitivity analysis for tropical environments;
- Development of a Rainfall-Generator-model;
- Linkage of EUROSEM to SOFIC to produce the SPIES-model as a physically-based approach for modelling erosion - soil productivity relationships in Central America;
- Application of the SPIES-model on catchment scale in Central America using GIS.

### ACKNOWLEDGEMENTS

We should like to thank the European Community DGXII for the financial support of this project "Development and Application of Soil Productivity Index for Central America" (Contract ERBIC18CT960096).

### REFERENCES

- Blum, W.E.H. 1993. Sustainable land use. A holistic approach. Proceedings of the International Seminar on Managing Red and Lateritic Soils for Sustainable Agriculture. Extended Abstracts, Invitational Papers. Bangalore, India.

- Blum, W.E.H. 1994a. Sustainable land management with regard to socioeconomic and environmental soil functions. A holistic approach. pp. 115-124. *In*: Wood, R.C. and J. Dumanski (eds.). Proceedings of the International Workshop on Sustainable Land Management for the 21st Century. Plenary Papers. Vol. 2. The Organizing Committee. International Workshop on Sustainable Land Management. Agricultural Institute of Canada. Ottawa, Canada.
- Blum, W.E.H. 1994b. Sustainable land use for food production in the tropics and subtropics. A holistic approach. *J. für Entwicklungspolitik* X/3: 301-314.
- Blum, W.E.H. and A. Aguilar Santelises. 1994. A concept of sustainability and resilience based on soil functions: The role of the International Society of Soil Science in promoting sustainable land use. pp. 535-542. *In*: Greenland, D.J. and I. Szabolcs (eds.). Soil resilience and sustainable land use. CAB International. Wallingford, UK.
- Bocco, G., J. Palacio, and C.R. Valenzuela. 1990. Gully erosion modelling using GIS and geomorphologic knowledge. *ITC J.* 3: 253-261.
- Christensen, L.A. and D.E. McElyea. 1988. Toward a general method of estimating productivity-soil depth response relationships. *J. Soil Water Conserv.* 43-2: 199-202.
- Craft, E.M., S.A. Carlson, and R.M. Cruse. 1985. A model of erosion and subsequent fertilization impacts on soil productivity. pp. 143-151. *In*: ASAE. Erosion and Soil Productivity. ASAE publication 8/85.
- Craft, E.M., R.M. Cruse, and G.A. Miller. 1992. Soil erosion effects on corn yields assessed by potential yield index model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 878-883.
- Fetwi, F. 1993. The impact of erosion on soil productivity: Model development and validation with special reference to low input agriculture. Ph.D thesis. Institute of Technology, Cranfield University. Silsoe, UK.
- Garg, P.K. and A.R. Harrison. 1992. Land degradation and erosion risk analysis in S.E. Spain: A geographic information system approach. *Catena* 19-5: 411-425.
- Griffiths, J.S. and K.S. Richards. 1989. Application of a low-cost database to soil erosion and soil conservation studies in the Awash Basin, Ethiopia. *Land Degradation and Rehabilitation* 1-4: 241-262.
- Lal, R. 1988. Monitoring soil erosion's impact on crop productivity. pp. 187-200. *In*: Lal, R. (ed.). Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Service. Ankeny.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri, and M. Styczen. 1998a. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes* 23: 527-544.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri, M. Styczen, and A.J.V. Folly. 1998b. The European soil erosion model (EUROSEM): Documentation and user guide. Cranfield University. Silsoe, UK.
- Pierce, F.J., W.E. Larson, R.H. Dowdy, and W.A.P. Graham. 1983. Productivity of soils: Assessing long-term changes due to erosion. *J. Soil Water Conserv.* 38: 39-44.
- Pierce, F.J., R.H. Dowdy, W.E. Larson, and W.A.P. Graham. 1984. Soil productivity in the corn belt: Assessment of erosion's long-term effects. *J. Soil Water Conserv.* 39-2: 131-136.
- Rampazzo, N., W.E.H. Blum, and B. Wimmer. 1998. Assessment of soil structure parameters and functions in agricultural soils. *Die Bodenkultur. Austrian J. Agric. Res.* 49-2: 69-84.
- Schertz, D.L. 1983. The basis for soil loss tolerance. *J. Soil Water Conserv.* 38: 10-14.
- Stocking, M. 1984. Erosion and soil productivity: A review. FAO consultant's working paper 1. Soil Conservation Program, Land and Water Development Division. FAO. Rome, Italy.
- Stocking, M. and A. Pain. 1983. Soil life and the minimum soil depth for productive yields: Developing a new concept. Discussion paper 150. UEA School of Development Studies. Norwich, UK.
- Timlin, D.J., R.B. Bryant, V.A. Snyder, and R.J. Wagenet. 1986. Modelling corn grain yield in relation to soil erosion using a water budget approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 718-723.
- Weir, J.C. 1991. GIS education and training. pp. 491-497. *In*: Belward, A.S. and C.R. Valenzuela (eds.). Remote sensing and geographical information systems for resource management in developing countries. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- Williams, J.R. 1981. Soil erosion effects on soil productivity: A research perspective. *J. Soil Water Conserv.* 36: 82-90.
- Williams, J.R. and K.G. Renard. 1985. Assessment of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC). pp. 96-118. *In*: Follet, R.F. and B.A. Stewart (eds.). Soil erosion and crop productivity. American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Williams, J.R., K.G. Renard, and P.T. Dyke. 1983. EPIC - A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *J. Soil Water Conserv.* 38-5: 381-383.
- Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke. 1984. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transact. ASAE* 27-1: 129-144.
- Wilson, J.P., S.P. Sandor, and G.A. Nielsen. 1991. Productivity index model modified to estimate variability of Montana small grain yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 228-234.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. US Department of Agriculture. Washington, D.C.



# *SOFIC*

## A SOIL PRODUCTIVITY MODEL FOR COSTA RICA AND MEXICO BASED ON THE ESTIMATION OF MAIZE YIELD

N. Rampazzo<sup>1‡</sup>, A.R. Waldingbrett<sup>1</sup>, A. Mentler<sup>1</sup>, and W.E.H. Blum<sup>1</sup>

### SUMMARY

The mathematical model SOFIC (Soil Fertility Index Calculator) was developed within the "SPIES"-EU-Project (Soil Productivity Indexes for Central America and their Erosion Sensitivity) in order to assess the effect of soil erosion on soil productivity in Costa Rica and Mexico. Soil erosion was calculated through a modified European Soil Erosion Model (EUROSEM), which was adapted for Central American conditions. Since one main restriction was to create a model capable to run with a minimum of input data, a sole physically based model development process was not that promising. Though some parts of the model are not physically based, the whole model represents more than a simple empirical model or even a black box model. All calculations within the SOFIC model, like root or plant growth, are based upon physical processes or scientific studies. The new approach of the SOFIC model consists in the kind of method of knotting well-known single physically based processes. In iterative calculation steps, the sufficiency of the single processes was estimated by contrasting each other, as long as equilibrium between the increase of biomass and the availability of nutrients was reached. With such calculation it was possible to simulate accurately on a monthly basis. First results showed that the SOFIC model is capable to estimate reasonably the soil productivity with only the help of few input data of low temporal resolution.

*Index words:* *Zea mays L.*, modelling, soil erosion, corn yield.

<sup>1</sup> Institute of Soil Research, University of Agricultural Sciences. Gregor-Mendel-Strasse 33, A-1180 Vienna, Austria.

<sup>‡</sup> (nicola.rampazzo@boku.ac.at) y Autor responsable.

Recibido: Agosto de 2000. Aceptado: Noviembre de 2002.  
Publicado en Terra 21, Número Especial: 5-18.

### INTRODUCTION AND DEFINITION OF THE AIMS

The native productivity of soils is mainly the result of all pedological forming factors and genetic processes (mineralogical, physical, chemical, and biological). The effective suitability of soils for plant nutrition depends mostly on the soil structural state, which is rather unstable and susceptible to changes (Rampazzo *et al.*, 1998), particularly in the topsoil, where plant roots develop. Soil erosion, especially in areas under tropical climatic conditions, like Central America, severely reduces the natural function of soils for plant and food production.

Most of the existing models relating soil loss to soil productivity have been developed under conditions of high input agriculture (Williams, 1981), whereas the majority of farmers in Costa Rica and Mexico produce under low input conditions. Consequently, there is a big need for these countries for new approaches in the research of erosion-productivity interactions.

Present soil erosion-soil productivity models, such as EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Williams *et al.*, 1984), rely upon empirically based relationships and cannot therefore be easily transferred to agro-climatic conditions different from those for which they were developed.

The direct determination of the relationship between soil loss and yield seems to be a reasonable modelling approach for the erosion depending soil productivity (Lal, 1988). Fetwi (1993) roughly classified current erosion-productivity models as follows:

#### Physically-based Models

Physically-based-models offer on the one hand the possibility of application under a wide range of environmental frame conditions, but on the other hand the high number of indispensable input parameters limits their application.

EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator, Williams *et al.*, 1983, 1984; Williams and Renard,

1985) is known as one of the most comprehensive physically based erosion-productivity model, although its component of erosion, as based on relationships of the model USLE-model (Wischmeier and Smith, 1978), is more empiric.

Another model of this type is the SOIL-LIFE model (Stocking and Pain, 1983). It is a simple mathematical model developed to predict the life span of soils and describes the effect on productivity indirectly. It is designed to estimate the number of years a soil remains productive, but it is not able to describe the effect of erosion on yield and productivity.

### Empirical Models

Most empirical models implicate statistically derived functions which can be obtained relatively easily from available data. Their restriction is due to the fact that they usually are specific for the conditions where they were developed and may not be extrapolated without validation to other regions.

The Erosion-Productivity-Model EPROM and the Theoretical-Erosion-Productivity-Model THEPROM are simple empirical models which provide an approximation of the impact of soil erosion on future production, but without taking into account nutrient losses by erosion.

A YIELD-SOIL DEPTH model, worked out by Christensen and McElyea (1988), is a simple empirical regression model to describe the relationship between soil depth and yield. This model does not consider erosion processes and their effects and cannot be related to any parameter of soil loss or runoff.

The SOIL LOSS-YIELD model assumes that yield variation caused by erosion can be explained by the rate of soil loss.

The Soil-Erosion-Productivity-model SEP (Timlin, *et al.*, 1986) was developed to determine the effect of soil loss on maize yield. The model is designed to work for one crop and calculates the daily water budget for a given reduction in soil depth and it predicts yield.

### Classificatory Models

These models are based on assigning index values to individual soil parameters (Stocking, 1984) and combining them in multiplicative, additive or limiting-factor approaches to predict the effect of their

interaction. They could be defined as a subgroup of empirical models.

The Productivity-Index-model PI (Pierce *et al.*, 1983, 1984) estimates long-term effects of erosion on the potential productivity of soils considering changes in soil profile characteristics with depth. It can be used to examine the vulnerability or rate of productivity decline of a soil when subjected to simulated erosion (Wilson *et al.*, 1991).

The Potential-Yield-Index model (PYI) (Craft *et al.*, 1985, 1992) is based on the soil capacity to supply a favourable environment for root growth, nutrient and water uptake. PYI is a relatively simple model, requires minimal input data, and is responsive to climatic change, fertilizer application, crop rooting depth and soil properties.

The reason for developing a new model lays in the need of having a tool for determining soil productivity in Costa Rica and Mexico with only the help of a few input data of monthly or yearly resolution (Rampazzo and Blum, 2003). For the creation of the SOFIC-model, maize (*Zea mays* L.) was chosen as one of the main crops in Central America.

The goals of this work were to create a soil-productivity model based on the estimation of maize yield, which should be in principle a) a physically based model, b) a model capable of simulating hundreds of years, c) a model sensitive to the output of the EUROSEM-model (Morgan *et al.*, 1998a,b), and d) a model capable to run with a minimum of input data.

## MATERIALS AND METHODS

### Location of the Investigated Sites and Experimental Approach

For the improvement of the database and for the calibration of the SOFIC-model, experimental field transects were established in Costa Rica (Guachipelin, Llano Limon, Puriscal) and Mexico (Acozac I, Acozac II, Santa Catarina, Juchitepec). Each transect was a slope with four stages of erosion and soil thickness (A = top, B and C = middle, D = downhill), according to Figure 1.

The detailed explanation of the transects is given by Sancho *et al.* (2003) for Costa Rica and Aguilar (*†*) *et al.* (2003) for Mexico.

For a first validation of the SOFIC-model, a catchment area in Mexico (Coatlinchan), consisting of

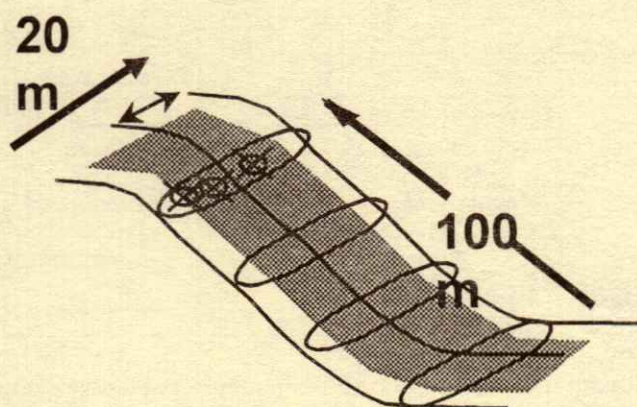


Figure 1. Experimental design of each field transect. A (top), B and C (middle), D (downhill).

55 points with each two soil depths (0-20 cm, 20-40 cm) was selected.

#### Description of the Investigated Soils

For each transect and each stage of erosion, soil profiles have been described as shown in Table 1 and Table 2 (Sancho *et al.*, 2003; Aguilar (†) *et al.*, 2003).

#### Soil Analyses and Database

For the calibration of the SOFIC-model, a database consisting all together of over 760 datasets from seven experimental field transects of Costa Rica and Mexico was created, containing soil descriptions, soil physical and chemical parameters, phenological plant parameters and crop yield, all taken in the years 1997 and 1998.

The methodology used for the investigation of soil and plant parameters is described in the Handbook of Methods for SPIES (Rampazzo *et al.*, 1997). Following parameters are contained in the database:

#### Soil physical parameters

- Soil texture
- Bulk density
- Particle density
- Total porosity
- Water at field capacity (FC)
- Water at permanent wilting point (PWP)
- Plant available water capacity (AWC)
- Pore size distribution
- Saturated hydraulic conductivity
- Moisture content
- Soil cohesion

#### Soil chemical parameters

- pH value
- Electric conductivity
- Total carbon (TC), total organic carbon (TOC)
- Total nitrogen (TN)
- Exchangeable cations and CEC
- Olsen-phosphorus
- Total biomass (litter bag method)

#### Plant parameters

- Plant density
- Canopy mean maximum height
- Plant biomass aboveground
- Ash content
- Leaf area index (LAI)
- Maize yield
- Percentage cover of cropped area
- Basal area of crop

**Meteorological parameters.** Temperature was measured in weather stations nearby each transect. The input data for solar radiation were taken from literature and were expected to be the same for all transects.

Table 1. Soil types of the Costa Rica transects according to USDA (1999).

Transect	Stage A	Stage B	Stage C	Stage D
Guachipelin	Andic Dystrustepts	Entic Udic Haplusterts	Udic Haplusterts	Typic Haplustands
Llano Limon	Andic Dystrustepts	Andic Dystrustepts	Typic Dystrustepts	Humic Haplustand
Puriscal	Typic Haplohumult	Typic Haplohumult	Typic Haplohumult	Typic Haplohumult

Table 2. Soil types of the Mexico transects according to USDA (1999).

Transect	stage A	stage B	Stage C	stage D
Juchitepec	Vitrandic eutropept	Vitrandic eutropept	Typic eutropept	Vitrandic eutropept
Acozac I	Typic ustropept	Typic ustropept	Fluventic ustropept	Typic ustropept
Acozac II	Lithic troporthent	Lithic troporthent	Lithic troporthent	Typic troporthent
Sta. Catarina	Lithic troporthent	Typic troporthent	Typic troporthent	Typic udorthents

### Specific Parameters for a Soil Productivity Model

**Temperature.** Temperature influences at a great extent the photosynthesis of plants. In general, C<sub>3</sub> plants assimilate better at lower temperatures (< 15 °C), whereas C<sub>4</sub> plants perform better at higher temperatures (> 25 °C). There are exceptions for this tendency depending on the genetic variety of the crop (Miedema, 1982).

**Leaf photosynthesis.** The initial (PLEI, measured at low temperature) and the maximum rate (PLMX) of leaf photosynthesis of maize are respectively 0.40 kg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> and 60 kg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (Penning de Vries *et al.*, 1989).

**Solar radiation.** Solar radiation is one of the main factors controlling the crop production by supplying the necessary energy for the conversion of water and carbon-dioxide into energy-rich organic compounds. The rate of photosynthesis increases almost linearly with light intensity, thus, when temperature and soil moisture are at optimum level, crop yields are generally higher during the dry than during the rainy season, when light intensity is much reduced.

Green leaves assimilate through solar radiation of 400-700 nm wavelength, often referred to as Photosynthetically Active Radiation (PAR). The ratio of PAR to total solar radiation is close to 0.5 in both the tropics and the temperate regions (Monteith, 1972) and represents a weighted mean between the fraction for direct radiation and diffuse sky radiation. The actual maximum radiation received at the earth surface ranges from about 40% of the solar constant in humid regions to nearly 80% in arid regions. The favourable light intensity range varies with the crop species. Maize utilises about 7-10% of the PAR for its growth (Fageria *et al.*, 1997).

**Nutrients.** Nitrogen, phosphorus and potassium available contents in soils are essential for any crop development and can be considered as basic input soil parameters of almost all soil productivity models. The

main mechanisms for nutrient supply to plant roots are mass flow, diffusion, and root interception.

**Plant root development of maize.** The rooted depth of a soil is defined as the depth from which the crop effectively extracts water and nutrients. A root density of 0.10 cm root length per cm<sup>3</sup> of soil volume can be considered as a low density limit. The simulation of rooted depth in models normally occurs independently from the growth of root mass. According to Anderson (1987), the most rapid root development in corn occurs eight weeks after planting. The depth of extension of roots in deep soils is a linear function of time until teaselling. From teaselling to the start of grain filling, brace roots develop (Larson and Hanway, 1977). During the rapid grain-filling storage, total root length and root dry weight do not increase and may decrease before grain matures (Mengel and Barber, 1974). The growth and configuration of the root system respond to soil water, temperature, air, nutrient, toxic elements, and soil resistance.

Jones (1991) used coarse fragments as a stress factor for root growth. Coarse fragments (2-250 mm diameter) reduce volumetric water holding capacity and nutrient availability in approximated proportion to their volumetric fraction in the layer. The effects of coarse subsoil horizons on rooting have been quantitatively evaluated in only a few studies (Babalola and Lal, 1977; Vine *et al.*, 1981). Results suggested that root proliferation in layers with varying fractions of coarse fragments is approximately proportional to the volumetric fraction of fine particles (< 2 mm).

**Aluminium toxicity.** Aluminium toxicity results in swollen, stubby roots and can limit root proliferation in some acid soil horizons. Even after liming of the topsoil, Al-toxicity in the subsoil can severely limit root growth. Several studies indicated the percentage of exchangeable Al as a good index for Al-toxicity. Because crops and cultivars vary in their response to Al-toxicity (Fageria, 1982), root growth models

should consider both the soil Al-saturation (ALS) and the crop sensitivity to Al-toxicity. Fageria *et al.* (1997) stated 20-30% exchangeable aluminium as a critical Al-saturation in Oxisols.

**Soil water.** Water availability is known as one of the main factors controlling crop production. Water stress causes reductions in both cell division and elongation, whereas excess of water in soil causes aeration problems. The available amount of water for plants (Available Water Capacity, AWC) is defined by most of the authors as the volumetric water content between the permanent wilting point (PWP) at 1.5 MPa tension and the field capacity (FC) at 0.03 MPa tension (Rampazzo *et al.*, 1997) and varies depending on particular soil physical and chemical characteristics, especially soil texture and content of organic matter.

## RESULTS AND DISCUSSION

### The SOFIC Model

The basic idea of the SOFIC-model consists in calculating the aboveground biomass of a maize and classifying it with an index between 0.0 (no maize growth possible) and 1.0 (optimal soil conditions for maize productivity), the so-called Soil Fertility Index (SOFI), (Waldingbrett, 2000).

For the calculation of SOFI, the potential growth rate for maize roots (Taylor and Klepper, 1978; Sibma, 1987) and the potential growth rate for the aboveground maize plant (Fageria *et al.*, 1997) were taken as a basis. These potential growth rates are reduced through the predominant local soil and climatic conditions, which are assessed with normalised terms in the range from 0.0 to 1.0. A value of 0.0 indicates an absolutely limiting level whereas a level of 1.0 indicates optimal conditions.

In a first step, the model user must indicate the beginning of the vegetation period. In the sequel, the duration of the vegetation period and the stages of biomass development are determined by the accumulation of thermal time (growing degree days), as described in the model CropSyst (Stöckle and Nelson, 1996). Root growth is calculated from emergence till grain filling (Mengel and Barber, 1974). Depending on the rooted soil volume, the plant available nutrients as nitrogen, potassium and phosphorus are estimated monthly and related to the monthly increase in biomass. The processes

considered for supply of nutrients to plant roots are mass flow, diffusion, and root interception.

The calculation of the overall nutrient index bases on biological concepts, such as Liebig or Mitscherlich Minimum Laws. For each plant nutrient an index between 0.0 and 1.0 is given.

Moreover, several studies showed that the enhancement of one nutrient can positively influence the uptake of other nutrients (Van Keulen and Van Heemst, 1982; Sumner and Farina, 1986; Kamprath, 1987). In the SOFIC-model, this detail is considered by introducing the so-called min-max compensation operator (Formula 9; Böhme, 1993). This operator determines the value of the overall nutrient index as given through the index of the nutrient which is in the minimum, but slightly increased according to the availability of the two other nutrients. The overall nutrient index leads together with the indices for absorbed light and temperature (effect on photosynthesis) to the aboveground biomass. As the index for absorbed light is dependent on the leaf area index, which is again calculated through the aboveground biomass, an iteration loop is necessary. A scheme of the iteration steps for calculating the aboveground biomass is given in Figure 2, the conceptual model of SOFIC is shown in Figure 3.

### Calculation Modules in the SOFIC-model (Waldingbrett, 2000)

**Input data.** The SOFIC-model can feature three soil layers, but at the current state of development only the A and B horizon (first and second layer) must be considered. For each layer, the soil physical parameters texture, dry bulk density, available water capacity and coarse fragments, and the soil chemical data cation exchange capacity, pH, exchangeable aluminium, total nitrogen, plant available phosphorus and potassium must be given. A listing of the required temporal resolution of these parameters is given in Table 3.

**Phenology.** The stages of development of maize are determined by the accumulation of thermal time (Growing Degree Days) as described in the model CropSyst (Stöckle and Nelson, 1996, Table 4). A crop enters the next stage of development when the thermal time reaches the thermal time requirement for the respective stage. The thermal time is computed with the following equation:

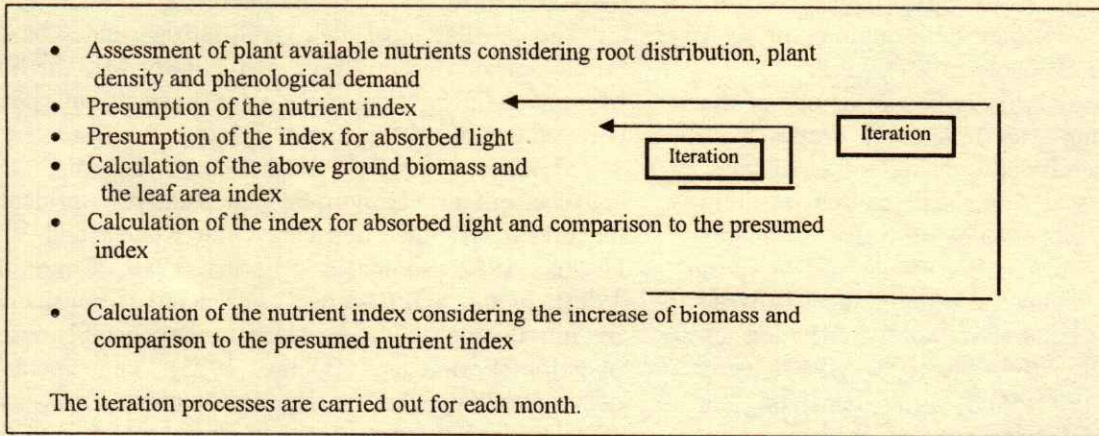


Figure 2. Scheme of iteration processes for the assessment of the aboveground biomass.

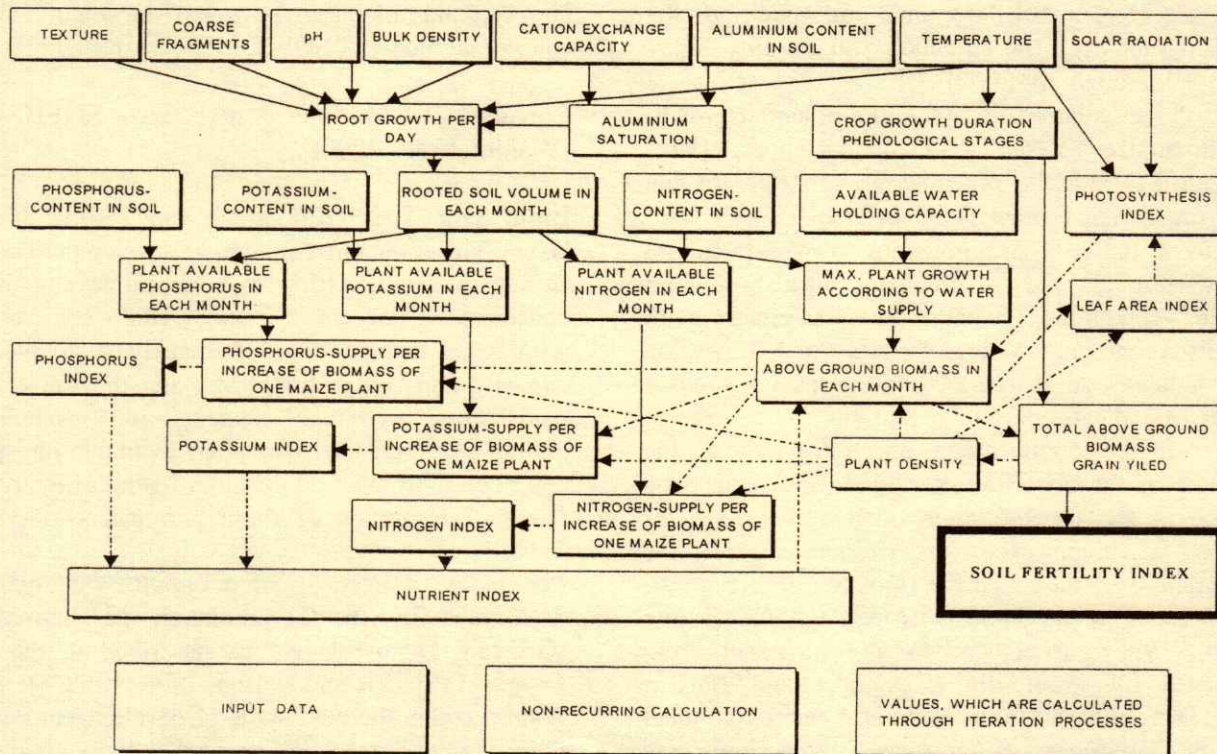


Figure 3. Conceptual model of SOFIC.

Table 3. Required temporal resolution of input data.

Parameter	Temporal resolution
Texture	Once a year, at the beginning of the vegetation period
Coarse fragments	Once a year, at the beginning of the vegetation period
pH	Once a year, at the beginning of the vegetation period
Cation exchange capacity	Once a year, at the beginning of the vegetation period
KCl and extractable aluminium	Once a year, at the beginning of the vegetation period
Phosphorus	Once a year, at the beginning of the vegetation period
Potassium	Once a year, at the beginning of the vegetation period
Total nitrogen	Once a year, at the beginning of the vegetation period
Available water capacity	Once a year, at the beginning of the vegetation period
Temperature	Monthly average of maximum and minimum
Solar radiation	Monthly average

$$GD_{day} = \bar{T} - T_{GDdaybase}$$

$$CDG_{day} = CDG_{day-1} + GD_{day}$$

$$\bar{T} = T_{GDdaybase} \quad (\text{when } \bar{T} < T_{GDdaybase})$$

$$\bar{T} = T_{cutoff} \quad (\text{when } \bar{T} > T_{cutoff})$$

$$\bar{T} = (T_{max} + T_{min})/2 \quad (\text{otherwise})$$

where:

- GD<sub>day</sub> (°C-days)      today's thermal time
- CGD<sub>day</sub> (°C-days)    today's accumulated thermal time since planting
- T<sub>GDdaybase</sub>, T<sub>cutoff</sub>    crop input parameters that define the range of temperatures for viable development
- T<sub>min</sub>(°C)                daily minimum air temperature
- T<sub>max</sub> (°C)                daily maximum air temperature

As the productivity index in the SOFIC-model is calculated on a monthly basis, only the phenological stages emergence, grain filling, and maturity are considered.

Table 4. Base temperature, cut-off temperature, and growing degree days for different stages of development for maize (Stöckle and Nelson, 1996).

	Accumulated thermal time
Base temperature	8
Cutoff temperature	25
Emergence	240
Tuber initiation	1000
Begin flower	1040
Peak LAI	1020
Begin grain filling	1124
Leaf duration	850
Begin maturity	1711

**Rooting depth and rooted volume of the soil.** Root growth is calculated from emergence till grain filling (Mengel and Barber, 1974). Potential rooting depth is fixed with 1.4 m and potential root growth per day is assumed to be 0.06 m d<sup>-1</sup> (Taylor and Klepper, 1978; Sibma, 1987). It is decreased by coarse fragments, aluminium toxicity, unfavourable soil pH, low temperature and high bulk density (in dependence of texture). For each of these impediments a factor between 0.0 and 1.0 is introduced. The actual root growth per day is calculated as follows:

$$Root\ growth_{act}[m\ day^{-1}] = 0.06 * Index_{CF} * Index_{Al} * Index_{pH} * Index_{BD} * Index_{Temp} \quad \text{Formula 1}$$

**Index for coarse fragments.** The relative effect of coarse fragments in a soil layer (Index<sub>CF</sub>) on root growth is calculated as

$$Index_{CF} = 1.0 - ROK \quad \text{Formula 2}$$

where: ROK is the volume fraction of particles > 2 mm diameter.

**Index for aluminium toxicity.** Aluminium saturation (AIS) is calculated as KCl-extractable aluminium divided by effective cation exchange capacity (CEC). The CEC is calculated as the sum of NH<sub>4</sub>OAC-extracted bases (SMB) plus exchangeable Al (EAl), (USDA, 1996).

Jones (1991) calculated the stress factor for aluminium saturation as:

$$Index_{Al} = \frac{AIX - AIS}{AIX - AIA} \quad \text{for } AIA \leq AIS \leq AIX$$

Formula 3

$AIS > AIX \rightarrow Index_{AI} = 0$   
 $AIS < AIA \rightarrow Index_{AI} = 1$

where: AIA and AIX are the threshold values of AI saturation at which root growth is first affected (AIA) and totally inhibited (AIX), respectively. In the SOFIC-model, AIA is fixed with 0.2 and AIX with 0.8.

**Index for temperature on root growth.** The influence of temperature on root growth is well documented (Glinski and Lipiec, 1990; Bollero *et al.*, 1996). The formula used in the SOFIC-model runs as follows (see also Figure 4):

$$Index_{Temp} = 1 - \exp(-Temp^{4.2}/400000) \quad \text{Formula 4}$$

where: Temp is the average temperature.

**Index for dry bulk density.** The index for dry bulk density is calculated after a procedure, which is used in the model EPIMLIA (Fetwi, 1993, after Pierce *et al.*, 1983), see Table 5.

**Rooting depth**

$$Rooting\ depth = \sum^m ndays * Root\ growth [mday^{-1}]$$

where: *ndays* is the number of days of root growth in the month *m*.

**Rooted volume of the soil.** Roots are supposed to grow vertically and horizontally in the soil. It is assumed that horizontal root growth is the half of vertical root growth. If there are values from field experiments, this ratio can be changed. For each layer the rooted volume is calculated as follows (see Figure 5):

$$V = \frac{T * \Pi}{3} * (r_1^2 + r_2^2 + 2 * r_1 * r_2)$$

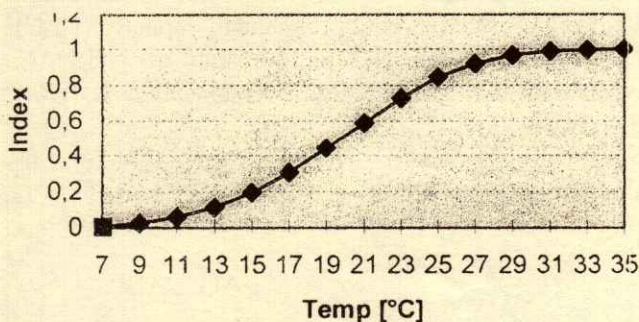


Figure 4. Temperature Index for root growth as used in the SOFIC-model.

Table 5. Limiting, critical and non-limiting bulk density for root penetration for different texture classes.

Textural class	Bulk density for root penetration		
	Limiting	Critical	Non-limiting
	----- Mg m <sup>-3</sup> -----		
Sand, loamy sand	1.85	1.70	1.61
Sandy loam	1.85	1.63	1.51
Silty loam	1.78	1.68	1.47
Silt	1.79	1.68	1.44
Silty-clayey loam	1.65	1.55	1.36
Clayey loam	1.58	1.49	1.40
Sandy clay	1.58	1.49	1.40
Clay, silty-clay	1.47	1.39	1.30

The whole rooted volume amounts to:

$$V_{ges} = V_{layer1} + V_{layer2} + V_{layer3}$$

**Calculation of aboveground biomass.** The aboveground biomass is calculated for each month in the vegetation period as follows:

$$Biomass_i [gm^{-2}] = \min(Growth_{pot}, Index_{Nutrients_i} * Index_{AbsLi} * Index_{Ti} * n * 5) * ndays_{ii} \quad \text{Formula 5}$$

where:

- $Growth_{pot}$  maximum crop growth rate per day
- $Index_{Nutrients}$  Index for efficiency of nutrient supply (between 0 and 1)
- $Index_{AbsLi}$  Index for the effect of absorbed light on photosynthesis in month *i* (between 0 and 1)
- $Index_{Ti}$  Index for the effect of temperature on photosynthesis in month *i* (between 0 and 1)
- n* number of plants m<sup>-2</sup>
- 5 factor 5 effects, that at least 10 plants m<sup>-2</sup> must be planted, to reach the approximate maximum crop growth rate of 52 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (5 g m<sup>-2</sup>\*10 plants = 50 g m<sup>-2</sup>)
- $ndays_i$  number of days in month *i*

The maximum crop growth rate per day ( $Growth_{pot}$ ) is calculated as follows, see also Table 6:

$$Growth_{pot} [g\ m^{-2} * day] = \frac{rooted\ volume [m^3\ m^{-2}] * AWC [m^3\ m^{-3}] * 200}{\quad} \quad \text{Formula 6}$$

As the maximum rooting depth is fixed with 1.40 m, the maximal rooted volume is 1.40 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup>. In the case



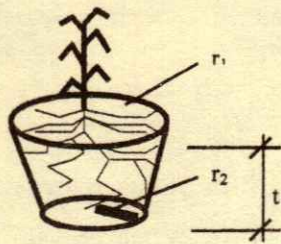


Figure 5. Schematic design for the calculation of rooted volume.

of a entirely rooted soil with an available water capacity of 0.20, the potential crop growth rate per day results to 56 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. This is similar to the maximum crop growth rates of 52 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> for maize as reported by Wright and Lemon (1966) and Williams *et al.* (1968).

**Index Nutrients.** The transport of soil solution to the vicinity of roots is the first step in the process of nutrient absorption by plants. In the soil system, nutrients move to plant roots by mass flow, diffusion, and root interception. The SOFIC-model considers the plant availability of the macronutrients nitrogen, phosphorus and potassium.

Available N, P, K for the roots of a single plant are calculated in the following manner:

$$\text{Nitrogen: } N_i = N_{toti} * \frac{0.21}{fd} * V_i + N_{toti} * \frac{t_i}{n} * 0.79$$

Formula 7a

$$\text{Phosphorus: } P_i = P_{olsi} * \frac{1.90}{fd2} * V_i + P_{olsi} * \frac{t_i}{n} * 0.05$$

Formula 7b

$$\text{Potassium: } K_i = K_{exchi} * \frac{0.82}{fd} * V_i + K_{exchi} * \frac{t_i}{n} * 0.18$$

Formula 7c

where:

- $f_d$  factor for plant density =  $\max(V_i * n) / (t_i * 1 \text{ m}^2), 1$
- $f_{d2}$  factor for plant density =  $\max(V_i * n) / (t_i * 1 \text{ m}^2), 2$
- $V_i$  rooted volume of one plant in layer i
- $t_i$  rooted depth in layer i
- $n$  number of plants m<sup>-2</sup>

In the terms  $f_d, f_{d2}$  of the formulas for available N, P, and K an area of one square meter is considered for the calculation of the nutrient supply (Figure 6).

The first part of the Equations 7a, 7b, 7c ( $Nutrient_i * c/f_d * V_i$ ) describes the amount of the nutrient, which is available through diffusion and root interception. A factor for plant density ( $f_d$ ) is taken into account, because roots of side by side standing plants compete with one another (Gregory, 1988). This factor reduces only the part of diffusion and root interception of nutrient supply, because the plant roots are in competition for immobile nutrients. For P, which is almost immobile, it is assumed, that root density has to be very high for reaching the entire fraction of available P in the rooted zone.

The second part of the Equations 7a, 7b, 7c ( $Nutrient_i * t_i/n * c$ ) describes nutrient concentrations through mass flow from outside of the rooted zone. Mobile nutrients like N are assumed to be replaceable within each layer, hence no factor for competition is taken into account.

Karlen *et al.* (1988) described dry matter accumulation for corn in South Carolina, showing aerial N, K and P accumulation. An analysis of these data showed that the phosphorus demand was growing linearly ( $R^2 = 0.95$ ) in relation to K and N. In SOFIC, for each available nutrient (N, P, and K) a nutrient index between 0 and 1 is calculated after

$$\text{Index} = \max [0.1 - \exp (a * \text{nutrient} - b)] \quad \text{Formula 8a}$$

These formulas are common in literature to describe relationships between soil nutrients or fertilizer application, respectively, and crop yield or nutrient availability, respectively (Cox and Uribe, 1992; Muchow and Sinclair, 1995). In the SOFIC-model, the biomass is calculated for a single plant,

Table 6. Examples for potential growth of maize ( $Growth_{pot}$ ) for different stages of root development and soils with different available water capacity (AWC).

Rooted volume	AWC	$Growth_{pot}$
m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
1,4 (maximum)	0,2	56
1,4 (maximum)	0,1	28
1	0,2	40
1	0,1	20
0,5	0,2	20
0,5	0,1	10
0,1	0,2	4
0,1	0,1	2

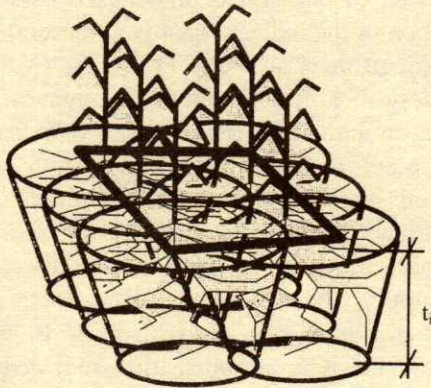


Figure 6. Schematic design for the calculation of available nutrients N, P, K.

assuming that each soil nutrient status has its optimal planting density. Therefore, the nutrient index is calculated in relation to the daily weight increase per plant. Formula 8a is modified as follows:

$$Index = \max \left[ 0.1 - \exp \left( a * \frac{\text{nutrient}}{\text{growth}_{\text{new}}} - b \right) \right]$$

Formula 8b

The calibration of the model resulted in the following coefficients:

Potassium:	$a = -35$	$b = 0.4$
Phosphorus:	$a = -1200$	$b = 5.0$
Nitrogen:	$a = -15000$	$b = 1.0$

There are many documented examples where the enhancement of one nutrient can positively influence the uptake of other nutrients (Van Keulen and Van Heemst, 1982; Sumner and Farina, 1986; Kamprath, 1987; Smaling and Janssen, 1993).

In the SOFIC-model, the introduction of the so-called min-max compensation operator  $k$  is exactly describing the above mentioned interaction. This operator is a tool from fuzzy logic (Böhme, 1993) and runs as follows:

$$K_y(m,n) = \min(m,n)^{(1-y)} * \max(m,n)^y$$

Formula 9

The nutrient index is calculated with a modified form of the min-max compensation operator:

$$Index_{\text{Nutrients}} = \min(I_N, I_K, I_P) (1-y) * \frac{(I_N + I_K + I_P - \min(I_N, I_K, I_P))}{2} y$$

Formula 10

$$I_N = Index_N = f(N_{\text{tot}}/\text{new growth})$$

$$I_K = Index_K = f(K_{\text{exch}}/\text{new growth})$$

$$I_P = Index_P = f(P_{\text{ols}}/\text{new growth})$$

where:  $y$  = value between 0 and 1.

A  $y$ -value of 0.0 results in a nutrient index which is equal to the minimum of  $I_N$ ,  $I_P$  and  $I_K$ . An increase of  $y$  produces a higher index, reaching the maximum of  $I_N$ ,  $I_P$ ,  $I_K$  by a  $y$ -value of 1.0. In the SOFIC-model,  $y$  is fixed with 0.1, which results in a slightly higher index than the index of the nutrient, which is in the minimum.

**IndexT.** For calculating the photosynthesis index, the daylight averaged temperature is used. The sine-exponential time course results in the following expression for  $T_{\text{day}}$  (Goudriaan and Van Laar, 1994):

$$T_{\text{day}} = 0.71 * T_{\text{max}} + 0.29 T_{\text{min}}$$

Formula 11

The rate of leaf photosynthesis to the maximum rate is calculated after Penning de Vries *et al.* (1989). Values between the given temperatures are interpolated linearly (Table 7).

**Index<sub>AbsL</sub>.** The percentage of intercepted radiation is derived from the equation (Goudriaan and Van Laar, 1994):

$$f = 1 - \exp(-K * LAI)$$

Formula 12

where:

$K$  value = dependent on the type of light, the leaf position and the leaf characteristics.  $K$  is about 0.4-0.7 for maize (Monteith, 1972).

$LAI$  = leaf area index [ $\text{m}^2(\text{leaf}) \text{m}^{-2}(\text{ground})$ ].

Table 7. Rate of leaf photosynthesis in percent of the maximum rate for maize as a function of temperature (Penning de Vries *et al.*, 1989).

Temperature (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Rate of %	1	1	10	50	80	100	100	100	90	75	7	0	0

Table 8. Mid-monthly intensity of solar radiation on a horizontal surface for the northern hemisphere (assuming 12 daylight throughout), modified after Yayock *et al.* (1988).

Temperature	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Mean
	----- Watt m <sup>-2</sup> -----												
0 °C	882	913	926	895	846	816	821	865	907	913	889	871	879
10 °C	779	846	901	826	913	901	901	913	907	859	798	755	867
20 °C	657	749	846	826	956	962	956	932	877	785	682	627	830

Table 9. Number of plants per square meter as calculated by the SOFIC-model in dependence of aboveground biomass of maize (kg ha<sup>-1</sup>).

Biomass (kg ha <sup>-1</sup> )	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	15000	17000	19000
	----- n m <sup>-2</sup> -----									
	2.1	2.9	3.7	4.5	5.3	6.1	7.0	7.8	8.6	9.4

The Photosynthetic Active solar Radiation (PAR), see Table 8, follows from:

$$PAR = SR * 0.5 \quad \text{Formula 13}$$

where: *SR* = solar radiation

The intercepted PAR is given by:

$$PAR_i = PAR * f \quad \text{Formula 14}$$

The response curve of leaf photosynthesis *versus* absorbed light can be described as an exponential curve that relates the rate of gross photosynthesis (PL, kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) to the intensity of absorbed radiation (PAR, J m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) (Penning de Vries *et al.*, 1989). The exponential curve that fits best with most of the observations (Goudriaan, 1982) is:

$$PL = PLMX * (1.0 - EXP (- PLEI * PAR/PLMX)) \quad \text{Formula 15}$$

where:

PL = gross photosynthesis in kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>

PLMX = rate of photosynthesis at saturated light intensity in kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>

PLEI = rate of photosynthesis at the beginning of radiation in kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>

PAR = Photosynthetic Active solar Radiation as described above.

The initial efficiency of the use of absorbed light characterizes, in particular, the biophysical processes and has a fairly constant value. The maximum rate depends strongly on plant properties and environmental conditions and particularly reflects

biochemical processes and physiological conditions of plants.

**Plant density.** To make simulations over decades in consideration of soil erosion possible, the plant density is calculated automatically (Table 9). The number of plants per square meter is calculated after:

$$n = (biomass + 4033) / 2450 \quad \text{Formula 16}$$

**Soil fertility index (SOFI).** The soil fertility index (SOFI) is a linear function of the calculated aboveground biomass of maize:

$$SOFI = Min ( 1, (Aboveground biomass / 20000)) \quad \text{Formula 17}$$

The SOFI is an indicator for the fertility of soils under the respective climatic conditions (radiation, temperature), which cannot be influenced easily. It is calculated for soils with average water conditions. Precipitation is not considered, because water supply can be given through irrigation (Table 10).

As shown in Table 11, a correlation of  $\sigma = 0.86$  between calculated and measured aboveground biomass of maize could be stated. The average deviation amounts to 1571 kg ha<sup>-1</sup> per calculated biomass production. Greater differences, especially in Santa Catarina (Mexico) transects were due to the very low precipitation in the year 1997, caused by the meteorological phenomenon El Niño. The transect Puriscal (Costa Rica), which was severely affected by high aluminium concentration in the soil, could be simulated very well. Also the simulations in shallow soils showed very good results, as for example the

**Table 10. Soil fertility indices classification by the SOFIC-model.**

SOFI <sup>†</sup>	Classification
0	Worst conditions; no plant growth possible
0.2	Bad conditions; plant growth is possible; modest yield; in shallow soils a regular supply with water is necessary for obtaining a yield at all
0.4	Medium soil conditions; in shallow soils a regular supply with water is necessary for obtaining a corresponding yield
0.6	Good soil conditions; good water conditions are necessary for obtaining a corresponding yield
0.8	Very good soil conditions; very good water conditions are necessary for obtaining a corresponding yield
1.0	Best soil conditions; optimal water conditions are necessary for obtaining a corresponding yield

<sup>†</sup> Soil fertility index.

calculations of the transect Acozac (Mexico), stage A and B, where root penetration was impeded through hard pan horizons.

For validation, the SOFIC-model was run with input data from the field transect Coatlinchan (Mexico). The calculated amounts of biomass showed good correlation with the measured biomass (Table 12).

## CONCLUSIONS

First results suggested that the SOFIC model has the potential for estimating a soil productivity index only with a few input data with low temporal resolution. Simulated amounts of aboveground biomass ranged over a wide span from 124 kg ha<sup>-1</sup> to 14030 kg ha<sup>-1</sup>. The SOFIC-model proved to be sensitive against aluminium toxicity, shallow soils and low nutrient supply and seems therefore to be an appropriate tool for estimating the influence of soil erosion on maize yield, as expressed through a productivity index. Nevertheless, the SOFIC-model needs further test across a wide range of sites to verify the good results from only a limited number of present applications.

**Table 11. Calculated and measured biomass of maize in the experimental field transects used for calibration of the SOFIC-model and soil fertility index (SOFI).**

Transect	Stage	Country	Soil	Biomass		SOFI
				calculated	measured	
				----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
Acozac 1	A	Mexico	Inceptisol	7457	7609	0,37
Acozac 1	B	Mexico	Inceptisol	7854	8073	0,39
Acozac 1	C	Mexico	Inceptisol	7389	9837	0,37
Acozac 1	D	Mexico	Inceptisol	10238	11626	0,51
Acozac 2	A	Mexico	Inceptisol	125	0	0,01
Acozac 2	B	Mexico	Inceptisol	187	0	0,01
Acozac 2	C	Mexico	Inceptisol	4675	5902	0,23
Acozac 2	D	Mexico	Inceptisol	5371	5244	0,27
Santa Catarina	A	Mexico	Entisol	4311	2050	0,22
Santa Catarina	B	Mexico	Entisol	7080	3025	0,35
Santa Catarina	C	Mexico	Entisol	7684	3650	0,38
Santa Catarina	D	Mexico	Entisol	7229	3300	0,36
Juchitepec	A	Costa R.	Inceptisol	11096	11604	0,55
Juchitepec	B	Costa R.	Inceptisol	10977	6571	0,55
Juchitepec	C	Costa R.	Inceptisol	11652	14373	0,58
Juchitepec	D	Costa R.	Inceptisol	14030	13780	0,70
Guachipelin	A	Costa R.	Andosol	7142	5928	0,35
Guachipelin	B	Costa R.	Andosol	4707	7914	0,24
Guachipelin	C	Costa R.	Andosol	7641	8489	0,38
Guachipelin	D	Costa R.	Andosol	6428	8833	0,32
Llano limon	A	Costa R.	Andosol	3641	1713	0,18
Llano limon	B	Costa R.	Andosol	2667	2786	0,13
Llano limon	C	Costa R.	Andosol	1797	4237	0,09
Llano limon	D	Costa R.	Andosol	3876	4013	0,19
Puriscal	A	Costa R.	Acrisol	4014	1920	0,20
Puriscal	B	Costa R.	Acrisol	1261	80	0,06
Puriscal	C	Costa R.	Acrisol	259	8	0,01
Puriscal	D	Costa R.	Acrisol	2196	2331	0,11

Table 12. Calculated and measured biomass of maize in the experimental field transect of Mexico used for validation of the SOFIC-model and soil fertility index (SOFI).

Transect	Stage	Country	Soil	Biomass		SOFI
				calculated	measured	
				----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
Coatlinchan	A	Mexico	Mollisol	7254	9660	0,33
Coatlinchan	B	Mexico	Mollisol	7078	7796	0,32
Coatlinchan	C	Mexico	Mollisol	5672	6789	0,30
Coatlinchan	D	Mexico	Mollisol	7514	9841	0,35

## ACKNOWLEDGMENTS

We should like to thank the European Community DGXII for the financial support of this project "Development and Application of Soil Productivity Index for Central America" (Contract ERBIC18CT960096).

## REFERENCES

- Aguilar, A., J.F. Tah I., A. Torres E., G. Arévalo G., and J.A. Rey C. 2003. Producción de maíz en suelos de pendiente compleja de México. Terra 21 Número Especial: 55-64.
- Anderson, E.A. 1987. Corn root growth and distribution as influenced by tillage and nitrogen fertilization. *Agron. J.* 79: 544-549.
- Babalola, O. and R. Lal. 1977. Subsoil gravel horizon and maize root growth: 1. Gravel concentrations and bulk density effects. *Plant Soil* 46: 337-347.
- Böhme, G. 1993. Fuzzy-Logik: Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Bollero, G.A., D.G. Bullock, and S.E. Hollinger. 1996. Soil temperature and planting date effects on corn yield, leaf area, and plant development. *Agron. J.* 88: 385-390.
- Christensen, L.A. and D.E. McElyea. 1988. Toward a general method of estimating productivity-soil depth response relationships. *J. Soil Water Conserv.* 43: 199-202.
- Cox, F.R. and E. Uribe. 1992. Potassium in two humid tropical Ultisols under a corn and soybean cropping systems. I. Management. *Agron. J.* 84: 480-484.
- Craft, E.M., S.A. Carlson, and R.M. Cruse. 1985. A model of erosion and subsequent fertilization impacts on soil productivity. In: ASAE. Erosion and Soil Productivity. ASAE publication 8/85: 143-151.
- Craft, E.M., R.M. Cruse, and G.A. Miller. 1992. Soil erosion effects on corn yields assessed by Potential Yield Index Model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 878-883.
- Fageria, N.K. 1982. Differential aluminum tolerance of rice cultivars in nutrients solution. *Agropec. Bras. Brasilia* 17: 1-9.
- Fageria, N., V.C. Baligar, and C.A. Jones. 1997. Growth and mineral nutrition of field crops. Marcel Dekker, New York.
- Fetwi, G.F. 1993. The impact of erosion on soil productivity: Model development and validation with special reference to low input agriculture. Ph.D Thesis. Institute of Technology, Cranfield University, Silsoe, UK.
- Glinski, J. and J. Lipiec. 1990. Soil physical conditions and plant roots. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Goudriaan, J. 1982. Potential production processes. pp. 98-113. In: Penning de Vries, F.W.T. and H.H. van Laar (eds.). Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Goudriaan, J. and H. van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Gregory, P.J. 1988. Growth and functioning of plants. pp. 113-168. In: Wild, A. (ed.). Russel's soil conditions and plant growth. Longman, Edinburgh, England.
- Jones, A. 1991. Simulation of root growth. Modeling plant and soil systems-agronomy Monograph 31. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Kamprath, E.J. 1987. Enhanced phosphorus status of maize resulting from nitrogen fertilization of high phosphorus soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1522-1526.
- Karlen, D.L., R.L. Flannery, and E.J. Sadler. 1988. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. *Agron. J.* 80: 232-242.
- Lal, R. 1988. Monitoring soil erosion's impact on crop productivity. pp. 187-200. In: Lal, R. (ed.). Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA.
- Larson, W.E. and H.H. Hanway. 1977. Corn production. pp. 625-669. In: Sprague, G.F. (ed.). Corn and corn improvement. Monograph 18. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Mengel, D.B. and S.A. Barber. 1974. Development and distribution of the corn root system under field conditions. *Agron. J.* 66: 341-344.
- Miedema, P. 1982. The effect of low temperature on *Zea mays*. *Adv. Agron.* 35: 93-128.
- Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9: 747-766.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D.T.M. Styczen. 1998a. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes* 23: 527-544.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D.T.M. Styczen, and A.J.V. Folly. 1998b. The European soil erosion model (EUROSEM): Documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University, Silsoe, UK.
- Muchow, R.C. and T.R. Sinclair. 1995. Effect of nitrogen supply on maize yield: II. Field and model analysis. *Agron. J.* 87: 642-648.

- Penning De Vries, F.W.T., D.M. Jansen, H.F.M. ten Berge, and A. Bakema. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Pudoc. Wageningen, The Netherlands.
- Pierce, F.J., W.E. Larson, R.H. Dowdy, and W.A.P. Graham. 1983. Productivity of soils: Assessing long term changes due to erosion. *J. Soil Water Conserv.* 38: 39-44.
- Pierce, F.J., R.H. Dowdy, W.E. Larson, and W.A.P. Graham. 1984. Soil productivity in the corn belt: Assessment of erosion's long-term effects. *J. Soil Water Conserv.* 39: 131-136.
- Rampazzo, N. and W.E.H. Blum. 2003. Development and application of a Soil Productivity Index for Central America and its erosion sensitivity: An introduction. *Terra 21 Número Especial*: 1-4.
- Rampazzo, N., A. Mentler, and J. Quinton. 1997. Handbook of methods. Project INCO-DC Nr.: IC-CT96-0096. Commission of the European Community. Institute of Soil Science, University of Agricultural Sciences, Vienna, Austria.
- Rampazzo, N., W.E.H. Blum, and B. Wimmer. 1998. Assessment of soil structure parameters and functions in agricultural soils. *Die Bodenkultur. Austrian Agric. Res.* 49/2: 69-84.
- Sancho, F., N. Rampazzo, A. Mentler, and M. Villatoro. 2003. Producción de maíz en suelos de pendiente compleja de Costa Rica. *Terra 21 Número Especial*: 29-39.
- Sibma, L. 1989. Ontwikkeling en groei van mais (*Zea mays* L.) onder Nederlandse omstandigheden. In: Penning de Vries, F.W.T., D.M. Jansen, H.F.M. ten Berge and A. Bakema. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Pudoc. Wageningen, The Netherlands.
- Smaling, E.M.A. and B.H. Janssen. 1993. Calibration of QUEFTS, a model predicting nutrient uptake and yields from chemical soil fertility indices. *Geoderma* 59: 21-44.
- Stocking, M. 1984. Erosion and soil productivity: A review. FAO consultant's working paper 1. Soil Conservation Programme. FAO, Land and Water Development Division. Rome, Italy.
- Stocking, M. and A. Pain. 1983. Soil life and the minimum soil depth for productive yields: Developing a new concept. Discussion paper 150. UEA School of Development Studies. Norwich, UK.
- Stöckle, C.O. and R. Nelson. 1996. CropSyst (Cropping Systems Simulation Model) - User's manual. Version 1.08. Washington State University, Biological Systems Engineering Department. Loaded from Internet.
- Sumner, M.E. and M.P.W. Farina. 1986. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 5: 201-236.
- Taylor, H.M. and B. Klepper. 1978. The role of rooting characteristics in the supply of water to plants. *Adv. Agron.* 30: 99-128.
- Timlin, D.J., R.B. Bryant, V.A. Snyder, and R.J. Wagenet. 1986. Modelling corn grain yield in relation to soil erosion using a water budget approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 718-723.
- USDA. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service. 1996. Soil Survey Laboratory Method Manual. Soil Survey Investigations Reports 42, Version 3.0. National Soil Survey Center. Washington, D.C.
- USDA. United States Department of Agriculture. 1999. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Handbook 436. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C.
- Van Keulen, H. and H.D.J. van Heemst. 1982. Crop response to the supply of macronutrients. *Agric. Res. Rep.* 916. PUDOC-DLO. Wageningen, The Netherlands.
- Vine, P.N., R. Lal, and D. Payne. 1981. The influence of sands and gravels on root growth of maize seedlings. *Soil Sci.* 131: 124-129.
- Waldingbrett, A.R. 2000. Soil Fertility Index Calculator (SOFIC): A model for assessing soil productivity based on the estimation of maize yield. Ph.D. thesis. Institute for Soil Research, University of Agricultural Sciences, Vienna, Austria.
- Williams, J.R. 1981. Soil erosion effects on soil productivity: A research perspective. *J. Soil Water Conserv.* 36: 82-90.
- Williams, J.R. and K.G. Renard. 1985. Assessment of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC). pp. 96-118. In: Follet, R.F. and B.A. Stewart (eds.). Soil erosion and crop productivity. American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Williams, W.A., R.S. Loomis, W.G. Duncan, A. Dovrat, and F. Nunce. 1968. Canopy architecture at various population densities and the growth and grain yield of corn. *Crop Sci.* 8: 303-308.
- Williams, J.R., K.G. Renard, and P.T. Dyke. 1983. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *J. Soil Water Conserv.* 38: 381-383.
- Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke. 1984. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transact. ASAE* 27: 129-144.
- Wilson, J.P., S.P. Sandor, and G.A. Nielsen. 1991. Productivity Index model modified to estimate variability of Montana small grain yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 228-234.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *Agriculture Handbook* 537. US Department of Agriculture. Washington, D.C.
- Wright, J.L. and E.R. Lemon. 1966. Photosynthesis under field conditions. IX. Vertical distribution of photosynthesis within a corn crop. *Agron. J.* 58: 265-269.
- Yayock, J.Y., G. Lombin, and J.J. Owunubi. 1988. Crop science and production in warm climates. Maxwell Intermediate Agriculture Series. O.C. Onazi (General auditor). London and Basingstoke.

# DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE LLUVIAS PARA LA INTRODUCCIÓN DE DATOS EN EL MODELO EUROSEM

## Design for Storm Input for the EUROSEM Model

Peter Strauss<sup>1</sup>, Freddy Sancho<sup>2</sup>, Christian Prat<sup>3</sup> y Gustavo Arévalo<sup>4</sup>

### RESUMEN

El estudio de la erosión se topa con el costo que representa su seguimiento, con la representatividad y con la duración en general corta de los experimentos. Por eso, se desarrollaron modelos como el Modelo Europeo de Erosión de Suelos (EUROSEM) que predice los efectos de la erosión de suelos a escala de una cuenca. Uno de los problemas para hacer andar este tipo de modelos hidrológicos es muchas veces la ausencia de las características de las lluvias basadas sobre una escala temporal fina (minutos) y no larga (días, horas). Por eso, se desarrolló un modelo de diseño de tormentas que genera los datos de lluvia faltantes necesarios a EUROSEM. Para comprobar la validez de tal modelo, primero, se compararon las características de las lluvias medidas en dos estaciones meteorológicas en Costa Rica y México con las obtenidas con el modelo de generación de tormenta. En una segunda etapa, se averiguó si las cantidades de suelo erosionado calculadas con EUROSEM para dos cuencas con base en datos arbitrarios de pérdidas de suelos y de lluvias registradas eran las mismas que las calculadas con base en los mismos datos arbitrarios de pérdidas de suelo, pero con las lluvias generadas por el modelo de diseño de tormentas. Los resultados mostraron que a pesar de tener en Costa-Rica y en México, lluvias con características muy diferentes, el modelo de diseño de tormentas era válido en ambas situaciones. Luego, se mostró que estos datos de lluvias reales o modelados

utilizados en EUROSEM conducían a las mismas estimaciones de erosión para ambas cuencas. Entonces, se puede considerar que el modelo de diseño de tormenta propuesto aquí puede servir para generar las características de las lluvias necesarias para el funcionamiento del modelo EUROSEM que simula la erosión de suelos a largo plazo.

*Palabras clave:* Modelación de lluvias, características de lluvias.

### SUMMARY

To obtain reliable results for field studies of soil erosion by water, much time and money is needed. This is the main reason that models such as the European Soil Erosion Model (EUROSEM) have been developed. One major problem for the use of EUROSEM in long-term simulation studies is the lack of rainfall input data with high temporal resolution. In order to use EUROSEM as a tool for prediction of long-term soil erosion and associated effects such as a decrease in soil productivity, it is necessary to have a long record of rainfall data. For long-term evaluation of erosion effects, we therefore developed a storm design model to generate the missing rainfall input data necessary for EUROSEM. To test the validity of the proposed design model we first compared rainfall data recorded at two stations in Costa Rica and Mexico with rainfall data generated with the storm model. Second, we applied the storm design model on two watersheds in Mexico and Costa Rica with arbitrarily chosen but typical input data information for EUROSEM. For this set of input data we simulated soil erosion twice: the first time with recorded rainfall data, the second time using rainfall data generated with the storm design model. Results showed, that although rainfall characteristics of Costa Rica and Mexico are quite different, the storm design model was able to reproduce the statistical properties for both situations. Recorded rainfall input data and rainfall data generated with the storm design model resulted in the same amounts of modeled soil erosion

<sup>1</sup> Institute for Land and Water Management Research, Federal Agency for Water Management, Pollnbergstrasse 1, A-3252 Petzenkirchen, Austria.

<sup>2</sup> (peter.strauss@baw.at) y Autor responsable.

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2060 San Pedro, Costa Rica.

<sup>4</sup> Institut de Recherche pour le Développement. 911 Avenue Agropolis, 34032 Montpellier cedex 1, France.

<sup>5</sup> Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

losses for both stations. Therefore, it can be concluded, that the proposed storm design model can generate rainfall data that can be used as input information for long-term calculations of erosion using the EUROSEM model.

*Index words:* EUROSEM, rainfall generation, rainfall model, rainfall characteristics.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de campo de la erosión hídrica de los suelos implica un alto costo para asegurar su seguimiento, su representatividad y su duración. Por lo anterior, se han desarrollado modelos como el Modelo Europeo de Erosión de Suelos (EUROSEM, Quinton y Rodríguez, 1999), que predice los efectos de la erosión de suelos de una cuenca. Uno de los problemas para hacer andar este tipo de modelos hidrológicos es muchas veces la ausencia de las características detalladas a escala de 1 minuto, de las lluvias. En efecto, EUROSEM es un modelo basado en eventos que requiere información de lluvias de alta resolución temporal para eventos de lluvia independientes. Para realizar estimaciones del efecto de la erosión de suelos como el cambio en la productividad de suelos, también se hace necesario correr modelaciones a largo plazo. Por eso, se desarrolló un modelo de diseño de tormentas que genera los datos de lluvia faltantes necesarios a EUROSEM.

Existen varios enfoques metodológicos para modelar lluvia con alta resolución temporal. Nguyen y Rousselle (1981) y Katz y Parlange (1995) consideraron a la lluvia como un proceso continuo donde las diferentes intensidades pueden ser representadas usando cadenas de Markov. En contraste, Rodríguez-Iturbe (1988) y Glasbey *et al.* (1995) modelaron las intensidades de lluvia como procesos puntuales independientes. Estos enfoques tienen el inconveniente de una excesiva demanda de parámetros de entrada. Además, la resolución temporal alcanzada no es menor que una hora, lo cual no es suficiente para ser usada como parámetro de entrada en EUROSEM. Otra posibilidad ampliamente usada con propósitos hidrológicos es el uso de un diseño de tormentas que ofrece información sobre la secuencia de intensidades de lluvia dentro de los eventos de lluvia. Existen varias categorías de dichas metodologías que Koutsoyiannis (1994) ha resumido. Este tipo de modelos tiene una menor demanda de

parámetros de entrada. Por otro lado, la naturaleza estocástica de los datos de lluvia de alta resolución temporal y más aún los picos de máxima intensidad dentro del aguacero difícilmente pueden ser cubiertos con enfoques de diseño de curvas de tormentas como el propuesto por Huff (1967).

De acuerdo con las necesidades de EUROSEM, fue necesario desarrollar una nueva metodología utilizando un enfoque estadístico que combina la metodología de diseño de tormentas con metodologías estocásticas. Este enfoque se beneficia por las bajas demandas de parametrización y las características aleatorias que toman en cuenta los picos de alta densidad dentro de los eventos de lluvia. Este modelo se diseñó y se comprobó con base en los datos de lluvias registradas en Costa Rica y México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Datos de Lluvia Utilizados

El análisis de las lluvias se realizó con bandas de pluviógrafo de registros diarios, controlados por el Instituto Meteorológico de Costa Rica en la estación Aeropuerto Juan Santamaría (CR), y con los obtenidos de un proyecto anterior (Prat, 1997) en San Miguel Tlaixpan en México (MEX). En el Cuadro 1, se presentan características generales de las estaciones investigadas. Prat (1997) mencionó información sobre las características de la lluvia en la estación MEX. Las estaciones seleccionadas presentan características contrastantes en relación con la precipitación total, la distribución de la precipitación y el número de eventos que pueden considerarse erosivas.

Como se ha observado en diferentes climas, la erosión frecuentemente es el resultado de relativamente poco eventos (Tropeano, 1984; Lal, 1990; Zuzel *et al.*, 1993; Prat *et al.*, 1997). Wischmeier (1959) consideró el valor de 12.5 como el límite de cantidad de lluvia (mm) e intensidad

**Cuadro 1. Características generales de las estaciones meteorológicas Aeropuerto Juan Santamaría (Costa Rica) y San Miguel Tlaixpan (México).**

	Costa Rica	México
Periodo analizado	1987 a 1997	1992 a 1995
Latitud	10° 00' N	19° 30' N
Longitud	84° 12' O	98° 48' O
Altitud	932 m	2555 m
Lluvia anual	2001 mm	639 mm
Temperatura promedio anual	22.9 °C	13.0 °C



(mm h<sup>-1</sup>) en la cual las lluvias pueden ser potencialmente erosivas. Wilkinson (1975) y Sabel-Koschella (1988) han confirmado este valor. En contraste, Deumlich (1989) reportó fuertes pérdidas de suelo empezando con eventos mayores que 15 mm y Hudson (1965) encontró un mejor desempeño del índice de erosividad cuando se utilizaron lluvias superiores a 25 mm h<sup>-1</sup>. Morgan (1974) también reportó resultados similares. Para estar en el intervalo de los valores reportados y para obtener un número práctico de eventos para cada año de la modelación, se consideraron sólo eventos con una precipitación mayor que 15 mm para Costa Rica. Para México, se disponía de sólo cuatro años de datos de lluvia con suficiente resolución temporal; por esto, fue necesario reducir el límite de 15 mm a 10 mm con el fin de obtener suficientes eventos de lluvia para el análisis estadístico. Los eventos se consideraron como eventos de lluvia independientes cuando no se presentó ninguna precipitación por más de una hora.

### Enfoque Estadístico

La suposición básica de nuestro modelo es que el poder erosivo de la lluvia puede ser correctamente modelado, utilizando parámetros particulares de la lluvia (Strauss *et al.*, 1999). Una combinación de estos parámetros, con un procedimiento adecuado que tome en cuenta la estructura interna de la tormenta, resultará en la generación de un diseño de tormentas que puede usarse satisfactoriamente para modelar la erosión de suelos. Para caracterizar básicamente el poder erosivo de la lluvia, los eventos preseleccionados se disgregaron en periodos de precipitación menor que 5 mm h<sup>-1</sup>. Para representar las características erosivas de los picos de lluvia, se escogió la duración del pico (*d*), cantidad de lluvia en el pico (*a*) y máxima intensidad en el pico (*p<sub>i</sub>*). La duración y la cantidad de lluvia son consideradas como propiedades básicas del evento. Muchos autores desde Wischmeier (1959) han reportado la evidencia de la importancia de estas características particulares, así como de las intensidades máximas de la lluvia.

### Modelación de la Erosión

EUROSEM es un modelo que está diseñado para predecir el escurrimiento total y la erosión del suelo, basándose en la distribución de eventos y mediante la descripción de varios procesos fundamentales. Los procesos más importantes son:

- Intercepción de la lluvia por la cobertura vegetal.
- Volumen de la capacidad de almacenamiento de las depresiones de superficie.
- Desprendimiento de las partículas de suelo por el impacto de las gotas de agua y por el escurrimiento.
- Depósito de sedimentos.
- Capacidad de transporte del escurrimiento.

Para simular el escurrimiento superficial, EUROSEM utiliza los mismos algoritmos que se emplean en el modelo KINEROS (Woolhiser *et al.*, 1990). Para el uso de EUROSEM en una cuenca, ésta se divide en varias unidades o componentes, los cuales están conectados entre sí. Los valores de propiedades, como la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura de vegetación son requeridos para cada unidad de la cuenca. Una descripción más completa del modelo EUROSEM se encuentra en Morgan *et al.* (1998).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Elaboración del Modelo de Diseño de Tormentas

Para derivar el número de eventos por año, se utilizó el promedio de eventos por mes. La selección de la mejor distribución estadística para representar las características del pico se hizo mediante la prueba de varias distribuciones que comúnmente se usan en estudios hidrológicos (Clark, 1994). El número de picos (*p<sub>no</sub>*) que ocurren dentro de un evento se estimó usando una distribución de Poisson. Pruebas preliminares han mostrado que ésta es superior a una distribución geométrica. La distribución está dada por:

$$f(p_{no}) = \frac{\omega^{p_{no}} e^{-\omega}}{p_{no}!} \quad \omega > 0 \quad (1)$$

Donde: *p<sub>no</sub>* = número de picos,  $\omega$  = valor esperado de *p<sub>no</sub>* (promedio aritmético), *e* = base de logaritmo natural.

Para representar *d*, se usó una distribución normal de la forma:

$$f(d'') = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{d''-\bar{d}'}{\sigma}\right)^2} \quad (2)$$

Después de transformar  $d$  a  $d' = \log_{10}(d)$ , lo cual probó ser superior a la distribución Gamma o a la distribución Weibull. La cantidad de lluvia se ajustó a una distribución exponencial:

$$f(a') = \lambda e^{-\lambda a'} \quad \lambda > 0 \quad (3)$$

Donde  $a'$  se refiere al exceso de lluvia sobre un límite de 5 mm. Para probar la independencia estadística entre cada una de las características erosivas, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman (Cuadro 2)

Para ambas estaciones, la correlación entre los parámetros de duración ( $d$ ) y la cantidad del pico ( $a$ ) no fue significativa a 5%. La máxima intensidad al pico ( $p_i$ ) fue significativamente correlacionada con la duración ( $d$ ) y la cantidad ( $a$ ) para las dos estaciones. Analizando ambas estaciones, las mayores correlaciones se observaron entre la máxima intensidad al pico ( $p_i$ ) y la intensidad promedio del pico ( $m_i$ ), aunque el valor de correlación entre  $d$  y  $m_i$  para la estación de México era la mayor de todas en la tabla. Para mantener el mismo procedimiento de estimación de los parámetros para ambas estaciones, se decidió estimar la máxima intensidad en dependencia de la intensidad promedio ( $m_i$ ), donde:

$$m_i = \frac{a}{d} \quad (4)$$

Una transformación de  $p_i$  en  $p_i \cdot \log_{10}(p_i)$  y  $m_i$  en  $m_i \cdot \log_{10}(m_i)$  resultó aproximadamente en una distribución normal de los valores. Análisis posteriores revelaron una relación de la forma:

$$p_i' = c + k m_i' + \varepsilon \quad (5)$$

Donde:  $c, k =$  constante,  $\varepsilon =$  término de error

Una prueba de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) señaló que  $\varepsilon$  era normalmente distribuida con medio cero (Figura 1).

Habiéndose escogido una metodología apropiada para la modelación de las características erosivas de la lluvia, todavía fue necesario hacer algunas suposiciones sobre la distribución de la lluvia dentro de cada evento. Existen varias posibilidades para la representación de pares de tiempo-intensidad (Redaño y Lorente, 1993). En este caso, se escogió una función

**Cuadro 2. Coeficiente de correlación de Spearman y niveles de significancia (P) para los parámetros duración del pico (d), precipitación pico (a), máxima intensidad pico (p<sub>i</sub>) e intensidad pico promedio (m<sub>i</sub>) de las estaciones en Costa Rica (CR, n = 4462) y México (MEX, n = 63).**

MEX		d	a	p <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>
d		1.00			
	P	-			
a		-0.19	1.00		
	P	0.132	-		
p <sub>i</sub>		-0.61	0.60	1.00	
	P	0.000	0.000	-	
m <sub>i</sub>		-0.86	0.59	0.79	1.00
	P	0.000	0.000	0.000	-
CR		d	a	p <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>
d		1.00			
	P	-			
a		0.07	1.00		
	P	0.078	-		
p <sub>i</sub>		-0.30	0.78	1.00	
	P	0.000	0.000	-	
m <sub>i</sub>		-0.60	0.72	0.83	1.00
	P	0.000	0.000	0.000	-

doble exponencial para representar la distribución de las intensidades de lluvia en el diseño de tormentas. Nicks y Lane (1989) también han usado una función similar en el desarrollo del modelo de erosión WEPP:

$$i = p_i e^{\lambda(t-\frac{d}{2})} \quad t \leq 0.5 d \quad (6)$$

$$i = p_i e^{-\lambda(t-\frac{d}{2})} \quad t > 0.5 d \quad (7)$$

Donde:  $i =$  intensidad de lluvia,  $t =$  tiempo,  $\lambda =$  parámetro de la distribución y  $d =$  duración total. La combinación e integración de las Ecuaciones 6 y 7 resulta en la función (Haberlandt, 1996):

$$f(\lambda) = \frac{1}{\lambda} p_i \left[ 2 - e^{-\frac{\lambda d}{2}} - e^{\frac{\lambda d}{2}} \right] - a = 0 \quad (8)$$

la cual puede ser resuelta numéricamente usando el algoritmo de bisección descrito por Mathews (1995). Una representación gráfica de las variables de entrada usadas en nuestro enfoque de diseño de tormentas se muestra en la Figura 2.

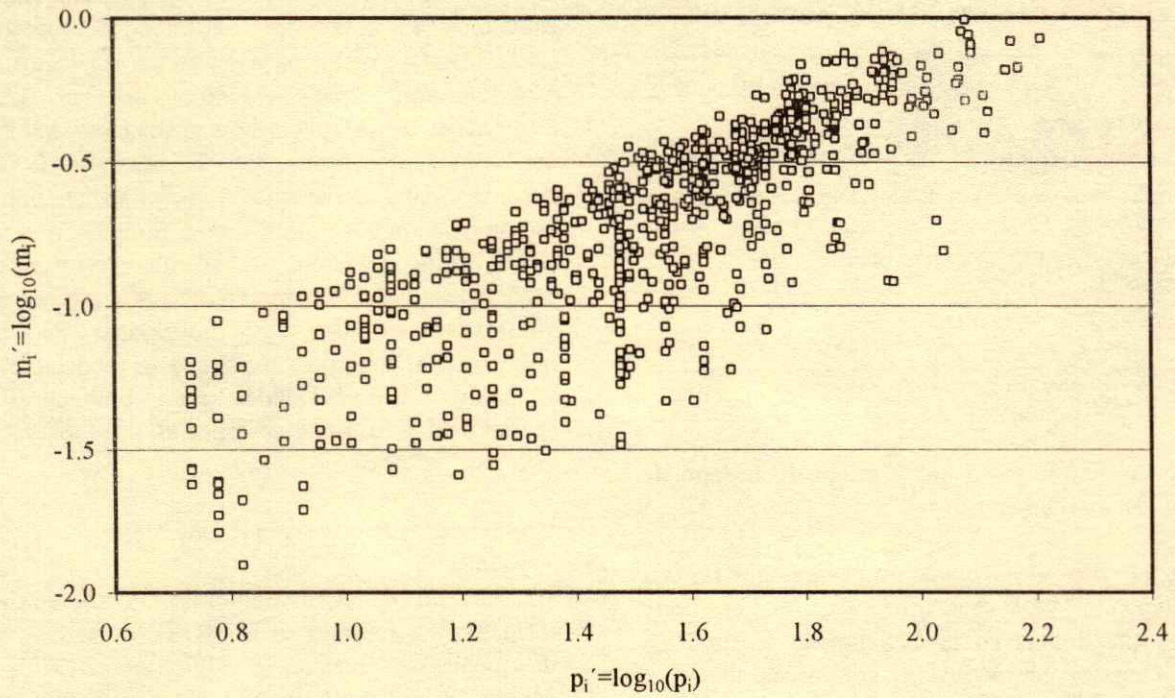


Figura 1. Relaciones entre los valores transformados a logaritmos de intensidad media del pico ( $m_i'$ ) e intensidad pico máxima ( $p_i'$ ) para Costa Rica.

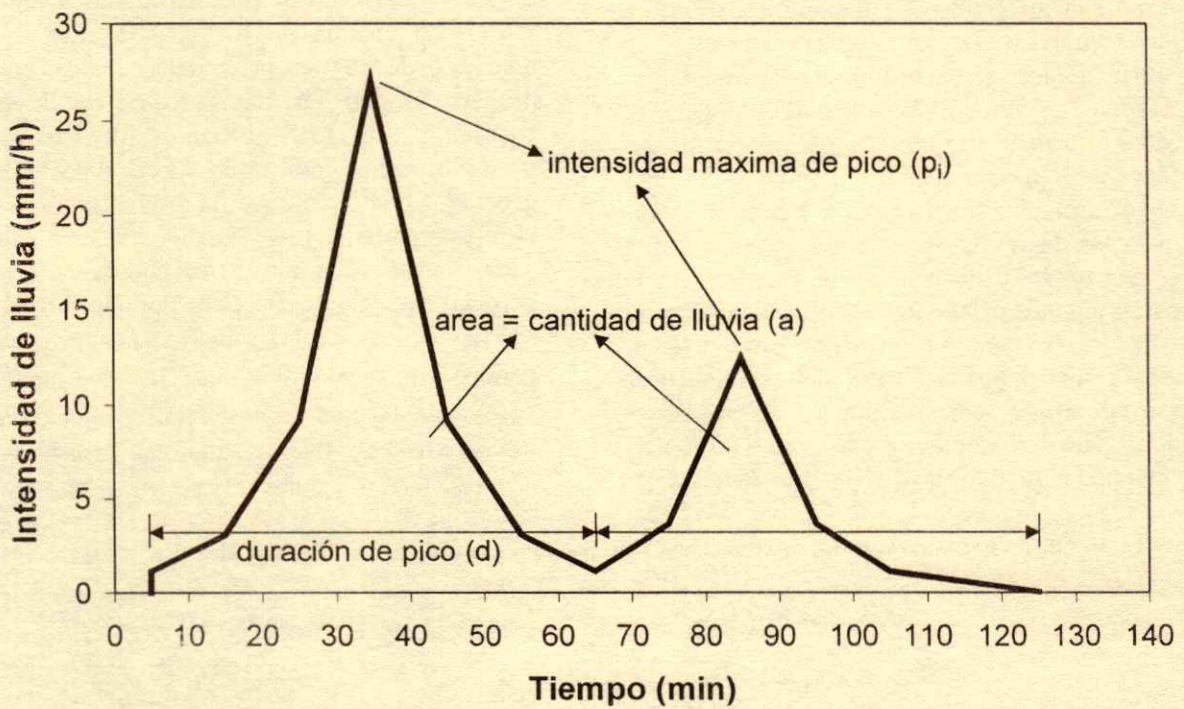


Figura 2. Representación gráfica de los parámetros de entrada para el diseño de tormentas en un evento de lluvia con dos picos.

**Cuadro 3. Características específicas de los eventos de lluvia estudiados para Costa Rica (CR) y México (MEX).**

Característica	CR	MEX
Número total de eventos	2296	711
Número de eventos evaluados <sup>†</sup>	462	63
Duración media de los eventos evaluados (min)	293	208
Desviación estándar	168	182
Lluvia media de los eventos evaluados (mm)	29.8	15.9
Desviación estándar	14.1	6.4
Intensidad media de la lluvia (mm h <sup>-1</sup> )	2.9	71.1
Desviación estándar	2.3	58.3

<sup>†</sup> Eventos de lluvia sobre un umbral de precipitación e intensidad (CR = 15 mm h<sup>-1</sup>, MEX = 10 mm h<sup>-1</sup>)

### Ajuste de la Distribución del Modelo de Diseño de las Lluvias Registradas

En los Cuadros 1 y 3 puede observarse que las dos estaciones investigadas muestran características muy diferentes. Las lluvias en la estación de Costa Rica tienen una mayor duración, mayor precipitación y menores intensidades pico en comparación con la estación utilizada en México. La cantidad total de lluvia (Cuadro 1) es también reflejada por el número de eventos sobre el umbral límite (Cuadro 3), aunque los datos no son directamente comparables, debido a los diferentes límites usados en las dos estaciones.

El ajuste de los datos usando las metodologías descritas en la sección "Elaboración del Modelo de Diseño de Tormentas" resultó en los valores de los parámetros que se presentan en el Cuadro 4.

Como el término de error de la Ecuación 5 fue similar para las dos estaciones, se escogió mantener e constante con un valor de 0.2. En los Cuadros 5 y 6, se comparan algunos estadísticos seleccionados de los valores de los parámetros erosivos para eventos observados y modelados. El valor del estadístico de Kolmogorov-Smirnov entre valores observados y modelados para el número de picos ( $p_{no}$ ) y la precipitación al pico ( $a$ ) no detectó diferencias a un

nivel de significancia de  $P = 0.05$  para ninguna de las estaciones. En contraste, la duración del pico ( $d$ ) falló en la misma prueba para la estación de Costa Rica. Sin embargo, para México no se detectaron diferencias a un nivel de significancia de  $P = 0.05$  entre lluvias observadas y modeladas para la duración del pico. Una comparación de cuartiles mínimos y máximos para esos parámetros también muestra una muy buena relación entre valores observados y modelados. La comparación de los cuartiles para los valores observados y modelados de máxima intensidad al pico ( $p_i$ ) revela que la modelación tiende a bajar las intensidades para ambas estaciones (Cuadros 5 y 6), pero, en especial, para los datos de la estación en México.

### Capacidades Predictivas del Modelo

Para probar la capacidad del modelo de diseño de tormenta a ser usado en EUROSEM, se seleccionaron dos pequeñas cuencas (< 100 ha) en Costa Rica y México y los resultados obtenidos se compararon con lluvias reales y las diseñadas. Para cada unidad, los valores de los parámetros requeridos por EUROSEM se derivaron de mediciones en campo o estimados según algunas tablas preestablecidas (Veihe *et al.*, 2001). La erosión de suelos para cada una de las unidades de las cuencas seleccionadas se calculó primero usando los datos reales de lluvia en las cuencas (Costa Rica: 10 años; México: 4 años) y, posteriormente, utilizando los datos de lluvia generados con el enfoque de diseño de tormentas para el mismo periodo. Los resultados se compararon para cada unidad de la respectiva cuenca en términos de pérdidas de suelo por hectárea por año (Figuras 3 y 4).

En general para las dos cuencas, los valores de pérdida de suelo con las lluvias modeladas se aproximan bastante a los valores calculados con las lluvias reales. Puesto que las unidades en las cuencas tenían valores diferentes en los parámetros

**Cuadro 4. Valores de los parámetros de las distribuciones seleccionadas para las lluvias de Costa Rica (CR) y México (MEX).**

Característica	Distribución	Parámetros-CR	Parámetros-MEX
$p_{no}$ <sup>†</sup>	Poisson	$\omega = 1.60$	$\omega = 0.50$
$d^*$	Normal	$\bar{X} = 1.888, s = 0.260$	$\bar{X} = 1.522, s = 0.305$
$a$	Exponencial	$\lambda = 12.10$	$\lambda = 6.60$
$p_i$	Regresión lineal	$c = 2.063, k = 0.764, s_e = 0.19^{\dagger}, r^2 = 0.70$	$c = 2.137, k = 0.763, s_e = 0.22^{\dagger}, r^2 = 0.61$

<sup>†</sup>  $p_{no}$  = número de picos;  $d^*$  =  $\log_{10}$  de la duración del pico;  $a$  = precipitación del pico;  $p_i$  = máxima intensidad al pico. <sup>†</sup>  $s_e$  = desviación estándar del término de error.

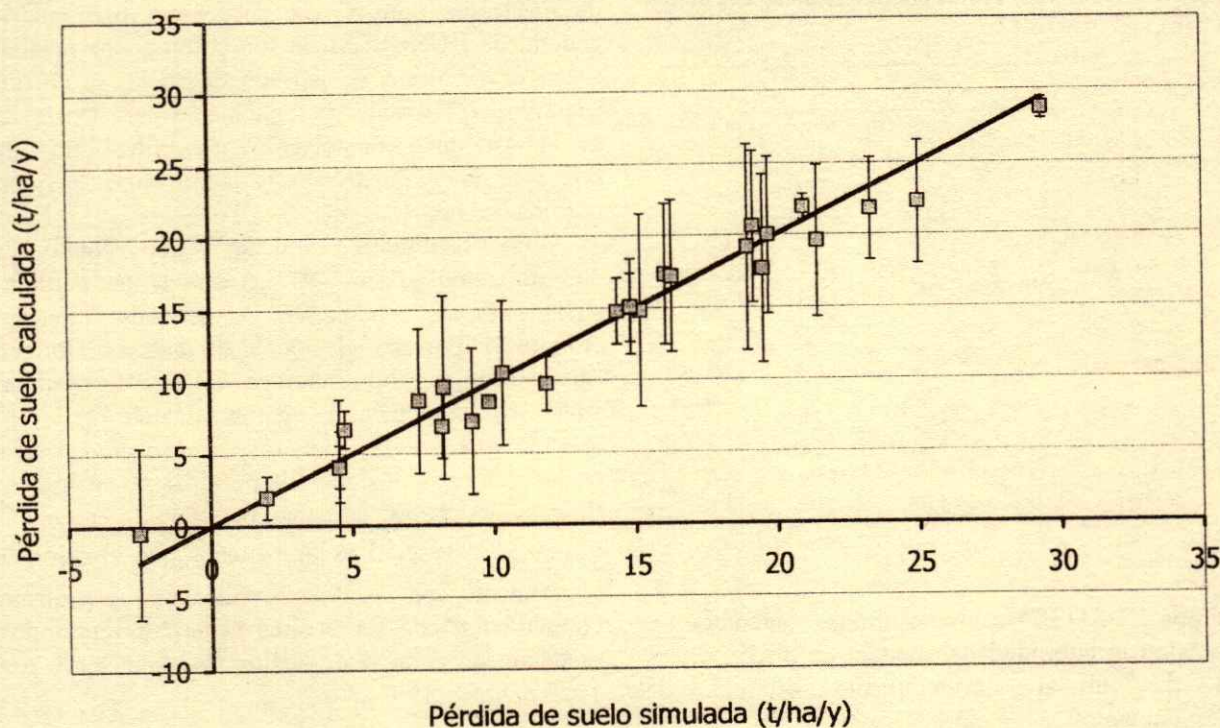


Figura 3. Pérdida de suelo ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) calculada con lluvia observada *versus* pérdida de suelo calculada con lluvia modelada para 28 unidades de una cuenca de prueba en México. Los resultados de la modelación son el promedio de cinco repeticiones independientes; las líneas verticales indican la desviación estándar de la media, valores negativos indican acumulación de suelo.

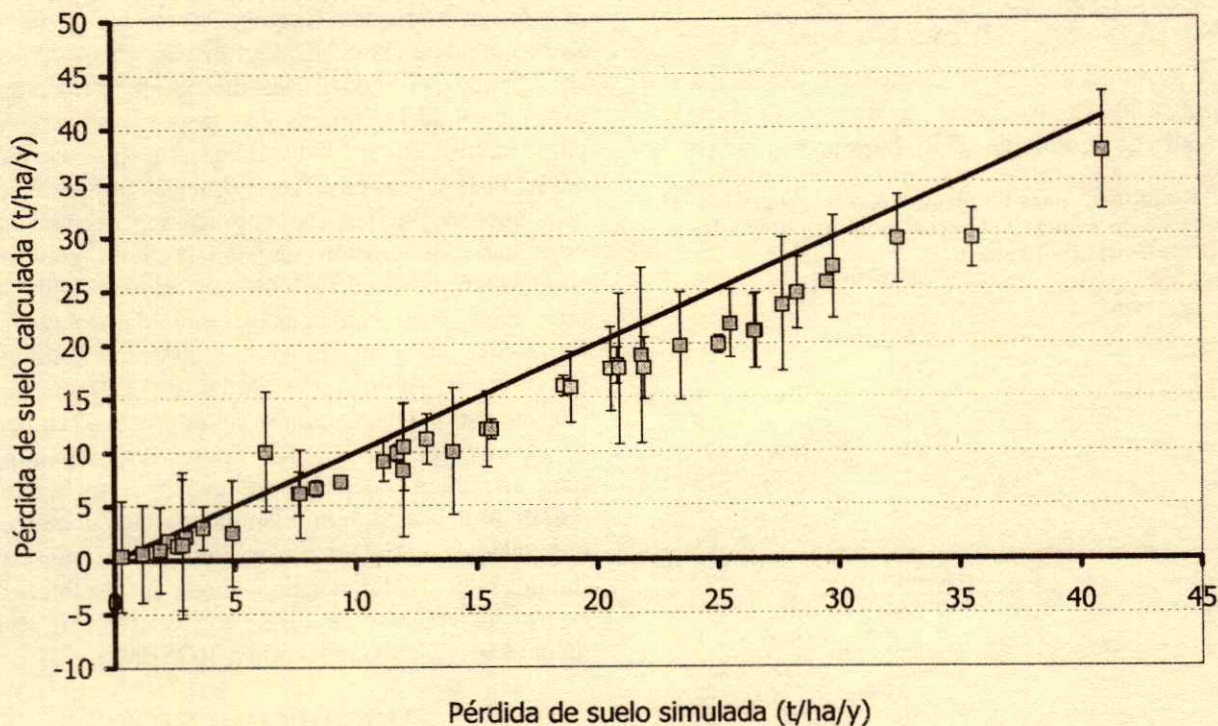


Figura 4. Pérdida de suelo ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) calculada con lluvia observada *versus* pérdida de suelo calculada con lluvia modelada para 42 unidades de una cuenca de prueba en Costa Rica. Los resultados de la modelación son el promedio de cinco repeticiones independientes; las líneas verticales indican la desviación estándar de la media, valores negativos indican acumulación de suelo.

**Cuadro 5. Estadísticos para los picos de lluvia observados en eventos preseleccionados en las estaciones meteorológicas de Costa Rica (CR) y México (MEX).**

MEX (n = 68)		$P_{no}$	$d^{\dagger}$	a	$p_i$
			min	mm	mm h <sup>-1</sup>
Desviación estándar		.26	37	6.1	61.1
Mínimo		1	7	5.2	2.7
Máximo		2	173	45.7	330.0
Porcentajes	25	1.0	21	7.5	33.0
	50	1.0	27	10.7	61.2
	75	1.0	50	14.0	90.0
CR (n = 687)					
Desviación estándar		.74	65.8	12.0	27.5
Mínimo		1	20	5.1	3.0
Máximo		5	550	69.3	162.0
Porcentajes	25	1.0	50	8.4	21.0
	50	1.0	70	14.0	36.0
	75	2.0	110	22.5	54.6

<sup>†</sup>  $P_{no}$  = número de picos;  $d$  = duración del pico;  $a$  = precipitación pico;  $p_i$  = máxima intensidad pico.

utilizados por EUROSEM, los resultados obtenidos también señalan la habilidad del modelo de diseño de tormentas de reflejar correctamente diferentes condiciones ambientales.

En total, la desviación media entre las pérdidas de suelo con lluvias modeladas y reales fue de  $+0.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  ( $s_x = 1.3$ ) para la cuenca en México y  $+2.51 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  ( $s_x = 1.7$ ) para la cuenca en Costa Rica. Los resultados para la cuenca en Costa Rica exhiben una ligera tendencia a sobreestimar los valores totales de pérdida de suelo. Para probar si esto

**Cuadro 6. Estadísticos para los picos de lluvias generadas en México (periodo de modelación = cuatro años) y Costa Rica (periodo de modelación = 10 años).**

MEX (n = 75)		$P_{no}$	d	a	$p_i$
			min	mm	mm h <sup>-1</sup>
Desviación estándar		0.33	27	4.6	55.4
Mínimo		1	10	5.1	8.9
Máximo		3	235	71.8	395.7
Porcentajes	25	1	23	6.7	26.4
	50	1	38	9.2	41.9
	75	1	59	12.9	68.8
CR (n = 666)		$P_{no}$	d	a	$p_i$
Desviación estándar		0.64	60	10.8	35.3
Mínimo		1	10	5.0	5.0
Máximo		5	540	95.5	355.2
Porcentajes	25	1	53	8.4	17.5
	50	1	79	13.0	30.5
	75	2	118	20.8	51.4

<sup>†</sup>  $P_{no}$  = número de picos;  $d$  = duración del pico;  $a$  = precipitación pico;  $p_i$  = máxima intensidad pico.

se debió a un menor desempeño del modelo de diseño de tormentas para Costa Rica, o a una tendencia general de EUROSEM de sobreestimar los resultados a mayores valores de pérdida de suelo, se corrió un segundo experimento de modelación para Costa Rica. En la segunda modelación, se utilizó un grupo diferente de parámetros para incrementar el valor de pérdida de suelo.

Los resultados indican que hubo una subestimación general en las sumas de pérdida de suelo para las condiciones del segundo experimento (Figura 5). Por eso, el modelo de diseño de tormentas puede usarse para diferentes valores de pérdida de suelo sin incrementar sustancialmente los errores asociados. De todas maneras, la desviación estándar en los valores calculados de pérdidas de suelo con las lluvias modeladas y reales fue de  $-2.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  ( $s_x = 3.9$ ), lo cual es aún menor que el error en el experimento con las lluvias reales y muy pequeño en comparación con los errores generales reportados en modelaje de erosión de suelos (Wischmeier y Smith, 1978; Throw, 1999).

## CONCLUSIONES

- Aun cuando los datos climáticos utilizados mostraron marcadas diferencias en las condiciones ambientales de las cuencas utilizadas en Costa Rica y en México, el modelo de diseño de tormentas fue capaz de modelar lluvias de manera bastante realista para ambos sitios. Esto demuestra que el modelo desarrollado fue efectivo y puede utilizarse como generador de lluvias en la aplicación de modelos de estimación de erosión de suelos. Sería conveniente comprobar el modelo con un mayor número de estaciones meteorológicas y con datos de mayor resolución y con más años de registro para ampliar la información sobre los valores de entrada de los parámetros y sus cambios en diferentes condiciones de clima en el trópico. Los valores de los parámetros para el número de picos por evento o aguacero y la duración del pico, por ejemplo, sugieren que existe una relación entre estos parámetros y la cantidad de lluvia anual. Si tal relación puede ser establecida, se podría incrementar en forma drástica el uso práctico de modelos de erosión como EUROSEM.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto SPIES (Índices de productividad de suelos y su sensibilidad a

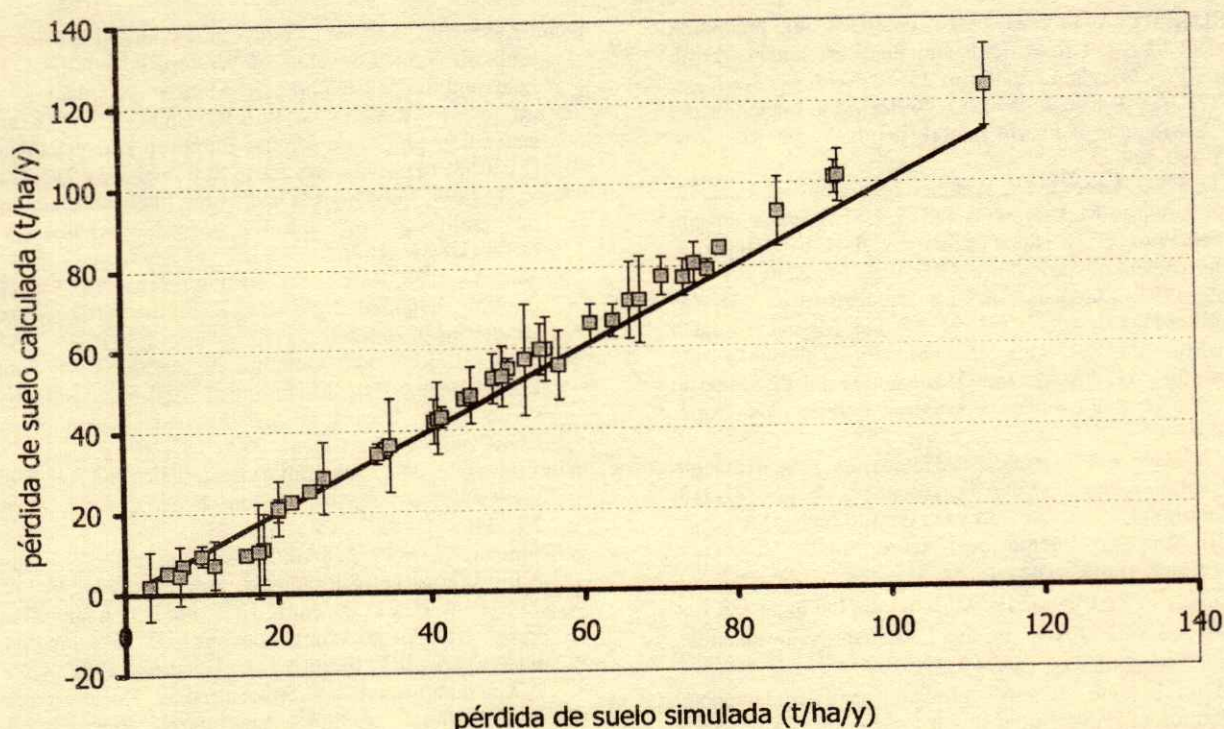


Figura 5. Segundo experimento de modelación: pérdida de suelo ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) calculada con lluvia observada versus pérdida de suelo calculada con lluvia modelada para 42 unidades de una cuenca de prueba en Costa Rica. Los resultados de la modelación son el promedio de cinco repeticiones independientes; las líneas verticales indican la desviación estándar de la media, valores negativos indican acumulación de suelo.

la erosión), contrato ERBIC18CT960096, financiado por la Unión Europea a la cual agradecemos ampliamente su apoyo. Partes de este trabajo también se han realizado bajo los contratos ENV4-CT97-0687 y TS3-CT96-0252 (coordinado por el IRD, ex-ORSTOM), cuyo financiamiento también se realizó a través de la Unión Europea. Además, agradecemos la colaboración del Instituto Meteorológico de Costa Rica que facilitó las bandas pluviográficas para su análisis.

#### LITERATURA CITADA

- Clark, R.T. 1994. Statistical modelling in hydrology. John Wiley. Chichester, UK.
- Deumlich, D. 1989. Untersuchungen zu Schwellenwerten erosionsauslösender Niederschläge im Jungmoränengebiet der DDR. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 33(11): 709-716.
- Glasbey, C.A., G. Cooper y M.B. McGechan. 1995. Disaggregation of daily rainfall by conditional simulation from a point-process model. J. Hydrol. 165: 1-9.
- Haberlandt, U. 1996. Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen. Mitteilungen des Institutes für Wasserbau. Universität Stuttgart. Stuttgart, Germany.
- Hudson, N.W. 1965. The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion with particular reference to Southern Rhodesia. M.Sc. thesis. University of Cape Town. South Africa.
- Huff, F.H. 1967. Time distribution rainfall in heavy storms. Water Res. Res. 3(4): 1007-1019.
- Katz, R.W. y M.B. Parlange. 1995. Generalisations of chain dependant processes: Application to hourly precipitation. Water Res. Res. 31(5): 1331-1341.
- Koutsoyiannis, D. 1994. A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis. J. Hydrol. 156: 193-225.
- Lal, R. 1990. Soil erosion in the tropics: Principles and management. McGraw-Hill. New York.
- Magagna, B., A. Folly, K. Hoenninger, A. Muhar, J. Quinton, F. Sancho y P. Strauss. 2000. The SPIES model: Data flow and GIS linkage between a soil erosion and a soil productivity model. pp. 259-268. In: Fullerton, K. (ed.). Proc. 5th EC GIS Workshop Stresa. 1999. Space Applications Institute, EC Joint Research Centre, Ispra, EUR 19018 EN, Italy.
- Mathews, J.H. 1995. Numerical Methods: FORTRAN programs: Algorithm 2.2. In: NUMERICAL METHODS for mathematics, science and engineering. Prentice Hall. Englewood Cliffs, UK.
- <http://scicomp.ewha.ac.kr/netlib/textbook/mathews/>
- Morgan, R.P.C. 1974. Estimating regional variations in soil erosion hazard in Peninsular Malaysia. Malay. Nat. J. 29: 94-106.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri y M.E. Styczen. 1998. The European soil erosion model

- (EUROSEM): A process based approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 527-544.
- Nguyen, V.T.V. y J. Rousselle. 1981. A stochastic model for the time distribution of hourly rainfall depth. *Water Res. Res.* 17(2): 399-409.
- Nicks, A.D. y L.J. Lane. 1989. Weather generator. pp. 2.1-2.19. *In: Lane, L.J. y M.A. Nearing (eds.). USDA-Water erosion prediction project: Hillslope profile model. NSERL Report 2. US Department of Agriculture-ARS. West Lafayette, IN.*
- Prat, Ch. 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan (Texcoco, México). pp. 359-370. *In: Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos. Quito, Ecuador.*
- Prat, Ch., A. Báez y A. Márquez. 1997. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco, México. pp. 371-383. *In: Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos. Quito, Ecuador.*
- Quinton, J.N. y F. Rodriguez. 1999. Modelling the impact of live barriers on soil erosion in the Pairumani sub-catchment, Bolivia. *Mountain Res. Dev.* 19: 292-299.
- Redaño, A. y J. Lorente. 1993. Modelling the spatial and temporal distribution of rainfall intensity at local scale. *Theor. Appl. Climatol.* 47: 25-32.
- Rodríguez-Iturbe, I. 1988. Scale of fluctuation of rainfall models. *Water Res. Res.* 22(9): 15-37.
- Sabel-Koschella, U. 1988. Field studies on soil erosion in the southern Guinea Savanna of Western Nigeria. PhD thesis. Lehrstuhl für Bodenkunde. TU München, Germany.
- Strauss, P., F. Konecny y W.E.H. Blum. 1999. A rainfall generation procedure for the European soil erosion model (EUROSEM). *Hydrology Earth Syst. Sci.* 3(2): 213-222.
- Throw, T. 1999. Vetiver grass hedgerows likely to be key solution for stabilization of Central American watersheds. *Vetiver Network Newsletter* 20: 3-5.
- Tropeano, D. 1984. Rate of soil erosion processes in vineyards in Central Piedmont (NW Italy). *Earth Surface Processes Landforms* 9: 253-266.
- Veihe, A., J. Rey, J.N. Quinton, P. Strauss, F.M. Sancho y M. Somarriba. 2001. Modelling of event-based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: Evaluation of the EUROSEM model. *Catena* 44(3): 187-203.
- Wilkinson, G.E. 1975. Rainfall characteristics and soil erosion in the rainforest area of Western Nigeria. *Expl. Agric.* 11: 247-255.
- Wischmeier, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 246-249.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *USDA Agricultural Handbook* 537. Washington, D.C.
- Woolhiser, D.A., R.E. Smith y D.C. Goodrich. 1990. KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual. *USDA Agricultural Research Service ARS-USDA No. 77. Washington, D.C.*
- Zuzel, J.F., R.R. Allmaras y R.N. Greenwalt. 1993. Temporal distribution of runoff and soil erosion at a site in north-eastern Oregon. *J. Soil Water Conserv.* 48: 373-378.



# PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN SUELOS DE PENDIENTE COMPLEJA DE COSTA RICA

## Production of Corn in Complex Slope Soils of Costa Rica

F. Sancho<sup>1§</sup>, N. Rampazzo<sup>2</sup>, A. Mentler<sup>2</sup> y M. Villatoro<sup>1</sup>

### RESUMEN

Para evaluar el efecto de la erosión de suelos sobre la producción de cultivos se han desarrollado diversos métodos. La mayoría de los métodos existentes cuantifican sólo las consecuencias de la pérdida de suelo, sin tomar en cuenta los efectos causados por la deposición de sedimentos. Con el fin de desarrollar un modelo de predicción más amplio y que fuera aplicable en cuencas, se diseñó el proyecto SPIES (Soil productivity indices and their erosion sensitivity). Dentro de las actividades del proyecto se establecieron experimentos de campo con el objetivo de estudiar con mayor detalle las interrelaciones entre la erosión y la productividad en diferentes ambientes. Con esta finalidad, en Costa Rica se seleccionaron tres paisajes de topografía compleja; esto es, pendientes de forma plano-convexa en la parte superior y cóncavo-plana en la parte inferior. Se realizó una caracterización física y química de los suelos y la topografía de las pendientes y se verificó que los suelos hubiesen sufrido diferentes grados de erosión. Durante dos ciclos de cultivo, se sembró maíz y se evaluó el rendimiento de grano y la producción de biomasa en cuatro posiciones a lo largo de la pendiente. El análisis de varianza mostró diferencias, tanto entre sitios como entre las posiciones a lo largo de la pendiente. En promedio, la reducción en producción debido a la erosión alcanzó porcentajes de 47 y 39 para las posiciones de remoción en comparación con la posición deposicional. Estas diferencias fueron mayores en tanto la fertilidad

natural de los suelos o la adición de fertilizantes en el pasado fue menor. Los datos de campo también permitieron identificar las variables de suelo de mayor efecto sobre la producción de maíz.

*Palabras clave:* Erosión de suelos, productividad, SPIES.

### SUMMARY

To evaluate the effect of soil erosion on crop production, diverse methods have been developed. Most of these methods consider only the effect of soil loss but not the deposition of sediments. With the purpose of developing a prediction model on a watershed scale, the project SPIES (Soil productivity indices and their erosion sensitivity) was designed. Within the activities of the project, field experiments were established with the purpose of evaluating the effect of soil erosion on the production of crops in tropical environments. To reach that goal, in Costa Rica three complex slopes with sigmoid-shaped profiles were selected. A complete soil physical and chemical characterization as well as a detailed topography survey was carried out to verify whether soils underwent different degrees of erosion. During two years corn was sown and biomass production and grain yield at four positions along the slope were evaluated. The analysis of variance showed statistical differences among sites as well as among positions along the slope. On average, reduction in production due to deposition/erosion reached percentages of 47 and 39 for position B and C (erosion) in comparison with position D (deposition). These differences were higher as the natural fertility of the soils or the addition of fertilizers in the past was less. The field data also allowed identification of soil variables that had more effect on the production of corn.

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2060 San Pedro, Costa Rica. (fsancho@cariari.ucr.ac.cr) <sup>§</sup> Autor responsable.

<sup>2</sup> Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur. Gregor Mendel Strasse 33. Wien A-180, Austria. (h310t8@edv1.boku.ac.at)

## INTRODUCCIÓN

La erosión es uno de los factores más importantes de degradación de los suelos. Según FAO (1994), a escala mundial la erosión hídrica es la responsable de 55.7% de la degradación de los suelos, mientras que la erosión eólica es causante de 27.9%. Centro América y México no escapan de esa situación; así, en países como México se reporta que la erosión hídrica afecta a 85% del territorio nacional en aquellas regiones de baja precipitación y alta densidad de población (Becerra, 1985). En Costa Rica, Dercksen (1991) indicó que alrededor de 42% del área del país está sujeta a un fuerte proceso de pérdida de productividad debida a la erosión hídrica.

Los efectos reales de la erosión sobre la productividad de los suelos aún no se ha cuantificado de manera correcta (Pierce, 1991; Pierce y Lal, 1994). A pesar de que desde los primeros estudios clásicos, en los cuales se propiciaban remociones artificiales de diferentes capas del suelo superficial, se notó una disminución de la productividad debida a la erosión (Bennett, 1939; Uhland, 1949; Stallings, 1950). Hoy en día se reconoce que las relaciones erosión-productividad son muy complejas debido a que involucran diversos aspectos de las relaciones entre el suelo y la planta, así como su manejo en climas muy variables (Meyer *et al.*, 1985; Lal, 1987; Cassel y Fryrear, 1990; Pierce, 1991; Pierce y Lal, 1994). La dificultad para valorar correctamente el efecto de la erosión es, en muchos casos, enmascarada por los incrementos graduales de insumos tecnológicos (Krauss y Allmaras, 1982; Langdale y Shrader, 1982).

Lal (1987) y Pierce (1991) realizaron una amplia revisión de los métodos utilizados para evaluar el efecto de la erosión de suelos sobre la productividad. Dentro de los métodos indicados por estos autores se encuentran: remoción artificial del suelo, estudios de invernadero, comparaciones de larga duración con diferente manejo de la superficie, relaciones entre propiedades del suelo y rendimiento, uso de simuladores de lluvia o viento, y desarrollo de modelos. La remoción artificial de diferentes capas de suelo se ha usado en numerosos experimentos. Sin embargo, las condiciones de suelo creadas con las remociones manuales difieren de las condiciones naturales debido a que la erosión natural, en general, es poco uniforme por la formación de surcos y cárcavas, no se toma en cuenta que la erosión remueve partículas selectivamente de acuerdo con su tamaño y

que la continua labranza promueve una mezcla de materiales de la superficie con los horizontes subyacentes. Los estudios realizados en fincas con suelos sometidos a diferentes grados de erosión tienen la ventaja que representan condiciones típicas y el cultivo está creciendo sobre todo el campo y no sólo en pequeñas parcelas (Meyer *et al.*, 1985). Por otro lado, si realmente se quiere valorar de una manera amplia el efecto de la erosión, y no sólo la pérdida de suelo, es necesario también evaluar la influencia que sobre la producción de cultivos se ejerce en las zonas de deposición de sedimentos.

La valoración de los efectos de la erosión de suelos sobre la productividad tiende hacia el desarrollo de modelos predictivos [EPIC (Williams y Renard, 1985); THEPROM (Biot, 1990); IP (Neill, 1979)], que sobre una base física permitan entender las relaciones entre las propiedades del suelo (físicas, químicas y biológicas) y la productividad, además cuantificar cómo la erosión de suelos altera estas propiedades. En regiones tropicales y, en particular, en el área Centroamericana, es muy poco lo que se ha hecho al respecto. Por esta razón, se plantea el presente trabajo con el objetivo de entender mejor las relaciones que se presentan entre la erosión de suelos a lo largo de una pendiente compleja y la producción de maíz utilizado como planta indicadora. Esta investigación forma parte del proyecto SPIES (Desarrollo y aplicación de índices de productividad y su sensibilidad a la erosión) y pretende generar información básica para el desarrollo y la validación de modelos predictivos aplicables al área Centroamericana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar el efecto de la erosión de los suelos sobre la productividad, se seleccionaron tres paisajes de pendiente compleja en los cuales es posible encontrar suelos sometidos a diferentes intensidades de erosión (Ferrens, *et al.*, 1985). Jones *et al.* (1989) han descrito una simplificación de este tipo de paisaje (Figura 1).

Los paisajes seleccionados se ubicaron en las proximidades del valle central de Costa Rica en áreas agrícolas donde la vegetación natural se removió mucho tiempo atrás y la actividad agropecuaria ha estimulado el proceso de erosión. La ubicación y las características de los paisajes seleccionados se detalla en el Cuadro 1 y en la Figura 2.

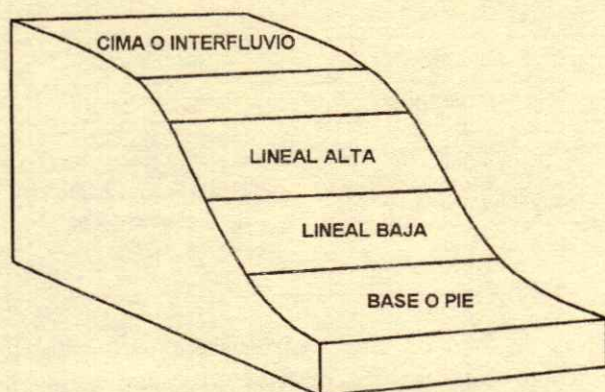


Figura 1. Representación generalizada de un paisaje de pendiente compleja (Modificado de Jones *et al.*, 1989).

Se realizó un levantamiento topográfico detallado en todos los sitios, creando una cuadrícula cada diez metros (Figura 3). En esta figura, se muestran los sitios experimentales A, B, C y D que corresponden a la zona de interfluvio o cima de la pendiente, la pendiente lineal alta y baja, y la zona de pie de monte o base de acumulación de sedimentos.

En cada una de las posiciones dentro del paisaje, se tomaron muestras de suelo a profundidades de 0 a 20 y de 20 a 40 cm, siguiendo el esquema de la Figura 2. Las muestras se transportaron al laboratorio, se secaron en un horno de flujo de aire a 60 °C, se molieron y se pasaron a través de una malla de 2 mm. El pH del suelo se midió en H<sub>2</sub>O con una relación 1:2.5 y el carbono orgánico se determinó por digestión húmeda, siguiendo el método modificado de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982). P disponible se extrajo con la solución Olsen modificada y se determinó por colorimetría. Ca, Mg, K y Na intercambiables se extrajeron con NH<sub>4</sub>OAc a pH 7 y los cationes en el lixiviado se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica. El aluminio intercambiable y la acidez total se determinaron con extracciones de KCl 1M (Thomas, 1982). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó por saturación con NH<sub>4</sub>OAc a pH 7 y subsecuente reemplazo de NH<sub>4</sub> con extracciones de KCl. El NH<sub>4</sub> se determinó por colorimetría de flujo de inyección.

Para la caracterización física se tomaron en el campo cilindros de suelo de 48 mm de diámetro y 65 mm de espesor que se utilizaron para determinar la densidad aparente y la conductividad hidráulica. La textura se determinó por el método de Bouyoucos, pero las muestras no se secaron al aire para evitar la

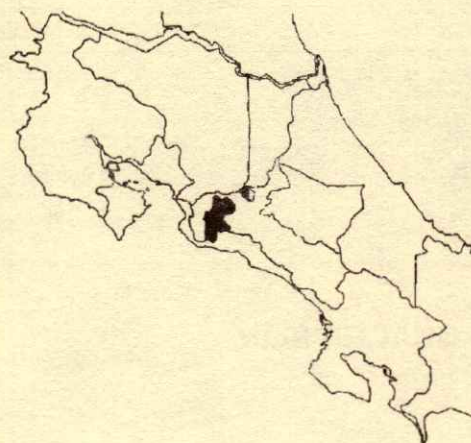


Figura 2. Mapa político por provincias de CR. Los polígonos oscuros indican los cantones donde se llevaron a cabo los experimentos.

formación de pseudoarenas, sino que posteriormente se hizo la corrección según el contenido de humedad. La retención de humedad a -0.03, -0.1, -0.3, -0.5 y 1.5 MPa se determinó con cilindros de suelo no disturbados de 48 mm de diámetro y 10 mm de espesor en ollas de presión (Klute, 1986).

Con el fin de caracterizar en forma más completa los suelos en estudio, para cada una de las posiciones en el paisaje se excavó una calicata en la cual se describió el perfil de suelo, siguiendo los lineamientos del manual de reconocimiento de suelos (USDA, 1993). A las muestras de los perfiles también se les hizo análisis de pH en NaF (Fieldes y Perrott, 1996) y Al y Fe extraído con oxalato de amonio. Los suelos se clasificaron a nivel de gran grupo de acuerdo con la taxonomía de suelos (USDA, 1999), pero la nomenclatura, siguiendo el sistema de FAO (1974), también se indicó.

Durante los ciclos de cultivo de 1997 y 1998, se sembró maíz (Híbrido HG-4) con 80% de germinación. La siembra se realizó siguiendo líneas de contorno a una distancia de 0.9 m entre hileras y 0.35 m entre golpes u hoyos. En cada hoyo se colocaron dos semillas con el fin de lograr una densidad aproximada de siembra de 50 000 plantas ha<sup>-1</sup>. Se siguieron las prácticas agrícolas usuales de la zona y no se aplicó ningún fertilizante u abono orgánico.

Después de la cosecha, se determinó la biomasa total y el rendimiento de grano con 12% de humedad en parcelas experimentales que consistieron de cuatro

Cuadro 1. Descripción de las localidades seleccionadas en el estudio.

Localidad	Guachipelín	Llano Limón	Puriscal
Coordenadas geográficas	9° 57' N; 84°10' O	9°55' N, 84°18' O	9°50' N, 84°20' O
Pendiente (%)	11	9	22
Altitud (m)	± 965	± 500	± 950
Zona de vida	Bosque húmedo tropical	Bosque húmedo tropical	Bosque muy húmedo premontano
Precipitación (mm)	1909	2143	2470
Temperatura (°C)	21.9	25.5	24.9

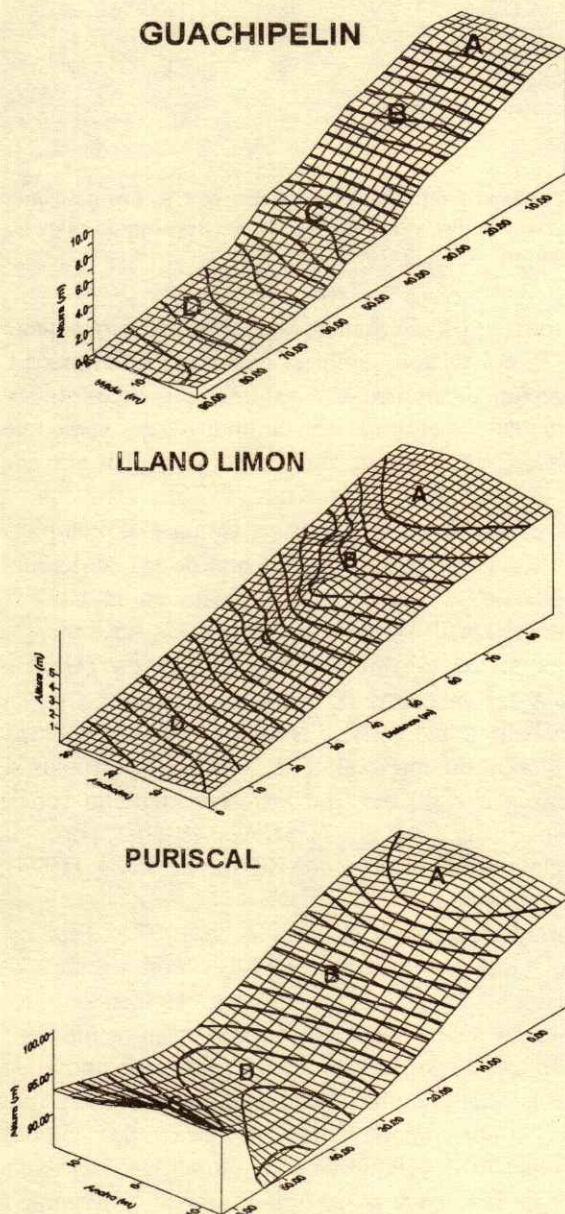


Figura 3. Topografía de los tres paisajes de pendiente compleja utilizados para la evaluación de la producción de maíz. Las letras A, B, C, D indican las posiciones en las cuales se realizaron las evaluaciones.

hileras de 5 m de largo. El diseño experimental fue irrestricto con tres repeticiones en cada una de las variables en los dos ciclos de cultivo, considerando la posición en la pendiente como el único factor. Se promediaron las producciones de grano y de biomasa de ambos ciclos en cada uno de los paisajes. Se realizó un análisis de varianza en cada uno de los paisajes y luego se combinaron estos análisis como si fuesen datos de series de experimentos similares. El valor de  $\alpha$  siempre fue de 0.05 para todos los casos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Descripción de los Suelos en los Paisajes de Topografía Compleja

Al tratar de relacionar la posición en el paisaje con características físicas y químicas de suelo, se encontró una variabilidad muy alta que no permite hacer relaciones directas, como lo han hecho otros autores (Brubaker *et al.*, 1993). Quizá, la imposibilidad de realizar este tipo de generalizaciones se deba a la génesis diversa que han tenido los suelos de los paisajes estudiados y al número pequeño de paisajes que se pudieron incluir en la muestra. Por estas razones, en lugar de hacer generalizaciones, se procederá a analizar las propiedades físicas y químicas de los suelos en cada paisaje para luego explicar su respuesta a la producción de maíz.

La clasificación de los perfiles de acuerdo con la Taxonomía de Suelos (USDA, 1999) se presenta en el Cuadro 2. En este cuadro se presenta la secuencia de horizontes y su respectiva nomenclatura para los perfiles típicos de cada una de las posiciones.

El paisaje Guachipelin se caracteriza por haber recibido recientes adiciones de cenizas volcánicas, las cuales principalmente se han sometido a los procesos de erosión y deposición. Así, el perfil ubicado en la parte más alta de la pendiente se clasificó como **Andic Dystrustepts** y se caracterizó por tener una capa de aproximadamente 40 cm de suelo con propiedades

Cuadro 2. Horizontes representativos para cada suelo en las diferentes posiciones de la pendiente.

Paisaje	Posición											
	A			B			C			D		
	Clasificación Taxonómica	Horizonte	Prof. (cm)	Clasificación Taxonómica	Horizonte	Prof. (cm)	Clasificación Taxonómica	Horizonte	Prof. (cm)	Clasificación Taxonómica	Horizonte	Prof. (cm)
Guachipelín	Andic Dystrustept	Ap	40	Entic Udic Haplustert	Ap	17	Udic Haplustert	Ap	12	Typic Haplustand	Ap	15
		AB	57		Bw	50		2A	57		AB	38
		Bw	100		Bss	115		2B	80		B	93
		C	140		C	150+		2BC	110		2A	120
Llano Limón	Andic Dystrustept	Ap	12	Andic Dystrustept	Ap	22	Typic Dystrustept	Ap	12	Humic Haplustand	Ap	15
		AB	30		Bw	42		Bw	60		A	35
		Bw	60		Bg	80		BCg	90		AB	50
		Bg	90		BC	120+		C	120+		B1	82
		BC	130+								B2	82+
Puriscal	Typic Haplohu mult	Ap	17	Typic Haplohu mult	Ap	24	Typic Haplohu mult	Ap	20	Andic Haplohu mult	Ap	26
		AB	30		Bt1	67		Bt1	60		AB	44
		Bt1	64		Bt2	110+		Bt2	105		Bt1	75
		C	64+					C	105+		Bt2	130+

ándicas, esto es baja densidad aparente ( $< 0.9 \text{ g cm}^{-3}$ ), alta retención de fósforo y un contenido de Al más la mitad del Fe extraído con oxalato de amonio mayor que 2%. Los suelos en las posiciones lineales del paisaje (B y C) presentan horizontes superficiales de menor grosor descansando sobre un antiguo suelo Vertisol. Por esta razón, estos suelos muestran horizontes en el subsuelo con un alto contenido de arcillas, en particular del tipo 2:1, que permite la formación de superficies de rozamiento y la apertura de grietas que permanecen durante toda la estación seca. Por el poco grosor de las capas volcánicas, las propiedades del mismo están definidas básicamente por los materiales arcillosos del suelo clasificando como **Udic Haplusterts**. Los materiales volcánicos removidos de las posiciones superiores se depositaron en el pie de monte. Por esta razón, se observaron propiedades ándicas a profundidades mayores que 1.20 m y el suelo se clasificó como **Typic Haplustand**.

El análisis físico de muestras tomadas a profundidades entre 0 a 20 y 20 a 40 cm en el paisaje Guachipelín para cada una de las posiciones (Cuadro 3) no evidenció el efecto de la topografía y la erosión sobre la génesis de los suelos. Estas diferencias en la génesis de los suelos sólo son observables a profundidades mayores en el perfil. Quizá, la única propiedad que mostró algún efecto de

la erosión es la mayor acumulación de arcillas en los suelos del sector C. Las propiedades químicas de los suelos de este sitio (Cuadro 4) también están afectadas por la intensiva agricultura que en ellos se practica y la frecuente adición de fertilizantes, tanto químicos como orgánicos. Con relación a los paisajes, se obtuvo un mayor rendimiento de maíz en Guachipelín (Figura 4).

En los suelos del paisaje Llano Limón también se presentó la influencia de cenizas volcánicas sobre antiguos suelos bastante meteorizados y de baja fertilidad. Así, los dos primeros suelos (A y B) presentaron horizontes superficiales con propiedades ándicas que les permite clasificarse como **Andic Dystrustepts**. El suelo en el sector C ya perdió, por efecto de la erosión, esta capa de materiales volcánicos y se clasificó como **Typic Dystrustept**. Por el contrario, todos los materiales erosionados se han depositado en la base de la pendiente y, por esta razón, el pedón típico en este sector tiene propiedades ándicas y un alto contenido de materia orgánica en más de 1 m de profundidad y se clasificó como **Humic Haplustand**.

La evaluación de las propiedades físicas en los primeros 40 cm del suelo si permitió la diferenciación, al menos entre los sectores A, B y C con el sector D. Este último presentó una menor densidad aparente, menor contenido de arcillas y mayor retención de

**Cuadro 3. Características físicas de los transectos estudiados a dos profundidades (0 a 20, 20 a 40 cm).**

Transecto	Posición	Prof. cm	Densidad aparente g cm <sup>-3</sup>	Textura			Nombre Textural <sup>†</sup>	Retención de humedad			Cond. hidráulica cm d <sup>-1</sup>
				Arena	Limo	Arcilla		1.5 MPa	0.03 Mpa.	Agua útil	
				----- % -----			----- % -----				
Guachipelin	A	0 a 20	0.74	54	32	14	Fa	17.6	35.9	18.3	152.1
		20 a 40	0.77	46	27	27	FA	31.4	44.7	13.2	69.0
	B	0 a 20	0.79	51	28	22	F	20.8	38.0	17.3	68.4
		20 a 40	0.81	55	27	18	Fa	25.7	40.5	14.8	19.1
	C	0 a 20	0.94	39	23	37	FA	23.8	37.4	13.5	79.0
		20 a 40	0.87	38	22	40	AF	30.2	44.7	14.5	8.1
	D	0 a 20	0.88	54	27	19	Fa	24.8	37.5	12.7	129.0
		20 a 40	0.99	56	27	17	Fa	36.3	58.6	22.3	12.1
Llano Limón	A	0 a 20	0.85	17	19	65	A	28.4	37.6	9.2	247.4
		20 a 40	1.13	10	19	71	A	39.3	45.3	5.9	2.6
	B	0 a 20	1.03	12	21	67	A	32.7	40.5	7.8	2.6
		20 a 40	1.16	8	24	69	A	40.5	46.4	5.9	0.0
	C	0 a 20	0.93	14	21	65	A	30.6	42.7	12.1	12.5
		20 a 40	0.99	7	23	70	A	33.7	41.9	8.3	1.3
	D	0 a 20	0.86	40	34	26	FA	30.1	46.2	16.1	33.7
		20 a 40	0.88	23	29	48	F	37.3	61.3	24.0	42.6
Puriscal	A	0 a 20	0.90	30	24	46	A	27.0	40.6	13.5	77.0
		20 a 40	0.93	21	21	58	A	34.1	40.9	6.8	168.2
	B	0 a 20	1.04	26	27	47	A	33.1	45.4	12.3	17.1
		20 a 40	1.06	18	25	57	A	38.8	47.9	9.1	7.6
	C	0 a 20	0.96	22	24	53	A	30.0	39.5	9.5	29.0
		20 a 40	0.88	18	22	60	A	30.0	39.0	9.1	63.0
	D	0 a 20	1.01	27	29	43	A	34.6	44.0	9.3	177.3
		20 a 40	0.84	25	29	46	A	32.4	46.1	13.7	210.6

<sup>†</sup> F = franco, A = arcilla, a = arena, l = limo.

humedad. La menor adición de fertilizantes químicos u abonos orgánicos que ha caracterizado la agricultura en este sitio sí permitió observar diferencias en las propiedades químicas evaluadas. Como se muestra en el Cuadro 4, el sector D mostró un mayor contenido de materia orgánica, Ca, Mg, capacidad de intercambio catiónico y una menor acidez.

Por su ubicación geográfica, la Región de Puriscal, ha sido menos influenciada por la actividad volcánica de la Cordillera Central, no obstante, hasta aquí también han llegado las nubes de cenizas volcánicas, siendo en este caso cenizas de textura más ligera. En general, los suelos son muy meteorizados con valores muy bajos de bases cambiables y alto contenido de arcilla. La presencia de horizontes argílicos con muy baja saturación de bases clasifica a estos suelos como **Typic Haplohumults**. Sólo en la posición inferior de este paisaje, la redistribución por erosión de materiales volcánicos produce la acumulación de estos materiales en los horizontes superficiales de suelo, clasificando como **Andic Haplohumults**.

En el paisaje Puriscal, la caracterización física de los primeros 40 cm del suelo permitió observar un

menor contenido de arcillas en los suelos del sector D, lo que también promueve una mayor conductividad hidráulica en el sitio. Las mayores diferencias en propiedades químicas estuvieron relacionadas con una mayor concentración de materia orgánica y bases cambiables (Ca y Mg) en el sector D, así como el afloramiento de capas de arcilla con una fuerte acidez en los sectores B y C.

### Rendimiento y Biomasa de Maíz

Los resultados de biomasa y rendimiento de grano se presentan en el Cuadro 5. A pesar de que no se realizó una comparación estadística de la producción para cada uno de los ciclos, se observa que tanto la producción de biomasa como el rendimiento de grano fue superior en el ciclo de 1998. El régimen de lluvias imperante en América Central durante 1997 y 1998 se caracterizó por la influencia muy marcada del fenómeno conocido como "El Niño". La precipitación total medida durante 1997 fue de 1707 mm, mientras que para 1998 fue de 2301 mm. En el primer año de experimentación, la precipitación pluvial no sólo fue menor que el promedio, sino que su distribución fue

Cuadro 4. Algunas características químicas seleccionadas para los suelos de los paisajes estudiados. Los muestreos se realizaron a dos profundidades (0 a 20 y 20 a 40 cm) al inicio de la siembra durante 1997 y 1998.

Paisaje	Posición	Prof. cm	pH	N ---	MO %	P mg kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	Na	Acidez cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	Suma de bases	CIC	Sat. acidez %
<b>1997</b>														
Guachipelín	A	0 a 20	5.8	0.67	6.57	5.9	9.59	1.94	1.37	0.59	0.26	13.50	45.05	2
		20 a 40	5.8	0.51	6.19	2.9	7.93	2.01	1.49	0.44	0.29	11.87	47.54	2
	B	0 a 20	5.7	0.41	5.07	5.4	8.51	1.86	0.87	0.47	0.23	11.70	43.52	2
		20 a 40	6.0	0.35	4.62	3.6	6.45	1.23	0.75	0.42	0.26	8.85	39.82	3
	C	0 a 20	5.6	0.31	4.38	5.9	12.42	3.19	1.79	0.47	0.29	17.88	45.07	2
		20 a 40	5.6	0.28	4.54	4.6	9.12	3.04	1.59	0.51	0.32	14.27	48.91	2
	D	0 a 20	6.1	0.34	5.52	4.5	13.50	3.03	1.11	0.42	0.23	18.06	43.90	1
		20 a 40	5.9	0.22	4.05	4.2	7.25	1.90	0.96	0.45	0.26	10.55	41.53	2
Llano Limón	A	0 a 20	5.3	0.12	2.41	5.5	2.99	0.80	0.52	0.31	0.44	4.61	24.51	9
		20 a 40	5.5	0.04	0.89	3.7	2.92	0.97	0.26	0.29	0.23	4.43	17.42	5
	B	0 a 20	5.2	0.13	2.78	6.6	4.12	1.37	0.31	0.27	0.52	6.08	25.37	8
		20 a 40	5.2	0.02	0.87	4.4	2.48	0.76	0.22	0.33	0.35	3.79	19.71	8
	C	0 a 20	5.2	0.13	3.00	8.9	3.88	0.91	0.45	0.28	0.61	5.53	25.71	10
		20 a 40	5.4	0.04	1.22	5.2	2.40	0.63	0.11	0.22	0.52	3.36	25.41	13
	D	0 a 20	5.7	0.33	6.43	10.1	6.80	1.02	0.59	0.24	0.73	8.66	38.45	8
		20 a 40	5.4	0.21	4.93	3.5	3.94	0.58	0.41	0.21	0.49	5.14	31.79	9
Puriscal	A	0 a 20	5.3	0.23	3.40	8.8	4.91	3.50	0.93	0.21	0.32	9.55	28.05	3
		20 a 40	5.5	0.06	1.37	6.8	2.99	3.55	0.77	0.20	1.05	7.51	26.77	12
	B	0 a 20	5.2	0.16	3.06	7.9	4.80	2.34	0.24	0.20	0.79	7.58	30.65	9
		20 a 40	5.1	0.08	1.43	5.8	5.95	1.40	0.06	0.24	1.02	7.66	29.34	12
	C	0 a 20	5.0	0.17	3.22	3.1	4.35	1.63	0.12	0.20	2.04	6.30	30.34	24
		20 a 40	5.0	0.10	2.12	3.3	3.03	0.80	0.07	0.22	2.33	4.13	28.04	36
	D	0 a 20	5.4	0.35	5.63	4.3	9.59	4.15	0.23	0.23	0.41	14.20	43.52	3
		20 a 40	5.6	0.30	5.52	2.5	12.00	3.04	0.16	0.23	0.64	15.43	44.94	4
<b>1998</b>														
Guachipelín	A	0 a 20	6.0		5.17	8.6	6.90	1.27	0.95	0.04	0.26	9.17	39.49	3
		20 a 40	6.0		6.57	0.8	5.16	1.07	0.57	0.05	0.32	6.85	52.51	5
	B	0 a 20	6.0		5.04	4.9	6.74	1.34	0.81	0.03	0.31	8.92	42.05	3
		20 a 40	6.1		3.44	2.4	6.20	1.92	0.41	0.12	0.26	8.65	47.52	3
	C	0 a 20	6.0		4.34	2.2	7.97	2.34	0.97	0.05	0.27	11.33	43.11	2
		20 a 40	6.0		3.13	4.8	6.41	2.00	0.91	0.09	0.31	9.42	48.35	3
	D	0 a 20	6.3		3.07	4.7	7.83	2.47	0.83	0.04	0.19	11.18	39.71	2
		20 a 40	6.2		5.60	5.7	6.15	1.62	0.59	0.06	0.31	8.41	46.76	4
Llano Limón	A	0 a 20	5.4		3.43	4.4	3.00	0.81	0.57	0.05	0.55	4.43	25.58	11
		20 a 40	5.5		2.02	5.9	2.34	0.55	0.39	0.04	0.29	3.32	19.96	8
	B	0 a 20	5.2		3.15	2.4	2.41	0.90	0.49	0.09	0.58	3.88	24.05	13
		20 a 40	5.4		1.03	3.9	1.89	0.57	0.18	0.08	0.29	2.72	17.96	10
	C	0 a 20	5.4		3.88	4.1	3.12	1.18	0.62	0.08	0.47	5.01	25.73	9
		20 a 40	5.2		2.64	3.3	2.07	0.65	0.25	0.07	0.64	3.05	22.40	17
	D	0 a 20	5.5		6.44	13.0	3.84	1.15	0.74	0.08	0.56	5.81	37.50	9
		20 a 40	5.3		7.99	5.7	3.88	0.88	0.22	0.07	0.61	5.06	46.00	11
Puriscal	A	0 a 20	5.2		3.18	5.5	3.68	4.31	0.36	0.08	0.50	8.44	30.81	6
		20 a 40	4.8		1.96	4.9	1.97	2.19	0.24	0.08	2.32	4.48	23.15	34
	B	0 a 20	5.3		3.81	5.9	3.98	2.13	0.11	0.14	0.82	6.36	32.88	11
		20 a 40	5.4		2.34	5.4	4.09	1.56	0.03	0.09	0.95	5.78	29.35	14
	C	0 a 20	5.0		4.28	4.2	3.17	1.92	0.11	0.06	1.30	5.26	32.26	20
		20 a 40	5.1		2.08	3.0	2.77	1.11	0.35	0.14	1.98	4.38	28.86	31
	D	0 a 20	5.3		3.84	4.8	6.18	4.34	0.30	0.09	0.31	10.91	40.73	3
		20 a 40	5.5		4.28	2.7	6.91	2.86	0.24	0.10	0.29	10.11	43.67	3

**Cuadro 5. Biomasa total y rendimiento de grano de maíz en cuatro sectores de tres localidades de pendiente compleja en Costa Rica. Datos de dos años de cosecha.**

Sitio	Posición	Biomasa			Rendimiento		
		1997	1998	Media	1997	1998	Media
----- kg ha <sup>-1</sup> -----							
Guachipelín	A	6411	7704	7058	2781	3938	3360
	B	8332	8235	8284	2442	4265	3354
	C	9091	9965	9528	3860	5056	4458
	D	9592	7272	8432	4311	3616	3964
Llano Limón	A	1260	3346	2303	920	1264	1092
	B	3019	2292	2656	1739	791	1265
	C	4845	1396	3121	1596	165	881
	D	4422	6499	5461	2724	3138	2931
Puriscal	A	2357	5365	3861	1617	2501	2059
	B	280	891	586	80	101	91
	C	146	632	389	8	127	68
	D	2854	5894	4374	1257	2636	1947
Media		4384	4958	4671	1945	2300	2123

muy irregular. Para 1998, la lluvia alcanzó registros muy superiores a la media y se presentaron varias tormentas tropicales, incluyendo al huracán "Mitch" al final de la temporada lluviosa. Por estas razones, es fácil explicar las diferencias aunque no estadísticamente significativas entre el rendimiento de maíz obtenido en 1997 y 1998.

Con relación a los paisajes, se obtuvo un mayor rendimiento de maíz en Guachipelín, lo cual es fácilmente explicado por la mayor tradición agrícola de la zona con sus prácticas de adición de fertilizantes. Los suelos de esta región se formaron sobre antiguas posiciones depresionales bajo un régimen de humedad ústico. Posteriormente, debido al vulcanismo activo que sufre la región, muchas de esas posiciones depresionales en las cuales se formaron y acumularon grandes cantidades de arcillas del tipo 2:1, se elevaron y se convirtieron en terrenos de ladera. Este fenómeno marca una gran diferencia entre la fertilidad natural del suelo en Guachipelín con los otros paisajes estudiados. El sitio Llano Limón fue el segundo en producción, lo que también coincide con la fertilidad media a baja de sus suelos.

En el Cuadro 6 se observa, con respecto al análisis de varianza para cada uno de los experimentos, que las diferencias entre posiciones están principalmente marcadas por el rendimiento obtenido en Puriscal ( $P < 0.02$ ) y en Llano Limón ( $P < 0.06$ ). Como se indicó anteriormente, los suelos de Guachipelín han recibido aportes muy importantes de materiales volcánicos, los cuales, a pesar de la erosión sufrida, aún mantienen un espesor importante para el

desarrollo de cultivos. En adición, la aplicación de fertilizantes y el continuo laboreo disimulan o reducen el efecto que la erosión de suelos haya tenido sobre la productividad.

Para el paisaje Llano Limón, las cenizas volcánicas sólo forman capas de poco espesor, que en el caso de la posición C se ha removido totalmente, acumulándose en la posición de deposición D. Esto ha hecho aflorar en las posiciones B y C el antiguo suelo que muestra un menor contenido de bases, mayor acidez y texturas más pesadas. Por el contrario, en la posición D, el contenido mayor de nutrientes y la mayor disponibilidad de humedad han favorecido notablemente el crecimiento del maíz. La producción de las posiciones erosionales (C y B) en este paisaje fue de sólo 33 y 43% de la producción obtenida en la posición de acumulación.

En el paisaje Puriscal, donde los suelos son más meteorizados y, por lo tanto, menos fértiles, la acción de la erosión se muestra claramente en la producción del maíz. En este paisaje, la producción de maíz es casi nula en las posiciones B y C, donde afloran

**Cuadro 6. Análisis de varianza por paisaje para la producción de grano promedio de los ciclos 1997-1998.**

Sitios	F. de V.	GL	Guachipelín		Llano Limón		Puriscal	
			CM	Pr. F	CM	Pr. F	CM	Pr. F
Posición	3		0,854	0,136	2,533	0,066	3,6618	0,0224
Error	8		0,326		0,454		0,1286	
SC Total	11		5,173		11,229		12,014	
C.V. (%)			15,10		42,69		34,34	



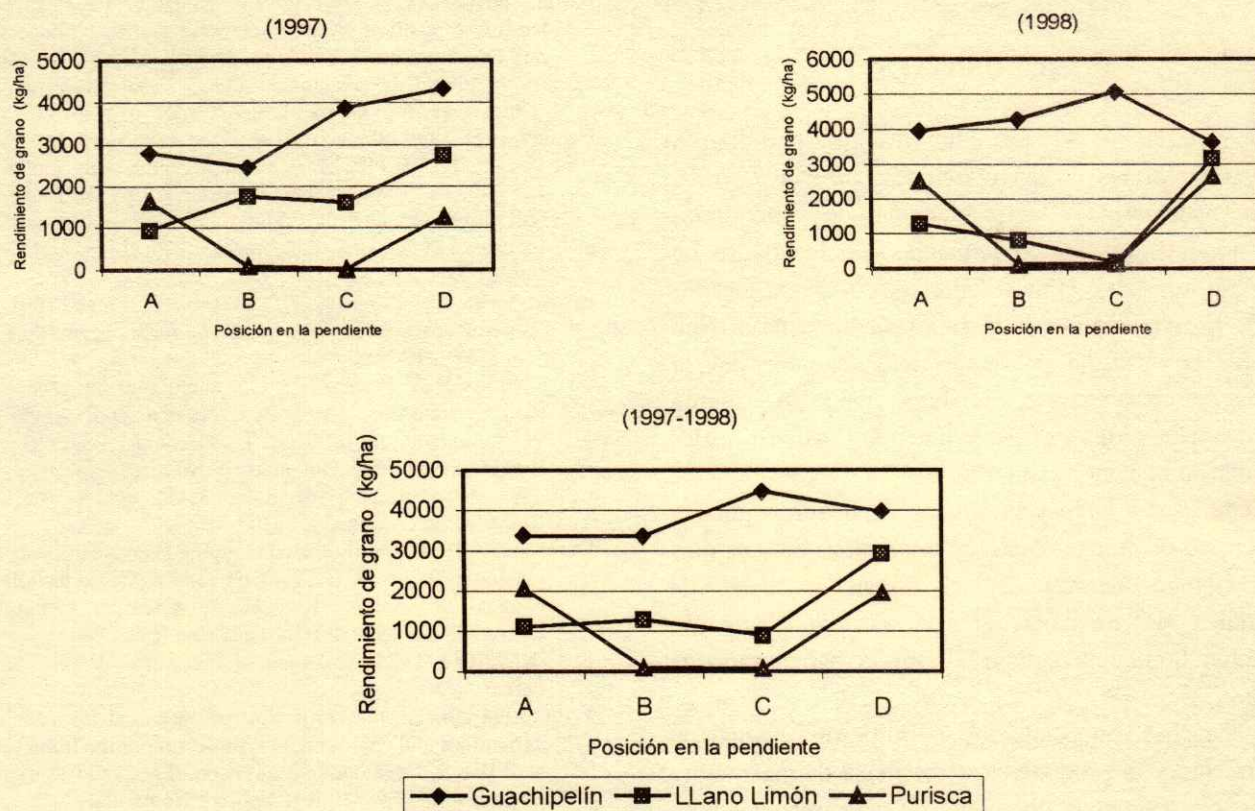


Figura 4. Rendimiento de maíz en grano (12% humedad) en tres transectos de pendiente compleja en Costa Rica.

Cuadro 7. Combinación de análisis para el efecto de la posición en la pendiente utilizando la producción de grano en los paisajes de Guachipelín, Llano Limón y Puriscal (media de los ciclos 1997-1998).

F de V	GL	Guachipelín	Llano Limón	Puriscal	GL	CM	F	P > F
Posición	3	0.854	2.533	3.6618	9	2.3495	7.7568	0.00002859
Error	8	0.326	0.454	0.1286	24	0.3029		
Total	11	5.173	11.229	12.0141	33	9.4718		

horizontes arcillosos de muy baja fertilidad y alta acidez. En términos porcentuales, la producción de maíz cayó por debajo de 5% en las posiciones erosionales, comparada con la de la cima o del pie de monte de este mismo paisaje.

Estadísticamente, al evaluar el efecto de la posición en pendiente en los tres paisajes en forma combinada (Cuadro 7), las diferencias entre posiciones son altamente significativas. Si se asumiera que el grado de erosión en las posiciones B y C es similar y mayor que en la cima y en la base, la erosión podría explicar

esas diferencias estadísticas. No obstante, atribuir este efecto tan sólo a la erosión podría resultar engañoso, puesto que otras variables como hidrología, exposición al sol, viento, microorganismos y aspectos específicos de la posición también podrían jugar algún papel importante. En general, los resultados del presente estudio coinciden con los obtenidos por Langdale *et al.* (1979), Spomer y Piest (1982), Ciha (1984) y Jones *et al.* (1989), quienes han encontrado una mayor producción en la zona de pie de monte; pero éste podría no ser el caso de ambientes perúricos

del trópico donde, de manera frecuente, estas posiciones están asociadas con mal drenaje de los suelos.

### CONCLUSIONES

- Los resultados del presente trabajo permitieron demostrar algunas de las relaciones entre la posición en la pendiente y la producción de maíz para condiciones tropicales coincidiendo con resultados de otros autores para climas templados (Afyuni, *et al.*, 1993). El rendimiento y la biomasa de maíz fueron mayores en la zona de deposición, seguidos por la producción en la cima o interfluvio donde se presenta una menor erosión. Las posiciones de erosión lineales presentaron la menor producción.

- El manejo del suelo y la adición de insumos pueden aminorar o ocultar el efecto de la erosión. Esto es más fácil cuando existan en el subsuelo capas de materiales de mediana a alta fertilidad que no presenten limitaciones físicas para la penetración de raíces.

- Los paisajes seleccionados permitieron evaluar el rendimiento y la producción de biomasa de maíz sobre suelos de pendiente compleja de una manera muy puntual. Sin embargo, es necesario desarrollar modelos que, usando un enfoque espacial, permitan realizar balances de productividad dentro de la microcuenca. Por eso, los datos proporcionados en el presente trabajo serán de mucho valor en el desarrollo de modelos que describan, de una mejor manera, las relaciones entre las propiedades de los suelos y la productividad en regiones tropicales.

### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se llevó a cabo como parte del proyecto SPIES (Soil Productivity Indices and their Erosion Sensitivity), contrato ERBIC18CT960096, financiado por la Comunidad Europea, sin la cual este trabajo no hubiera sido posible. Deseamos agradecer a Barbara Staudinger y Juan Carlos Quesada por su apoyo en los labores de campo y laboratorio, así como a aquellos agricultores que se manera desinteresada facilitaron terrenos y colaboraron en el manejo de las parcelas de campo.

### LITERATURA CITADA

- Afyuni, M.M., D.K. Cassel y W.P. Robarge. 1993. Effect of landscape position on soil and water and corn silage yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(6): 1573-1580.
- Becerra, A. 1985. Conservación de suelos y desarrollo sustentable. ¿Utopía o posibilidad en México? *Terra* 16: 181-187.
- Bennett, H.H. 1939. *Soil conservation*. McGraw-Hill. New York.
- Biot, Y. 1990. THEPROM an erosion productivity model. pp. 465-479. *In: J. Boardman, J. Foster y J.A. Dearing (eds.) Soil erosion on agricultural land. Proceedings of a workshop sponsored by the British Geomorphological Research Group, Coventry, UK.*
- Brubaker, S.C., A.J. Jones, D.T. Lewis y K. Frank. 1993. Soil properties associated with landscape position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 235-239.
- Cassel, D.K. y D.W. Fryrear. 1990. Evaluation of soil productivity changes due to accelerated erosion. pp. 41-54. *In: W.E. Larson, et al. (eds.) Research issues in soil erosion/productivity. University of Minnesota. St. Paul, MN.*
- Ciha, A.J. 1984. Slope position and grain yield of soft white winter wheat. *Agron. J.* 76: 193-196.
- Dercksen, P. 1991. A soil erosion mapping exercise in Costa Rica. pp. 164-170. *In: W.G. Vahrson (eds.) Memoria, taller de erosión de suelos. Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.*
- FAO-UNESCO. 1974. *Soil map of the world. Vol 1. Legend, Paris.*
- FAO. 1994 *Cherish the earth: Soil management for sustainable agriculture and environmental protection in the tropics. Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.*
- Fieldes, M. y K.W. Perrot. 1996. The nature of allophane in soils: Part 3. Rapid field and laboratory test for allophane. *N.Z. J. of Sci.* 9: 623-629.
- Jones, A.J., C.A. Mielke, C.A. Bartles y C.A. Miller. 1989. Relationship of landscape position and properties to crop production. *J. Soil Water Conserv.* 44: 328-332.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. pp. 635-662. *In: A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. American Society of Agronomy. Madison, WI.*
- Krauss, H.A. y R.R. Allmaras. 1982. Technology masks the effect of soil erosion and wheat yields: A case study in Whiteman County, Washington. pp. 75-86. *In: B.L. Schmith et al. (eds.) Determinants of soil loss tolerance. ASA Publication 45. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- Lal, R. 1987. Effect of soil erosion on crop production. *Critical Rev. Plant Sci.* 5(4): 303-367.
- Langdale, G.W. y D.W. Shrader. 1982. Soil erosion effect on soil productivity of cultivated crop land. pp. 41-51. *In: B.L. Schmith et al. (eds.) Determinants of soil loss tolerance. ASA Publication 45. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- Langdale, G.W., J.E. Box, R.A. Leonard, A.P. Barnett y W.G. Flaming. 1979. Corn yield reduction on eroded southern piedmont soils. *J. Soil Water Conserv.* 34: 226-228.
- Meyer, L.D., A. Bauer, y R.D. Heil. 1985. Experimental approaches for quantifying the effect of soil erosion on productivity. pp. 213-234. *In: R.F. Follet y B.A. Steward. Soil erosion and crop productivity. American Society of*

- Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Neill, L.L. 1979. An evaluation of soil productivity based on root growth and water depletion. M.Sc. Thesis. University of Missouri. Columbia, MO.
- Nelson, D.W. y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. pp. 581-594. *In*: A.L. Page (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Agronomy Monograph 9. ASA y Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Perrens, S.J., G.R. Foster y D.B. Beasley. 1985. Erosion's effects on productivity along non uniform slopes. pp. 201-214. *In*: American Society of Agricultural Engineers. Erosion and Soil Productivity. New Orleans, LA.
- Pierce, F.J. 1991. Erosion productivity impact prediction. pp. 35-52. *In*: R. Lal y F.J. Pierce (eds.). Soil management for sustainability. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, IA.
- Pierce, F.J. y R. Lal. 1994. Monitoring the impact of soil erosion on crop production. pp. 235-263. *In*: R. Lal (ed.). Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, IA.
- Spomer, R.G. y R.F. Piest. 1982. Soil productivity and erosion of Iowa loess soils. *Trans. ASAE* 25: 1295-1299.
- Stallings, J.H. 1950. Erosion of topsoil reduces productivity. Technical publication 98. US Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Washington, DC.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. pp. 159-165. *In*: A.L. Page (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Agronomy Monograph 9. ASA y Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Umland, R.E. 1949. Crop yields lowered by erosion. Technical publication 75. US Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Washington, DC.
- USDA. 1993. Soil survey manual. Handbook 18. US Department of Agriculture. Soil Survey Division Staff. Washington, DC.
- USDA. 1999. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agricultural Handbook 436. Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Williams, J.R. y K.C. Renard. 1985. Assessment of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC). pp. 67-103. *In*: R.F. Follet y B.A. Stewart (eds.). Soil erosion and crop productivity. Soil Science Society of America. Madison, WI.

# CALIBRACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO EUROSEM EN AMÉRICA LATINA: MÉXICO, NICARAGUA Y COSTA RICA

## Calibration and Evaluation of the EUROSEM Model in Latin America: Mexico, Nicaragua, and Costa Rica

J.A. Rey<sup>1§</sup>, A. Veihe<sup>2</sup>, J.N. Quinton<sup>3</sup>, P. Strauss<sup>4</sup> y F.M. Sancho<sup>5</sup>

### RESUMEN

### SUMMARY

Con el objetivo de calibrar y validar el modelo EUROSEM (Modelo Europeo de Erosión del Suelo), se utilizaron parcelas de escurrimiento en México, Nicaragua y Costa Rica; este modelo forma parte del proyecto SPIES, el cual evalúa el efecto de la erosión del suelo sobre la productividad del suelo. EUROSEM estima la erosión por evento de lluvia y también estima la pérdida de suelo. Para fines de comparación, se usaron simuladores de lluvia en México y Costa Rica; en Nicaragua, se cuantificó la pérdida de suelo sólo en parcelas de escurrimiento sin uso de simulador de lluvia. El modelo se calibró con base en hidrogramas y sedigramas y, posteriormente, se realizó su evaluación, tanto para México como para Costa Rica. En Nicaragua, la calibración se efectuó usando los valores de pérdida total de suelo (un año) y, posteriormente, se validó con datos de pérdida de suelo de dos años. El estudio hace hincapié en la importancia de calibrar el modelo en cuencas. El modelo no tiene la capacidad para simular el efecto de encostramiento del suelo en la construcción de los hidrogramas y sedigramas, pero sí para predecir el escurrimiento y la pérdida de suelo anual.

To calibrate and validate the EUROSEM model (European Soil Erosion Model), the model was tested in runoff plots in Mexico, Nicaragua, and Costa Rica. This model is part of the SPIES project, which evaluates the effects of soil erosion on soil productivity. EUROSEM estimates rain erosion and soil loss. To be able to establish a comparison, rain simulators were used in Mexico and Costa Rica; in Nicaragua, soil loss was quantified only on runoff plots, without the use of a rain simulator. The model was calibrated based on hydrograms and sedigrams, and was evaluated afterwards, both in Mexico and in Costa Rica. In Nicaragua, calibration was done based on total soil loss values (for a year) and was later on validated with soil loss values for two years. This study emphasizes the importance of calibrating the model in watersheds. The model cannot simulate the effect of soil crust formation on hydrograms and sedigrams, but can predict yearly runoff and soil loss.

*Index words:* Soil erosion, modeling, soil degradation.

*Palabras clave:* Erosión, modelación, degradación.

### INTRODUCCIÓN

En América Latina, es necesario contar con un modelo que permita conocer y determinar con precisión la asociación entre la erosión hídrica y su efecto en la productividad de los suelos. Además, sería importante conocer cuáles de las lluvias de las que se presentan durante el año son las que producen mayor degradación por erosión hídrica; esto permitiría planear acciones de prevención y control en áreas que sean susceptibles a ser erosionadas.

En México, en la última década, las áreas seriamente afectadas por erosión se han incrementado (Becerra *et al.*, 1993); Moreno (1998) reportó que la erosión afecta 85% de la superficie. Prat *et al.* (1996) reportaron pérdidas de suelo de 10 a 30 t ha<sup>-1</sup> en suelos tepetatosos; Fechter-Escamilla *et al.* (1966)

<sup>1</sup>Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México, México.

(jarev@taurus1.chapingo.mx) § Autor responsable.

<sup>2</sup>Department of Geography and International Development Studies, Roskilde University. Hus 19.2, P.O. Box 260, 4000 Roskilde, Denmark. (veihe@ruc.dk)

<sup>3</sup>Institute of Water and Environment, Cranfield University at Silsoe, Bedfordshire MK45, 4dt, UK. (j.quinton@lancaster.ac.uk)

<sup>4</sup>Institute for Land and Water Management, Federal Agency for Water Management. A-3252, Petzenkirchen, Austria. (ik@baw.bmlf.gv.at)

<sup>5</sup>Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. 2060 San Pedro, Costa Rica. (fsancho@cariari.ucr.ac.cr)

mencionaron que después de seis años de haber rehabilitado un suelo tepetatoso, las tasas de erosión se redujeron a 2.3 y a 3.7 t ha<sup>-1</sup>, en suelos de México. En el caso de Costa Rica, Sancho (1991) indicó que, en plantaciones de café, la pérdida de suelo tiene un intervalo de 2 a 42 t ha<sup>-1</sup>, la tasa de erosión varía de acuerdo con las prácticas de manejo mediante el uso de cubiertas vegetales.

En la zona sur de México y América Central, la erosividad de las lluvias es alta, pero pocas tormentas generan altas tasas de pérdida de suelo (Vahrson, 1990).

El objetivo del presente estudio fue calibrar y evaluar el Modelo Europeo de Erosión del Suelo (EUROSEM), en México, Nicaragua y Costa Rica. Este modelo permite simular, para cada lluvia, la cantidad de sedimento transportado en función del tiempo, el gasto máximo, la ubicación de los sitios donde se produce la erosión por canalillos y entre canalillos, así como también el lugar donde se depositan.

Uno de los modelos más conocidos internacionalmente para cuantificar la pérdida de suelo es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), propuesta por Wischmeier y Smith (1978); sin embargo, mediante esta ecuación se obtienen valores anuales de pérdida de suelo (método que genera datos sobreestimados) y no indica cuáles son las lluvias que generan mayores pérdidas de suelo durante el año, tampoco el destino final de dichos sedimentos. Se conoce ampliamente que la erosión afecta de forma directa la productividad del suelo, debido a que destruye la estructura superficial, reduce la infiltración del agua, incrementa el escurrimiento superficial erosivo, reduce la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y aumenta la pérdida de nutrientes, en especial nitrógeno, fósforo y materia orgánica (Oyedele, 1996). También se reporta el asolvamiento de presas y sistemas de drenaje urbanos, así como la eutroficación de los embalses y cuerpos de agua.

El proyecto Índices de Productividad y su Sensibilidad a la Erosión (SPIES) se desarrolló en cooperación con universidades de Austria, Inglaterra, México, Nicaragua y Costa Rica, con el propósito de desarrollar un sistema de decisión. Se utilizaron herramientas computacionales modernas, como un Sistema de Información Geográfica (SIG). En el presente estudio se utilizó el Arc View con el cual pueden generarse escenarios de manejo que reflejan, por ejemplo, cambios de uso del suelo y prácticas de

conservación de suelos para evaluar el impacto de éstas en la productividad del suelo (Folly *et al.*, 1999; Veihe *et al.*, 1999; Magagna *et al.*, 2000). IPSE consiste en la aplicación del Modelo Europeo de Erosión del Suelo (EUROSEM), basado en un evento (Morgan *et al.*, 1998a) ligado a un modelo semi-empírico de índices de productividad SOFIC (Soil Fertility Index Calculator) (Waldingbrett, 1998), el cual opera con datos mensuales y se ha desarrollado, en particular, para México, Nicaragua y Costa Rica.

El modelo simula el efecto en el tiempo de la pérdida de suelo sobre su productividad; además, genera lluvias que mediante técnicas estocásticas busca reproducir las características más importantes de las lluvias erosivas (Strauss *et al.*, 1999).

Antes de aplicar al modelo SPIES, es muy importante evaluar su funcionamiento para asegurar que el modelo predice la realidad. Debido a la dificultad de medir algunos parámetros de alta variabilidad espacial, la utilización del Manual de EUROSEM permite realizar el procedimiento de evaluación del modelo EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998b). Varios modelos empíricos se han evaluado en América Latina; en México, se han utilizado y adaptado a las condiciones del país la EUPS (Figueroa *et al.*, 1991), el Modelo de Producción del Agua (Oropeza, 1993), y el modelo SWRRB (Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management); pero todos han mostrado una precisión baja en la predicción de la pérdida de suelo. Hasta el presente, la evaluación de EUROSEM se ha realizado sólo en Bolivia donde se simuló el efecto amortiguador del surcado (Quinton y Rodríguez, 1999); el problema que se presentó fue que no hubo una buena respuesta entre la lluvia simulada y los valores observados de erosión, por lo cual las conclusiones no son del todo confiables. Recientemente, una nueva versión de EUROSEM se ha evaluado en varios lugares de Europa y Estados Unidos, donde se han obtenido buenos resultados a escala puntual y de cuenca (Albaledejo *et al.*, 1994; Quinton, 1994; Quinton y Morgan, 1998; Folly *et al.*, 1999).

En México y Costa Rica, el modelo EUROSEM se calibró y se evaluó mediante simuladores de lluvia y parcelas de escurrimiento. En Nicaragua, se utilizaron sólo parcelas de escurrimiento. En un futuro no muy lejano, el modelo EUROSEM podrá ser utilizado en las cuencas para la predicción de pérdidas de suelo, calibrado y validado mediante simuladores de lluvia y parcelas de escurrimiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### El Modelo EUROSEM

Para el desarrollo de la presente investigación, se utilizó el modelo EUROSEM que usa etapas cortas de tiempo (minuto) (Morgan *et al.*, 1998a) y permite modelar los procesos de erosión del suelo en un área con propiedades uniformes (elemento); posteriormente, cada elemento se une con el contiguo de aguas abajo en forma de cascada hasta la parte más baja del cauce para así conformar una microcuenca (Woolhiser *et al.*, 1990) (Figura 1).

Los procesos de erosión del suelo se desarrollan por una serie de algoritmos concatenados que componen el modelo. Los datos requeridos por el modelo EUROSEM se enlistan a continuación:

a) **del suelo:** textura, conductividad hidráulica, cohesión, rugosidad, presencia y tamaño de los canalillos; b) **de la vegetación:** tipo de vegetación, fecha de siembra, porcentaje de densidad de cobertura del dosel y altura de las plantas; c) **de la cuenca:** fisiografía, longitud y ancho de los surcos, distancia entre surcos, topología de las plantas y posición y tamaño de los canales permanentes; y d) **meteorológicos:** datos de lluvia de alta resolución (pluviogramas de vuelta diaria) y temperatura.

El modelo calcula la pérdida de suelo que se define como el producto del volumen de escurrimiento y la concentración de sedimentos en éste, con lo que puede calcularse el volumen de sedimento que pasa por un punto en un tiempo determinado mediante la solución numérica de la ecuación de balance dinámico de masas:

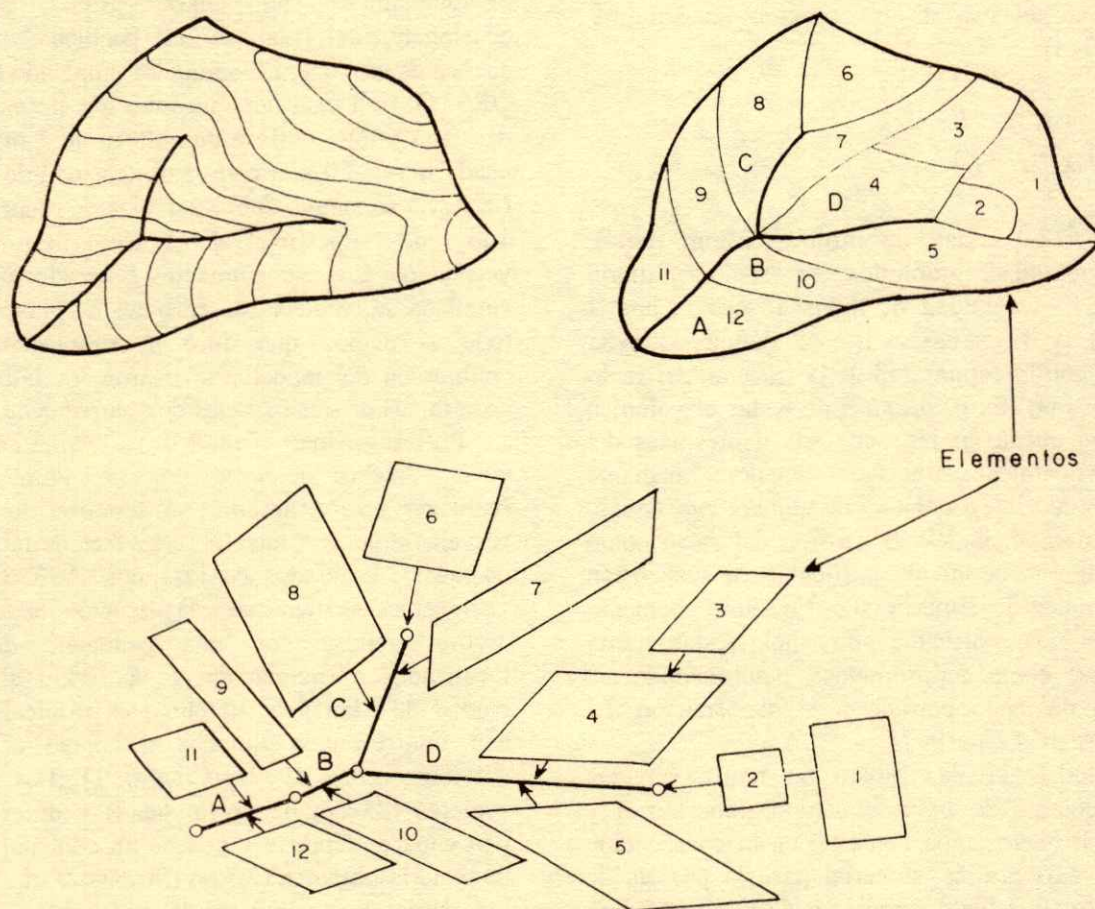


Figura 1. Descomposición de una cuenca en una red de elementos en cascada.

$$\partial \frac{(AC)}{\partial t} + \partial \frac{(QC)}{\partial x} - e(x, t) = q_s(x, t)$$

Donde: A = Área de la sección transversal (m<sup>2</sup>), C = concentración de sedimentos (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), Q = descarga (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), t = tiempo (s), x = distancia horizontal (m), e = pico máximo de sedimentos del lecho por unidad de longitud del flujo (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>) y q<sub>s</sub> = entrada lateral o extracción de sedimentos por unidad de longitud del flujo (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Los procesos de erosión del suelo se desarrollan por una serie de algoritmos concatenados que componen el modelo (Figura 2).

En primera instancia, una parte de la lluvia cae directamente al suelo, otra es interceptada por el dosel, otra cae de las hojas directamente al suelo y, por último, el volumen de agua que fluye por los tallos. El modelo calcula la energía cinética de los anteriores componentes, también calcula la degradación por salpicado, modela la infiltración del agua mediante el uso de la ecuación de Smith y Parlange (1978):

$$f_c = K_s \frac{\exp(F/B)}{\exp(F/B) - 1}$$

Donde: f<sub>c</sub> = capacidad de infiltración (mm min<sup>-1</sup>), K<sub>s</sub> = conductividad hidráulica en suelo saturado (mm min<sup>-1</sup>), F = cantidad de lluvia absorbida por el suelo (mm), y B = parámetro de déficit de agua relacionado con la capilaridad de la fracción del suelo menor que 2 mm (mm); después de restar el volumen de agua que queda en las pequeñas depresiones del suelo, el escurrimiento superficial se calcula mediante el empleo de la ecuación de onda cinemática. Posteriormente, se modela la erosión del suelo como un intercambio continuo de partículas en suspensión del escurrimiento superficial. En un momento determinado, las partículas de suelo están tanto erosionándose como depositándose, determinando así la cantidad de suelo perdido o la depositación del mismo (Morgan *et al.*, 1997).

La metodología de trabajo se realizó en las siguientes etapas: de oficina, campo, laboratorio y oficina. La primera etapa consistió en la consecución de material cartográfico, material para la parcela de escurrimiento superficial, simulador de lluvia (México y Costa Rica), botes para recolectar el escurrimiento superficial y delimitación de la cuenca (previa visita de campo). La segunda etapa consistió en un recorrido de campo para seleccionar la cuenca, realización de la

simulación de la lluvia, toma de muestras del escurrimiento superficial y medición de las variables requeridas por el modelo (México y Costa Rica); para el caso de Nicaragua, se tomaron las muestras de suelo según la metodología de la EUPS. La tercera etapa fue de laboratorio, donde se determinaron las variables físicas requeridas por el modelo; la última etapa consistió en ejecutar el programa del modelo EUROSEM con los datos, tanto de campo como de laboratorio de cada país. En México, se seleccionó la cuenca de Coatlinchán, estado de México, ubicada a 50 km al noreste de la ciudad de México, D.F. La precipitación media de mayo a octubre es de 600 mm, la temperatura media es de 15 °C. Los suelos son Vitrand con clasificación textural predominante de franco arcillo arenosa (Cuadro 1), la profundidad efectiva promedio es de 40 cm, pero en algunos lugares es de 25 a 30 cm donde se presenta un duripan (tepetate). En la zona de trabajo, los cultivos predominantes son maíz, trigo, cebada y, ocasionalmente, calabaza. La pendiente media de la cuenca es de 10%. El simulador empleado fue del tipo ORSTOM, el cual tiene un tubo que permite la salida del agua y que oscila a una altura de 3 m; la presión usada fue de 50 kPa con una intensidad de 31 mm h<sup>-1</sup>. La lluvia se simuló sobre parcelas de escurrimiento de 1 m<sup>2</sup> de superficie de suelo, desprovistas de vegetación. Los escurrimientos generados por la lluvia simulada se recolectaron en botes de plástico, durante todo el tiempo que duró la simulación. Para la calibración del modelo, se usaron los hidrogramas y sedigramas de tres parcelas de escurrimiento.

Posteriormente, el modelo se evaluó con datos de siete parcelas de escurrimiento. Para el trabajo realizado en Nicaragua, se tomaron los datos de parcelas de escurrimiento de 22.8 m de largo por 2 m de ancho, generados en los años 1993 a 1995; son Cambisoles vérticos de clasificación textural franco arcillo arenosa con una pendiente de 15% y localizados aproximadamente a 10 km al sur de la ciudad de Managua. El clima es tropical de sabana con una estación lluviosa de mayo a noviembre (Pfeffer *et al.*, 1997) (Cuadro 1). Los suelos son someros (25 cm de profundidad) y descansan sobre una capa de tepetate y poseen un contenido adecuado de materia orgánica (2.5%) (Strauss *et al.*, 1996). Con los datos de suelo perdido obtenidos en 1993, se calibró el modelo; la validación se efectuó con los datos de los años 1994 y 1995. Previa remoción de las costras, los sedimentos generados por las lluvias se recolectaron mediante el uso de una rueda tipo

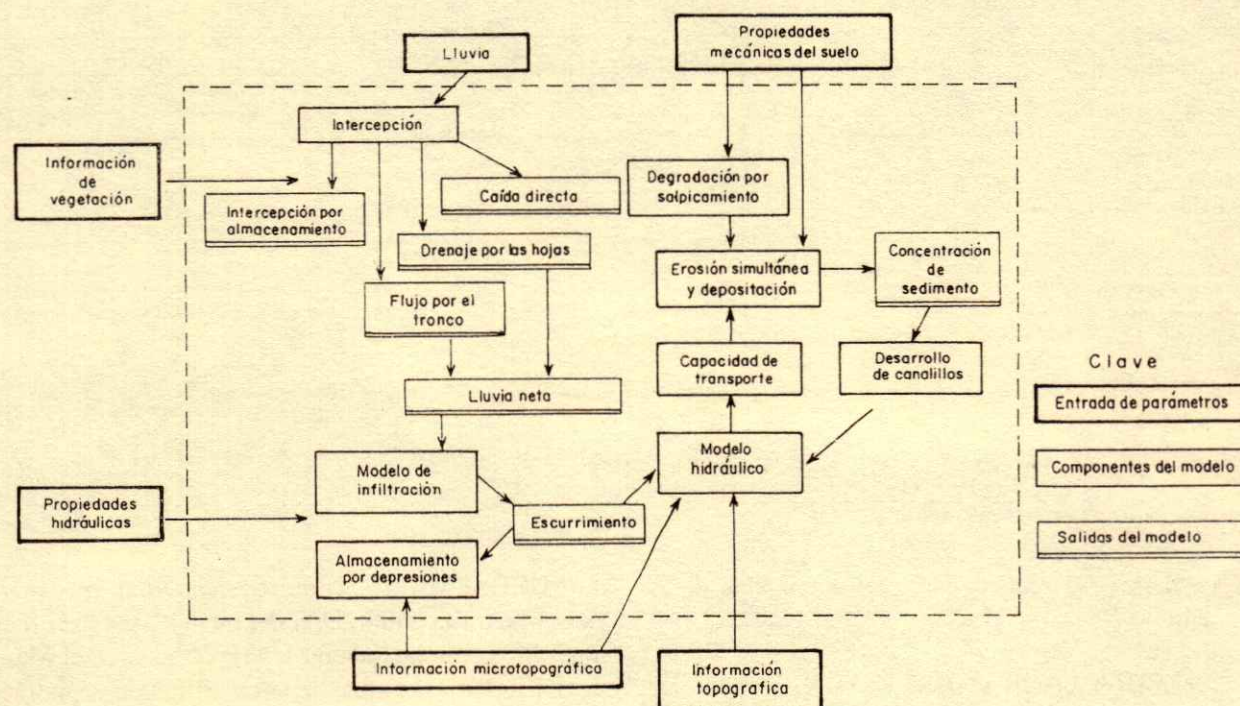


Figura 2. Diagrama de flujo del modelo EUROSEM.

Coshocton. En 1994, se midieron los canalillos para conocer el volumen de suelo perdido por este tipo de erosión (Strauss *et al.*, 1996).

En la cuenca El Salitral, localizada en la población de Santa Ana, Costa Rica, se simuló la lluvia en ocho puntos representativos de los diferentes tipos de uso (Cuadro 1) sobre parcelas de escurrimiento de 2.5 m por 1.5 m de ancho, en las cuales se recolectaron, en botellas, todos los sedimentos que venían en los escurrimientos superficiales. En la simulación de la lluvia, se usó un tubo (Marca Lechler 460 848 SECE)

a una altura de 3 m sobre la superficie del suelo; la presión usada fue de 130 kPa y una intensidad de  $132 \text{ mm h}^{-1}$ , para poder generar el escurrimiento superficial. La energía cinética de las gotas de lluvia fue de  $8.7 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ , con un diámetro de gota de 1.06 mm, medido por un sistema láser (tipo OAP2600X), la uniformidad de la lluvia, según el coeficiente de Christiansen, fue de 81.3% (Christiansen, 1942). La calibración del modelo EUROSEM se llevó a cabo con datos de las parcelas de escurrimiento con los cultivos de maíz, pasto, y

Cuadro 1. Características de los sitios experimentales usados en la simulación de lluvias.

Uso del suelo	Clasific. del suelo	Clasific. textural	Pendiente	Conduc. hidráulica	Contenido de humedad	Cobertura del dosel	Cobertura del suelo	Altura del dosel
		USDA	%	$\text{mm h}^{-1}$	----- % -----			m
<b>Costa Rica</b>								
Desnudo	Dystrustep	FA <sup>†</sup>	19	56	26 - 36			
Maíz	Dystrustep	FA	13 - 17	26	26	40	25	1.5
Café	Dystrustep	FA	33	12	28 - 30	90	70	0.6
Pastizal	Usthorlent	FAA	39	60	32		90	
<b>Nicaragua</b>								
Desnudo	Cambisol	FAA	14	7	30			
<b>México</b>								
Desnudo	Vitrand	FAA	10 - 32	2 - 13	3 - 26			

<sup>†</sup> FA = franco arcillosa; FAA = franco arcillo arenosa.



**Cuadro 2. Calibración requerida de los datos observados para poder "correr" el modelo EUROSEM (aumento o decremento en los porcentajes de los valores).**

Parámetros de calibración	Costa Rica		Nicaragua	México	
	Maíz	Pasto		Parcelas <sup>†</sup> 24b + 27	Parcelas <sup>†</sup> 10b
<b>Hidrológicos</b>					
Conductividad hidráulica saturada		- 100	+ 185	+ 200	
Porosidad			+ 11		
Contenido de humedad inicial			+ 11		
Red neta de capilaridad	+ 40			+ 50	+ 50
Suelo disgregado					+ 60
Manning's n	0.18				
<b>Del suelo</b>					
Cohesión	+ 100	+ 8	- 20	+ 60	+ 60
<b>Otros parámetros</b>					
Altura y ancho del canalillo			+ 100		
Área total del área del tronco de las plantas (%)		+ 20			

<sup>†</sup> Parcelas de escurrimientos desprovistas de vegetación.

café; la validación se realizó con cuatro parcelas de escurrimiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la cuenca de Coatlinchán, estado de México, se encontró, para la calibración, que el valor de la conductividad hidráulica se incrementó en 200%, en tanto que la red neta de capilaridad disminuyó en 50% (Cuadro 2), debido al efecto del encostramiento en este sitio. Cuando se tomó en cuenta la disgregación del suelo en la Parcela de escurrimiento 10b, de clasificación textural franca, se encontró que la red neta de capilaridad se incrementó en 50% con relación a los valores de los cuadros consignados en el Manual

de EUROSEM. Los valores de cohesión, medidos en campo, para la calibración del modelo, también fueron muy altos en relación con los reportados en el Manual de EUROSEM; éstos hicieron difícil la elaboración del sedigrama; finalmente, se optó por usar el valor del Cuadro A9.2 del Manual, de acuerdo con su clasificación textural (Morgan *et al.*, 1998b). Como puede observarse en el Cuadro 3, los resultados en términos del total del suelo perdido fueron aceptables, ya que los valores simulados fueron muy cercanos a los observados. Sin embargo, se presentó una dificultad para obtener una buena correlación entre los valores observados y simulados para el valor máximo de pérdida del suelo en todas las parcelas de escurrimiento trabajadas, debido al efecto de

**Cuadro 3. Resultados del modelo en la calibración de las lluvias con respecto a la descarga máxima, pérdida de suelo y pico máximo de descarga y sedimento.**

Localización de las lluvias	Descarga		Pérdida de suelo		Pico del escurrimiento		Pico de la pérdida de suelo	
	Sim <sup>†</sup>	Obs <sup>‡</sup>	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs
	----- m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> -----		----- t ha <sup>-1</sup> -----		----- L min <sup>-1</sup> -----		----- g min <sup>-1</sup> -----	
<b>Costa Rica</b>								
Maíz	1686.9	1775.5	3.0	2.2	4.8	5.3	9.6	9.0
Pastizal	140.0	125.3	0.2	0.0	2.5	1.6	14.5	0.1
Café	302.0	648.7	N/D <sup>§</sup>	N/D	4.3	7.9	N/D	N/D
<b>Nicaragua</b>								
1993	2038.0	1485.5	69.3	59.0	N/D	N/D	N/D	N/D
<b>México</b>								
Parcela 10b	171.8	124.0	1.9	2.1	0.6	0.8	7.6	3.7
Parcela 24b	234.6	142.7	0.7	0.8	0.7	1.0	2.2	4.3
Parcela 27	159.5	124.0	1.7	2.3	0.6	0.8	0.7	1.9

<sup>†</sup> simulados; <sup>‡</sup> observados; <sup>§</sup> datos no disponibles.

encontramiento del suelo por el impacto de las gotas de lluvia simulada. Lo anteriormente descrito se observa en la Figura 3, en la cual se muestra que la calibración del sedigráfico e hidrograma del Punto 24a es regular, en tanto que su estimación para los valores máximos es pobre. Durante la validación, se evidenció que los valores usados para la calibración de la Parcela de escurrimiento 10b no se pudieron usar para la validación del parámetro de la textura franca; por consiguiente, los procedimientos de calibración usados para los Puntos 24b y 25 fueron los empleados para la calibración de todos los puntos. Al observar el Cuadro 4, se ve que hay una buena correspondencia entre los valores observados y simulados en lo referente a pérdida total de suelo; exceptuando el Punto 24a, donde la pérdida de suelo observada fue mayor que la simulada. En cuanto al factor de descarga total, la relación es pobre entre los valores observados y simulados; exceptuando a la Parcela 10b. En el Punto 45b, el valor simulado del escurrimiento fue 3.5 veces mayor que el observado. En general, los picos máximos de los escurrimientos simulados fueron altos comparados con los valores observados. La Figura 3 muestra algunos ejemplos de los resultados de la validación. Debido a que el modelo EUROSEM no contempla el proceso de encontramiento dentro de sus parámetros, las simulaciones presentaron un problema general; éste consistió en la calibración, tanto del ascenso del hidrograma como del sedigráfico (ver, en especial, el Punto 10c). El escurrimiento observado casi al inicio

de la lluvia simulada se debe al efecto del encontramiento del suelo, debido al efecto del impacto de las gotas de lluvia en agregados menores que 2 mm de diámetro, situación que suele ser muy común en toda la zona de trabajo (Quantin *et al.*, 1993; Do Noni *et al.*, 1994).

Para obtener una correcta calibración del modelo en Nicaragua, hubo necesidad de realizar varios ajustes en la conductividad hidráulica, la porosidad y el contenido de humedad volumétrica con el fin de obtener un valor adecuado del escurrimiento superficial, ya que EUROSEM no presenta un buen ajuste cuando se toman lluvias individuales (Figura 4). Los resultados de cohesión y dimensiones de los canalillos también se usaron para calibrar el modelo con base en los datos de pérdida total de suelo (Cuadro 2). Cuando se compararon los valores observados con los simulados del escurrimiento total, el modelo se comportó muy bien, tanto en 1994 como en 1995 (Cuadro 4). Con respecto a la habilidad del modelo para predecir el promedio anual de suelo perdido, los valores simulados aumentaron a 56.9 t ha<sup>-1</sup>, siendo los observados de 55.5 t ha<sup>-1</sup>, para el año de 1994; para 1995, los valores de pérdida de suelo observados fueron de 29.7 t ha<sup>-1</sup> y los simulados de 28.3 t ha<sup>-1</sup>, por lo que la diferencia entre los valores observados y simulados no fueron mayores que 5%.

En Costa Rica, en la calibración del sitio bajo el cultivo de maíz, la red neta de capilaridad se incrementó en 40%, la cohesión en 100% y el valor de Manning a 0.18 (Cuadro 2); y obteniéndose un

**Cuadro 4. Resultados del uso del modelo de validación de las lluvias con respecto a la descarga, pérdida de suelo, pico máximo de la descarga y pico máximo de sedimentos en la descarga.**

Localización de las lluvias	Descarga		Pérdida de suelo		Pico del escurrimiento		Pico de la pérdida de suelo	
	Sim <sup>†</sup>	Obs <sup>†</sup>	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs
	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>		t ha <sup>-1</sup>		L min <sup>-1</sup>		g min <sup>-1</sup>	
<b>Costa Rica</b>								
Desnudo 1	478.8	266.1	3.9	3.1	3.7	2.8	30.6	32.8
Desnudo 2	154.2	51.0	0.1	0.1	2.3	1.7	8.5	4.0
Maíz	443.5	914.7	0.0	1.3	4.8	7.8	0.0	12.9
Pastizal	140.0	1043.7	0.2	0.2	2.5	7.7	14.5	3.4
<b>Nicaragua</b>								
1994	1446.9	892.9	56.9	55.5	N/D <sup>‡</sup>	N/D	N/D	N/D
1995	689.0	727.1	28.3	29.7	N/D	N/D	N/D	N/D
<b>México</b>								
Parcela 10b	115.1	100.7	2.7	3.9	0.6	0.8	14.3	21.5
Parcela 24a	165.8	91.7	0.1	1.7	0.6	0.5	0.5	4.3
Parcela 45a	135.8	91.7	0.2	0.1	0.6	0.3	1.0	0.8
Parcela 45b	353.9	101.9	0.3	0.4	0.8	0.3	0.7	1.4

<sup>†</sup> simulados, <sup>‡</sup> observados, <sup>§</sup> datos no disponibles.

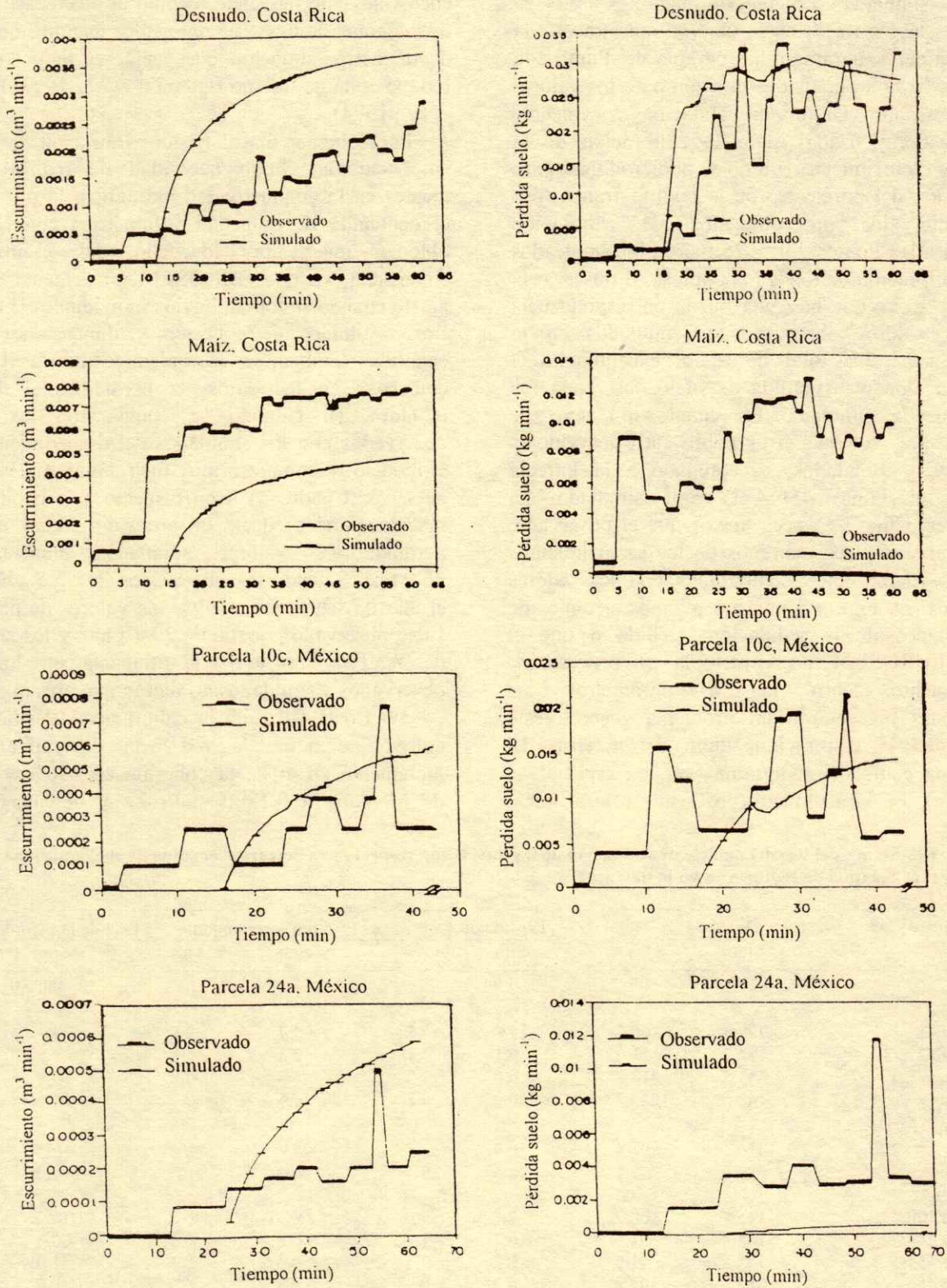


Figura 3. Hidrogramas y sedigramas observados y simulados en el Salitral (Costa Rica) y en Coatlinchán (México).

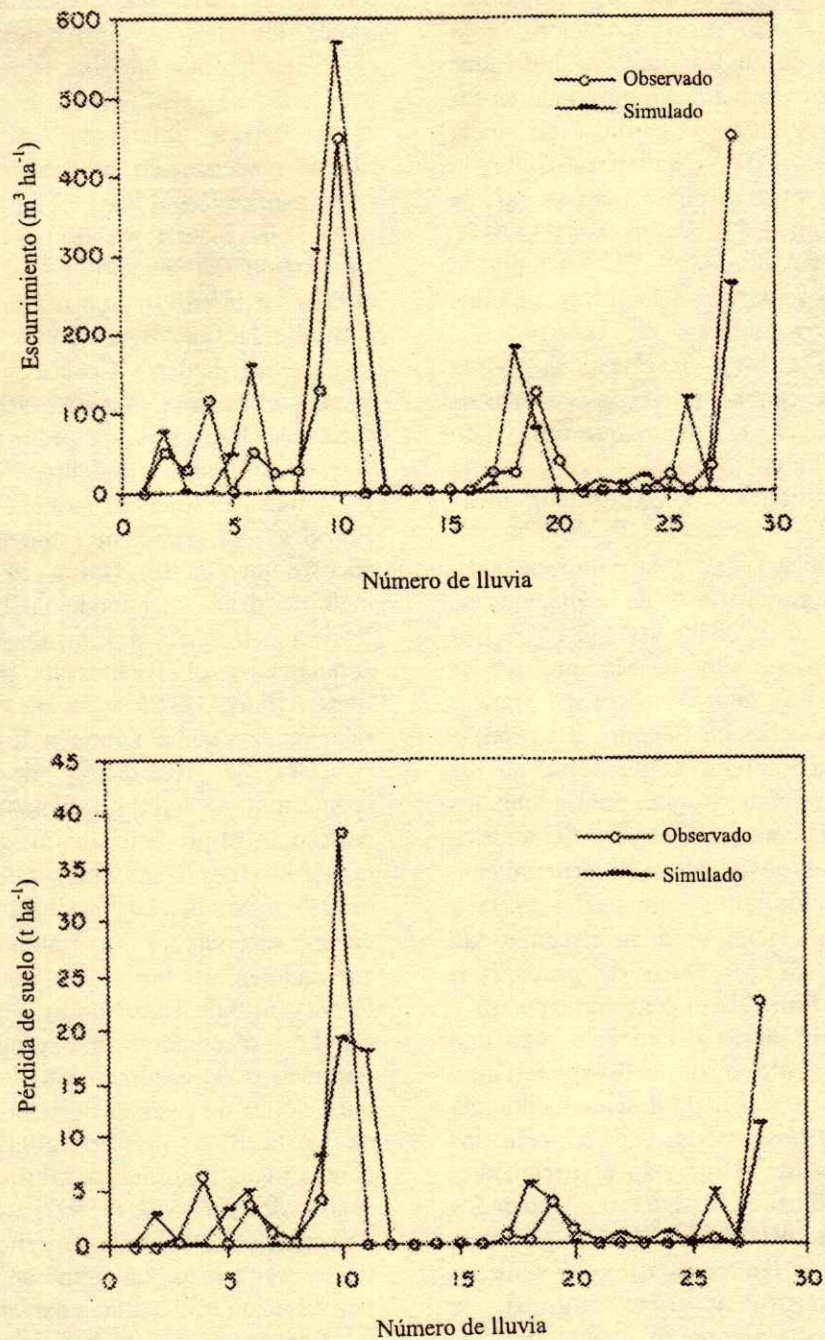


Figura 4. Promedio del escurrimiento y pérdida de suelo por las lluvias de 1994 y 1995 en Nicaragua.

buen ajuste en la realización del hidrograma, pero no en el sedigráfico (Figura 3), no lo presentaron los parámetros de descarga total y pico máximo de pérdida de suelo, y sí el pico máximo y pérdida de

suelo y escurrimiento (Cuadro 3). En la validación del modelo para los suelos desnudos, se presentó una alta certeza en la predicción en los valores de pérdida de suelo y en el pico máximo de pérdida de suelo; lo

mismo sucedió para los valores de descarga (Figura 3; Cuadro 4). Por otra parte, la comparación de la simulación vs observación en las parcelas cultivadas con maíz, resultó ser correlativamente muy baja en los parámetros de escurrimiento y pérdida de suelo (Cuadro 4). Lo anterior pudo haber sido por la diferencia de pendiente entre el punto tomado para la calibración (17%) y el de la validación (13.5%). Estudios realizados por Veihe *et al.* (2000) reportan que la estimación de pérdida de suelo entre canalillos es muy sensible a los cambios de la pendiente, situación que también influye en el cálculo de la capacidad de transporte cuando se usa la ecuación de Govers (Govers, 1990); el otro factor que influyó en los resultados de la simulación de las lluvias es la variación espacial local de las propiedades hidráulicas del sitio experimental.

Los parámetros utilizados para la calibración del modelo fueron: área total del tronco de la plantas que se incrementó en 20%, el de conductividad hidráulica saturada decreció 100%, el valor de Manning fue de 0.5; se usó el máximo valor de los cuadros del Manual de EUROSEM para la cohesión (Cuadro 2). Aunque el valor de la descarga total fue conveniente, no fue suficiente para hacer el hidrograma, por lo que los resultados de la validación no fueron satisfactorios (Cuadro 4). Los valores observados de escurrimiento y pérdida de suelo de los sitios bajo pastos difieren mucho; una posible explicación de dicha irregularidad puede ser que arriba de los sitios de pastizal se encuentran parcelas con surcado al contorno de maíz.

Los intentos de calibración del modelo para uno de los sitios con el cultivo de café se fallieron (Cuadro 3), ya que los valores de la descarga simulada fueron la mitad de los observados, pero al incluirlos en el modelo para generar el máximo escurrimiento, éstos se encontraron dentro de los intervalos indicados en el Manual de EUROSEM. Una explicación probable es el efecto de reducción del escurrimiento por unas terrazas construidas a lo largo de la pendiente. Es conveniente tomar en cuenta que los bordos de las terrazas pudieran concentrar el escurrimiento, por lo que se corre un alto riesgo de erosión si éstos se rompen. Si el experimento se hubiera diseñado siguiendo la pendiente de los surcos de la terraza, no se hubieran presentado los problemas anteriormente descritos; esto no fue posible porque implicaba una modificación del simulador que no era posible realizar durante el desarrollo del experimento. Debido a que los valores de los resultados de los sitios de trabajo, tanto de la calibración como los de

validación, daban una respuesta similar, se decidió no validar los sitios con cultivo de café.

Considerando que todos los sitios de los países en los que se realizó el presente estudio tenían características diferentes, el modelo no presentó alguna tendencia en su calibración. Para la zona de pastizales en Costa Rica, el parámetro de área total del tallo de las plantas resultó ser muy determinante en la calibración del modelo. En general, se puso mucho énfasis en la calibración del modelo para poder tener confiabilidad en los resultados. Debido a la presencia de costras (México y Costa Rica) en la simulación por evento, el modelo encontró dificultad para simular la forma del hidrograma y sedigrama. En la actualidad, con el programa Modelling Within Storm Erosion Dynamics, auspiciado por la Comisión Económica Europea, se está investigando el problema del encostramiento; se aspira, al finalizar esto, poder incluirlo dentro del modelo EUROSEM. A pesar de los inconvenientes mencionados, los valores simulados y observados de pérdida total del suelo fueron muy cercanos aunque, a menudo, no se relacionaban con el volumen de escurrimiento.

Para la realización de los hidrogramas y sedigramas sí hubo problemas. En Costa Rica, en particular, se presentó una inexplicable variabilidad en la pérdida de suelo, razón por la cual Wendt *et al.* (1986) y Nolan *et al.* (1997) recomendaron realizar varias repeticiones en trabajos que se hagan con simuladores de lluvia, ya que McIsaac y Mitchell (1992), usando simuladores de lluvia, encontraron en estudios efectuados una gran variabilidad en los parámetros de escurrimiento y pérdida de suelo. Las variaciones de pérdida de suelo en la zona de pastizal de Costa Rica no sólo refleja una variación en la conductividad hidráulica saturada y puede ser debida, según Morgan *et al.* (1997), a la cantidad de material de suelo suelto sobre la superficie de pasto ocasionada por el impacto de las gotas de lluvia o cualquier otra perturbación hecha a la superficie del suelo.

Por otra parte, también interviene el tamaño de la parcela en los resultados finales. Wischmeier y Mannering (1969) y Auerswald y Eicher (1992) observaron que en lluvias naturales el escurrimiento era casi instantáneo, pero cuando se usaban simuladores de lluvia, el lapso se incrementaba al disminuir la parcela, lo anterior se observó en la parcela de 1 m<sup>2</sup>, utilizada en México.

El modelo EUROSEM es incapaz de simular el efecto del encostramiento tampoco cualquier otro cambio en las características de la superficie del suelo

durante una lluvia, situación que se presenta en los suelos tepetatosos de México (Rivera y Oropeza, 1996). La simulación de un escurrimiento inicial rápido hubiera sido posible usando valores bajos de la conductividad hidráulica saturada, pero esto hubiera sido a costa de valores de escurrimiento muy alto, los cuales hubieran estado muy lejos de los observados.

Auerswald y Eicher (1992) indicaron que el efecto del viento debe tomarse en consideración, ya que los errores se incrementan en las parcelas pequeñas. Este problema se presentó en Costa Rica, donde el viento se presentó durante todo el día en que se efectuó el experimento, ello se debió a que los sitios de trabajo estaban ubicados en un valle muy estrecho. Otra fuente de error se ocasionó por las características del simulador usado en Costa Rica, donde la energía cinética y el volumen medido de la gota de lluvia, en promedio, fueron la mitad de lo esperado para lluvias de esa intensidad (Hudson, 1989). El modelo EUROSEM asume que la energía cinética de la lluvia simulada que cae directamente al suelo posee una distribución del tamaño de la gota, como la descrita por Marshall y Palmer (1948), que es tres veces más alta que la del simulador usado en Costa Rica; no obstante, los valores de pérdida de suelo simulados son mucho más bajos que los observados, indicando que el modelo subestima el efecto de la destrucción del agregado y del escurrimiento superficial. Por otra parte, la distribución del tamaño de la gota del simulador, usado en Costa Rica, fue muy sesgada en comparación con las distribuciones reportadas por Hudson (1989) para intensidades de lluvias simuladas, lo que significa que el impacto de la gota pudiera ser menor que el de una lluvia natural. Assouline *et al.* (1997) puntualizaron que lo anteriormente descrito puede deberse al efecto acumulado de la energía cinética de la gota que causa un sellado de la superficie del suelo y, por consiguiente, mayor erosión.

Las predicciones de pérdida de suelo anuales son optimistas usando EUROSEM, ya que los valores observados y simulados no difirieron arriba de 5% en los trabajos efectuados en Nicaragua durante los años 1994 y 1995. Cuando la variación de localización y tamaño de los canalillos es baja durante el año, el uso del modelo es promisorio, siempre que las dimensiones de canalillos individuales le sean especificadas al modelo antes de que éste se utilice. Si bien es cierto que el modelo EUROSEM presenta problemas asociados cuando se realiza la simulación

por eventos para México, Nicaragua y Costa Rica, para el caso de la predicción de escurrimiento y pérdida de suelos anuales, el modelo provee buenos resultados cuando se realice una buena calibración con base en varias repeticiones de los sitios experimentales. Como en varios de los países en que se trabajó el modelo hay presencia de pastizales y de terrazas, es conveniente realizar investigaciones en estas áreas para poder usar el modelo de manera adecuada. Es muy conveniente trabajar en el monitoreo del desarrollo de la variación espacial y temporal de los canalillos, en especial en México y Nicaragua; también se requiere incursionar en la modelación de la dinámica de los canalillos en EUROSEM.

## CONCLUSIONES

- El modelo EUROSEM es promisorio para la predicción del gasto anual y la pérdida de suelo anual cuando la variación de localización y tamaño de los canalillos sean pequeños durante el año; no así para predecir los mismos factores en lluvias individuales.
- El encostramiento de los suelos por efecto del impacto de las gotas de lluvia causó problemas para la calibración, debida a que este factor no está integrado en el modelo EUROSEM.
- Es conveniente realizar investigaciones en suelos con terrazas y cultivos de pastos, en el monitoreo del desarrollo de la variación espacial y temporal de los canalillos.
- Involucrar, en el modelo EUROSEM, la dinámica de los canalillos, así como el factor de encostramiento del suelo.

## AGRADECIMIENTOS

A la Comisión de la Comunidad Europea por financiar la realización del proyecto SPIES (Soil Productivity Indices and their Erosion Sensitivity) (contrato ERBIC 18CT960096). A las siguientes instituciones: Roskilde University, Universidad Autónoma Chapingo, Cranfield University at Silsoe, Federal Agency for Water Management, Universidad de Costa Rica y Universidad Nacional Agraria. Por su colaboración en el trabajo de campo, a Alexander Waldingbrett (BOKU, Austria), a Mario Villatoro (CIA, Universidad de Costa Rica) y a Ángel Torres Estrada (Universidad Autónoma Chapingo).

## LITERATURA CITADA

- Albaledejo, J., V. Castillo y M. Martínez-Mena. 1994. EUROSEM: Preliminary validation on non-agricultural soils. pp. 314-325. *In*: Rickson, R. (ed.). *Conserving soil resources: European perspectives*. CAB-International. Wallingford, UK.
- Assouline, A., A. El Idrissi y E. Persoons. 1997. Modelling the physical characteristics of simulated rainfall: A comparison with natural rainfall. *J. Hydrology* 196: 336-347.
- Auerswald, K. y A. Eicher. 1992. Comparison of German and Swiss rainfall simulators accuracy of measurement and effect of rainfall sequence on runoff and soil loss rates. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 155: 191-195.
- Becerra M., A., J.L. Tovar S., E. Ojeda T. y M.L.M. Ortiz S. 1993. La erosión y su tasa de cambio en Coatlinchan, estado de México. pp. 377-380. *In*: Figueroa R., J.F. (ed.). *Manejo y conservación del suelo y agua*. Primera reunión nacional, 12-15 August 1992. Colegio de Postgraduados, Montecillo, estado de México.
- Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by sprinkling. Bulletin 670. Agricultural Experimental Station, University of California. Berkeley, CA.
- De Noni, G., J.L. Janeau, C. Prat, G. Trujillo y M. Viennot. 1994. Hydrodynamique, érodabilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique Latine (Equateur, Mexique et Nicaragua): Impact du matériel originel et effet de la réhabilitation agricole. ORSTOM. Paris, France.
- Fechter-Escamilla, U., A. Vera y G. Werner. 1996. Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) en el bloque de Tlaxcala, México. pp. 351-358. *In*: *Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos volcánicos endurecidos*. Montecillo, México.
- Fetwi, G.F. 1993. The impact of erosion on soil productivity: Model development and validation with special reference to low input agriculture. Ph.D. Thesis. Cranfield University. Silsoe, UK.
- Figueroa S., B., A. Amante O., H.G. Cortés T., J. Pimentel L., E.S. Osuna C., J.M. Rodríguez O. y F.J. Morales F. 1991. *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F.
- Folly, A., J.N. Quinton y R.E. Smith. 1999. Evaluation of the EUROSEM model using data from the Catsop watershed, The Netherlands. *Catena* 37(3-4): 507-519.
- Govers, G. 1990. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow. *International Association of Hydrological Sci. Publ.* 189: 45-63.
- Hudson, N. 1989. *Soil conservation*. Batsford. London, UK.
- Magagna, B., A. Folly, K. Hoenninger, A. Muhar, J. Quinton, F. Sancho y P. Strauss. 2000. The SPIES Model: Data flow and GIS linkage between a soil erosion and a soil productivity model. pp. 259-268. *In*: Fullerton, K. (ed.). *Proc. 5th EC GIS Workshop Stresa*. 1999. Space Applications Institute, EC Joint Research Centre, Ispra, EUR 19018 EN, Italy.
- Marshall, I.S. y W.M. Palmer. 1948. Relation of raindrop size to intensity. *J. Meteorology* 5: 165-166.
- McIsaac, G.F. y J.K. Mitchell. 1992. Temporal variation in runoff and soil loss from simulated rainfall on corn and soybeans. *Am. Soc. Agric. Eng* 25(2): 465-472.
- Moreno A., B. 1998. Conservación de suelos y desarrollo sustentable, ¿Utopía o posibilidad en México? *Terra* 16: 181-187.
- Morgan, R.P.C., K. McIntyre, A.W. Vickers, J.N. Quinton y R.J. Rickson. 1997. A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. *Soil Techn.* 11: 291-299.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci y D.T.M. Styczen. 1998a. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes* 23: 527-544.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D.T.M. Styczen y A.J.V. Folly. 1998b. *The European soil erosion model (EUROSEM): Documentation and user guide*. Silsoe College, Cranfield University. Silsoe, UK.
- Nolan, S.C., L.J.P. van Vliet, T.W. Goddard y T.K. Flesch. 1997. Estimating storm erosion with a rainfall simulator. *Can. J. Soil Sci.* 77: 669-676.
- Oropeza M., J.L. 1993. Evaluación de la relación erosión-escurrimiento en pequeñas cuencas agrícolas a partir del modelo de simulación MOPEAU. pp. 110-118. *In*: Figueroa R., J.F. (ed.). *Manejo y conservación del suelo y agua*. Primera reunión nacional. 12-15 August 1992. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Oropeza M., J.L., J.S. Rios B. y L.J. Salazar. 1996. Uso de modelos matemáticos de erosión hídrica para la optimización de la rehabilitación de tepetates con fines agrícolas. pp. 384-396. *Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos*. Quito, Ecuador.
- Oyedele, J.D. 1996. Effects of erosion on the productivity of selected southwestern Nigerian soils. Ph.D. Thesis. Department of Soil Science, Obafemi Awolowo University. Ile-Ife, Nigeria.
- Pfeffer, M., A. Mentler y P. Strauss. 1997. Bodenabtrag und Nährstoffverluste unter einem typischen Fruchtfolgesystem Mittelamerikas, am Beispiel eines dreijährigen Parzellenversuches in Managua/Nicaragua. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 85-III: 1457-1460.
- Prat, C., A. Báez y A. Márquez. 1996. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco, México. pp. 371-383. *Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos*. Montecillo, México.
- Quantin, P., A. Arias, J. Etchevers, R. Ferrera, K. Oleschko, A. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: Caracterización y habilitación para la agricultura (Informe Científico Final del Proyecto TS2-A 212-C CEE/ORSTOM). Edición especial. *Terra* 11.
- Quinton, J.N. 1994. The validation of physically-based erosion models-with particular reference to EUROSEM. Ph.D. Thesis, Cranfield University at Silsoe. Bedford, UK.
- Quinton, J.N. y R.P.C. Morgan. 1998. EUROSEM: An evaluation with single event data from the C5 Watershed, Oklahoma, USA. pp. 65-74. *In*: Boardman, J. y D. Favis-Mortlock. (eds.). *Global change: Modelling. Soil erosion by water*. NATO ASI series I. Global environmental change. Springer-Verlag. London, UK.
- Quinton, J.N. y F. Rodríguez. 1999. Modelling the impact of live barriers on soil erosion in the Pairumani sub-catchment, Bolivia. *Mountain Res. Dev.* 19: 292-299.

- Rivera R., P. y J.L. Oropeza M. 1996. Evaluación del potencial hidrológico y de la producción de sedimentos en tepetates tipo t3 con lluvia simulada. pp. 412-419. *In: Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos*. Quito, Ecuador.
- Sancho, F. 1991. Medición de pérdidas de suelos a través del empleo de parcelas de escurrimiento. pp. 102-115. *In: Memorias Taller de Erosión de Suelos*. Heredia, Universidad Nacional. San José, Costa Rica.
- Smith, R.E. y J.Y. Parlange. 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resour. Res.* 14: 533-538.
- Strauss, P., A. Mentler, G. Murillo y W.E.H. Blum. 1996. Rill erosion versus sheet erosion: A case study from Nicaragua. Paper presented at the Annual Conference of the International Association for Soil Erosion Control. Sitges, Spain.
- Strauss, P.K., F. Konecny y W.E.H. Blum. 1999. A rainfall generation procedure for the European Soil Erosion Model (EUROSEM). *Hydrology and Earth System Sci.* 3: 213-222.
- Vahrson, W. 1990. El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 14: 15-24.
- Veihe, A., B. Magagna, A. Muhar, J. Quinton, F. Sancho, P. Strauss y A. Waldingbrett. 1999. Modelling. Soil productivity changes: The use of the SPIES application in Costa Rica. pp. 35-40. *In: Musy, A. et al. (eds.). Emerging technology for sustainable land and water management*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lusanne, Switzerland.
- Veihe, A., J.N. Quinton y J. Poesen. 2000. Sensitivity analysis of EUROSEM using Monte Carlo simulation II: The effect of rills and rock fragments. *Hydrol. Processes* 14: 927-939.
- Waldingbrett, A. 1988. SOFI model description. Institute of Soil Science, University of Agricultural Sciences. Vienna, Austria.
- Wendt, R.C., E.E. Alberts y A.T. Hjelmfeldt Jr. 1986. Variability of runoff and soil loss from fallow experimental plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 730-736.
- Wischmeier, W.H. y J.V. Mannering. 1969. Relation of soil properties to its erodibility. *Proc. Soil Sci. Soc. Am. J.* 33: 131-137.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Handbook 537. Washington, D.C.
- Woolhiser, D.A., R.E. Smith y D.C. Goodrich. 1990. KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual. USDA Agricultural Research Service ARS-USDA, No. 77. Washington, D.C.



# PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN TERRENOS CON PENDIENTE COMPLEJA DE MÉXICO

## Production of Corn in Complex Slope Soils of Mexico

A. Aguilar†, J.F. Tah I.<sup>1</sup>, A. Torres E.<sup>1</sup>, G. Arévalo G.<sup>1‡§</sup> y J.A. Rey C.<sup>1</sup>

### RESUMEN

El efecto de la posición en un terreno con variaciones en su pendiente se considera importante por la pérdida en la capacidad productiva del terreno, tanto por la erosión hídrica que se produce, como por las diferencias en la retención de humedad para el cultivo. Para estimar el efecto de la pendiente sobre la producción, se trabajó con el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), en cinco sitios de la parte oriental del estado de México, en los años 1997 y 1998. Las variables independientes medidas fueron: la densidad aparente, el punto de marchitez permanente, la capacidad de campo, el porcentaje de humedad del suelo; y las variables dependientes fueron: la biomasa de la parte aérea y el rendimiento de grano. Los resultados obtenidos señalan que la densidad aparente, el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo no se afectan significativamente por la posición en la pendiente de los sitios. La humedad volumétrica acumulada de las muestras fue mayor en las partes o secciones con menor pendiente (A y D), la biomasa y el rendimiento de grano fueron significativamente más altos en las secciones con menor pendiente (A y D).

**Palabras clave:** *Zea mays* L., capacidad productiva, erosión hídrica.

### SUMMARY

It is important to specify the effect of the position on land with slope variation, because of the loss of productive capacity of the soil due to water erosion and the uneven moisture retention for the crops. To estimate the effect of slope on production, maize (*Zea mays* L.) was studied in five locations of the eastern part of the state of Mexico between 1997-1998. The

<sup>1</sup> Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, México. ‡ (garevalo@taurus1.chapingo.mx)

§ Autor responsable.

independent variables measured were bulk density, permanent wilting point, field capacity, and volumetric water content; the dependent variables were biomass from the aerial part and grain yield. The results show that bulk density, permanent wilting point, and field capacity are not seriously affected by the slope. Volumetric water content in the samples was greater in the sections with less slope (A and D), and biomass and grain yield were more abundant in the sections that had less slope (A and D).

**Index words:** *Zea mays* L., productivity capability, hydric erosion.

### INTRODUCCIÓN

Los suelos de cualquier parte del mundo se encuentran afectados por distintos procesos de degradación y uno de los importantes es la erosión.

En México, algunas estimaciones de la erosión de los terrenos reportan valores bastante alarmantes que Figueroa *et al.* (1992) y Andrade (1975) reportaron, por estimación indirecta 80% de la superficie del país; Estrada y Ortiz (1982), por ecuaciones paramétricas, 98% del país; la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1986), por imágenes de satélite, calculó 81% del país; por otra parte, Vázquez (1986) obtuvo un valor medio de la erosión en las cuencas mexicanas, en 46.9 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

La erosión del suelo consiste en el desprendimiento de las partículas individuales y con este fenómeno se pierde paulatinamente la capa superficial del mismo, que es la que posee mayor riqueza nutrimental (Johnson, 1979).

Otros procesos, asociados con los terrenos de pendiente compleja, se refieren a los movimientos del agua en el perfil y los procesos de la lixiviación de los nutrientes, los cuales aceleran la degradación de los suelos (CONAZA, 1993).

Las mediciones de la erosión y sus efectos sobre el rendimiento de los cultivos, se han hecho en

México, principalmente por medio de parcelas de escurrimiento, en las que se cuantifican los valores de suelo arrastrado, los escurrimientos totales y el rendimiento asociado de cada una de las parcelas.

Tomando como base la importancia de los procesos erosivos en la pérdida de productividad, en 1996, se presentó el proyecto SPIES (Soil Productivity Indexes and their Erosion Sensitivity), proyecto en el que participaron Austria, el Reino Unido, Costa Rica, Nicaragua y México.

En el marco del proyecto SPIES, se presenta este artículo que pretende establecer una relación cuantitativa entre la variación de la pendiente de los terrenos con el comportamiento del rendimiento de maíz, durante los ciclos agrícolas de 1997 y 1998.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación de los Sitios

En 1996, durante los primeros talleres realizados del proyecto SPIES, en Viena, se establecieron los lineamientos necesarios para la selección de los sitios en cada uno de los tres países latinoamericanos que participaron.

Básicamente se consideraron las siguientes características que debieron reunir cada uno de los sitios o transectos donde se llevarían a efecto las evaluaciones de la pendiente sobre el comportamiento del cultivo que:

- cada terreno tuviera tres o más variaciones de la pendiente, a las cuales se le llamó "secciones" y que se seleccionaron en función de la pendiente dominante;
- estén ubicadas en regiones básicamente agrícolas;
- la textura en cada uno de los transectos fuera uniforme;
- hubiera al menos tres sitios o transectos en cada uno de los años 1997 y 1998;
- se cultiven en cada transecto dos especies agrícolas (maíz y frijol);
- en cada sitio, fueran ubicadas transversalmente las secciones (A, B, C, D), en la pendiente dominante.

En México, los transectos establecidos fueron cuatro en 1997 y tres en 1998 (Cuadro 1).

Los sitios Acozac I y Acozac II ya no se consideraron para 1998, debido a la falta de seguridad en el cuidado de los cultivos por parte de los dueños de las parcelas.

**Cuadro 1. Sitios y secciones seleccionados en 1997 y 1998.**

Sitio	1997	Sección	1998	Sección
Acozac I	X	A, B, C, D		
Acozac II	X	A, B, C, D		
Juchitepec	X	A, B, C, D	X	A, B, C, D
Santa Catarina	X	A, B, C, D	X	A, B, D
Coatlinchán	X	A, B, C, D	X	A, B, C, D

### Descripción General de los Transectos

De acuerdo con lo señalado en el Cuadro 1, se seleccionaron cuatro sitios en 1997 y tres para 1998, todos ubicados en la parte oriental del estado de México, en los Estados Unidos Mexicanos.

Los cultivos se desarrollaron en condiciones de temporal (ciclo primavera-verano).

**Sitio Acozac I.** Este transecto se encuentra ubicado en una región dominada por lomeríos pronunciados (Figura 1), su material parental es ceniza volcánica, ligeramente cementada con carbonato de calcio, lo que ocasiona que, en algunas partes, haya capas o estratos endurecidos (duripanes).

El régimen climático corresponde a un C(wo)(w)b(i'), que es subhúmedo, con precipitación media anual de 650 mm, con lluvias dominantes en verano y temperatura media anual de 17 °C.

**Sitio Acozac II.** La geomorfología de este sitio es básicamente de lomeríos pronunciados y este transecto se ubicó en la parte superior de uno de los lomeríos.

El material parental dominante son cenizas volcánicas ligeramente cementadas, mezcladas con rocas y gravas de tipo basáltico (Figura 2).

Los materiales que conforman sus suelos se pulverizan con mucha facilidad, por que los terrenos con uso agrícola se encuentran sumamente expuestos y susceptibles a la erosión hídrica y a la erosión eólica.

El régimen climático es C(wo)(w)b(i') que es subhúmedo con precipitación media anual de 650 mm, con lluvias en verano y su temperatura media es de 17 °C.

**Sitio Juchitepec.** La geomorfología es de lomeríos suaves y redondeados, con material parental de cenizas volcánicas, mezcladas con piedras y rocas basálticas (Figura 3).

Los suelos se pulverizan con mucha facilidad por lo que la erosión se presenta tanto en forma hídrica, como en forma eólica.

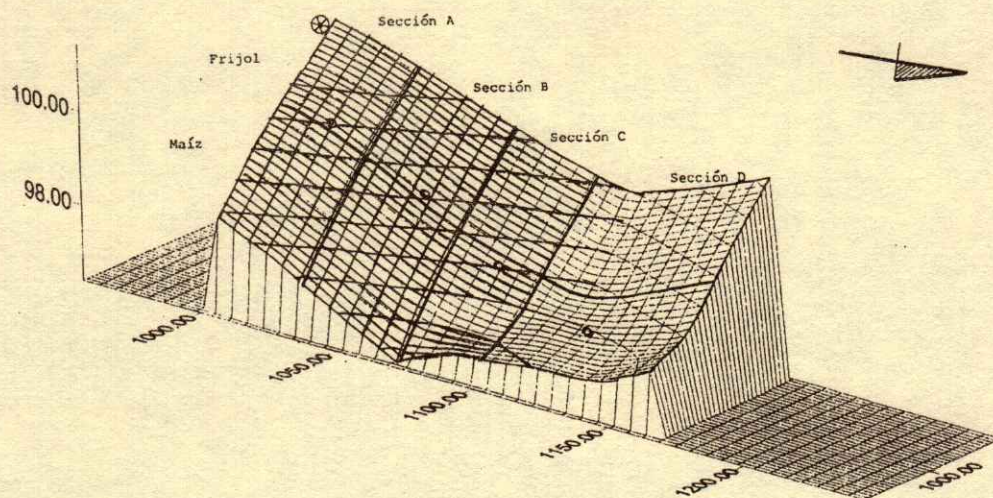


Figura 1. Topografía de la pendiente compleja en el sitio Acozac I. Las letras A, B, C, D indican las posiciones en las cuales se realizaron las evaluaciones.

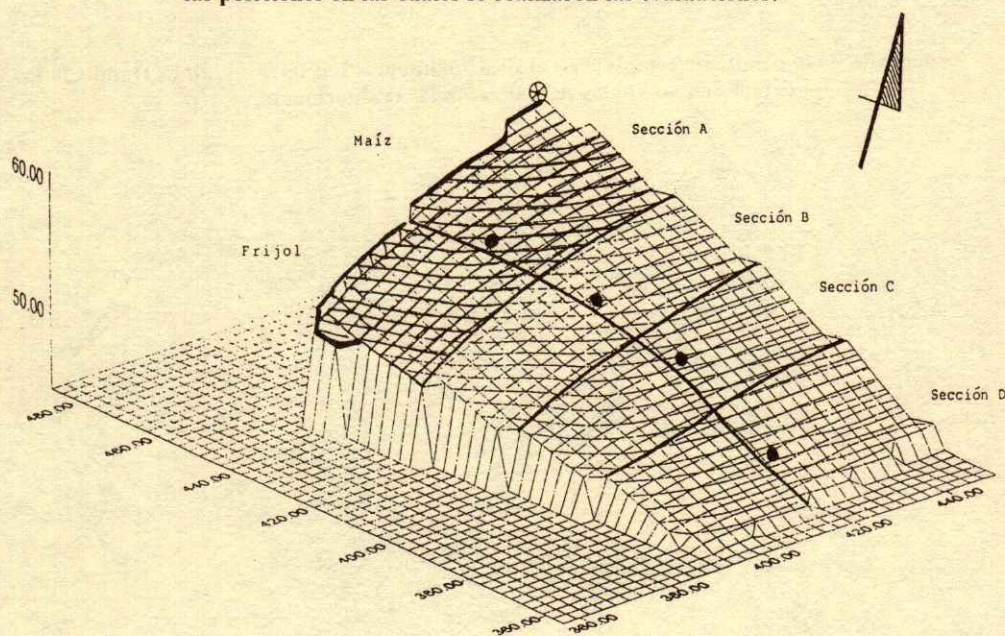


Figura 2. Topografía de la pendiente compleja en el sitio Acozac II. Las letras A, B, C, D indican las posiciones en las cuales se realizaron las evaluaciones.

El régimen climático es subhúmedo con lluvias en verano, siendo su precipitación media anual de 750 mm y su temperatura de 17 °C; el tipo climático se distingue como C(w1)(w)b(i').

**Sitio Santa Catarina.** La geomorfología del lugar está dominada por cerros medios y valles intermontanos, lo que le da una topografía accidentada con pendientes mayores que 10% y, con ello, la formación de cárcavas de grandes dimensiones (Figura 4).

En algunos terrenos de esta localidad, la erosión ha sido tan devastadora, que el suelo se ha perdido totalmente, dejando al descubierto la toba volcánica (ceniza cementada), conocida como tepetate.

El tipo climático es C(wo)(w)B(i') con 730 mm de precipitación media anual, lluvias en verano y una temperatura media de 15 °C.

**Sitio Coatlinchán.** Este transecto se encuentra ubicado dentro de la cuenca conocida como

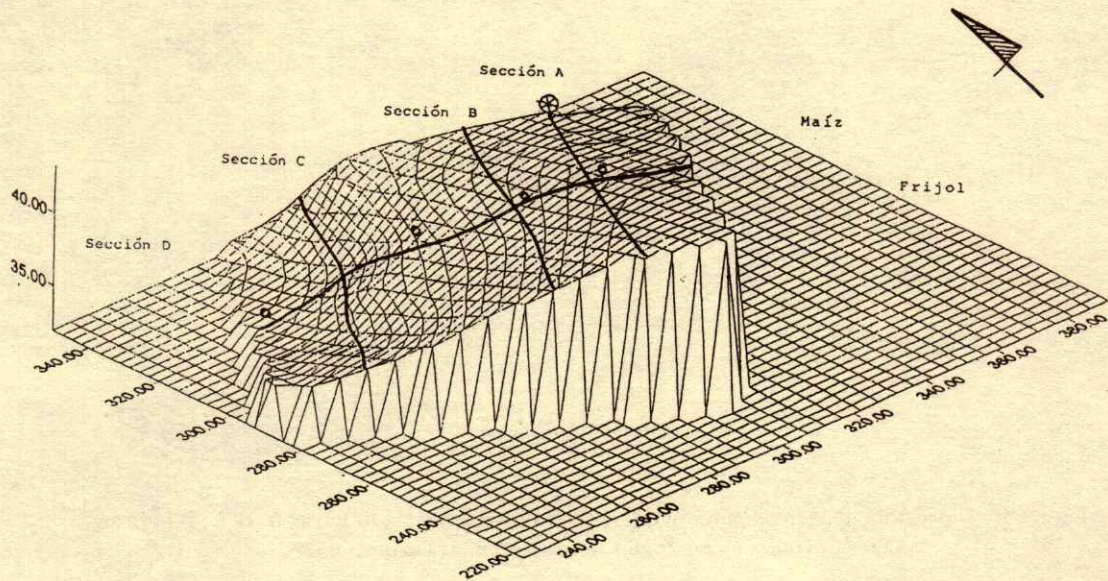


Figura 3. Topografía de la pendiente compleja en el sitio Juchitepec. Las letras A, B, C, D indican las posiciones en las cuales se realizaron las evaluaciones.

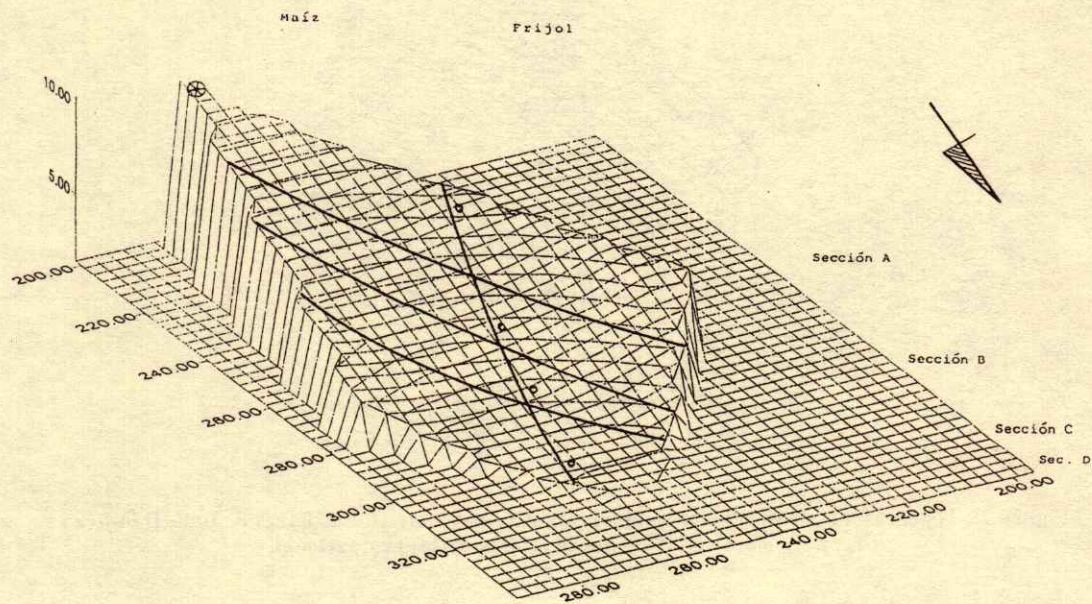


Figura 4. Topografía de la pendiente compleja en el sitio Santa Catarina. Las letras A, B, C, D indican las posiciones en las cuales se realizaron las evaluaciones.

Coatlinchán, a 1 km de la población de idéntico nombre.

Se encuentra en el margen sur de una corriente periódica formada por las escorrentías de las lomas vecinas y superiores.

Su material de origen son cenizas volcánicas, las cuales se cementan entre 40 y 60 cm de profundidad.

Este sitio, en particular, cuenta con texturas finas (franco arcillosas) en la sección A y cambia paulatinamente hasta arenas finas en la sección D.

El tipo climático es C(Wo)(W)b(i') con precipitación media anual de 600 mm y una temperatura media de 12 a 18 °C.

**Cuadro 2 Clasificación de los suelos de cada sección de los sitios estudiados.**

Sitio	Sección A	Sección B	Sección C	Sección D
Juchitepec	Vitrandic eutropept	Vitrandic eutropept	Typic eutropept	Vitrandic eutropept
Acozac I	Typic ustropept	Typic ustropept	Fluventic ustropept	Typic ustropept
Acozac II	Lithic troporthent	Lithic troporthent	Lithic troporthent	Typic troporthent
Sta. Catarina	Lithic troporthent	Typic troporthent	Typic troporthent	Typic udorthents
Coatlinchán	Entic durustoll	Typic durustoll	Lithic ustipsamment	Typic ustipsamment

**Descripción de Suelos**

**Perfiles de suelos.** Todos los suelos de los sitios seleccionados tienen como material parental cenizas volcánicas y, en algunos casos, con cementación en el subsuelo. Son todos suelos jóvenes en los que se distinguen algunas características del material parental (arena fina y arena gruesa, derivada de cenizas volcánicas) (Cuadro 2).

Únicamente en las partes más altas del sitio Coatlinchán se localizan suelos con estratos superiores con mayor cantidad de arcillas.

**Densidad aparente.** Para la obtención de la densidad aparente ( $D_a$ ), se tomaron, en cada uno de los sitios, seis muestras por cada una de las cuatro secciones, a las profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, dando de esta manera un total de  $(6)(4)(2) = 48$  muestras (Cuadro 3).

Estas muestras fueron colectadas por el método del cilindro, para poder medir un volumen exacto e invariable de suelo ( $V$ ), el cual se secó en estufa y se pesó para obtener el peso del suelo seco (PSS) de cada una de las muestras de los cilindros. Con estos datos:

$$D_a = \frac{PSS}{V} \quad (1)$$

**Constantes de humedad.** Para la medición del punto de marchitez permanente (PMP) (Cuadro 4) y la de capacidad de campo (CC) (Cuadro 5), se utilizó el método de la membrana aplicando una presión de 0.33 y 15 atmósferas, respectivamente. El número de muestras en cada sitio fue de 24 en las profundidades de 0 a 20 cm y 24 muestras a una profundidad de 20 a 40 cm.

**Humedad aprovechable.** Utilizando los valores de las constantes de humedad, medidas en las muestras inalteradas, se calcularon los valores del porcentaje de humedad que puede ser retenido por el suelo (HA).

$$HA = (CC - PMP) \quad (2)$$

Ésta puede utilizarse para calcular el porcentaje volumétrico (Cuadros 6 y 7) de agua que puede retener un suelo (VHA), si el valor de humedad aprovechable se multiplica por la densidad aparente ( $D_a$ ).

$$VHA = (CC - PMP) * D_a \quad (3)$$

**Humedad del suelo.** Para conocer directamente el comportamiento de la humedad de los suelos en cada uno de los sitios, se procedió a medir la humedad

**Cuadro 3. Densidad aparente ( $t\ m^{-3}$ ) y su desviación estándar por sitio y sección.**

Sección (Profundidad)	Acozac I Media (Desv)	Acozac II Media (Desv)	Juchitepec Media (Desv)	Santa Catarina Media (Desv)	Coatlinchán Media (Desv)
cm					
A (0 a 20)	1.124 (0.062)	1.055 (0.050)	1.101 (0.076)	1.120 (0.083)	0.986 (0.036)
A (20 a 40)	1.212 (0.074)		1.127 (0.077)	1.123 (0.089)	1.021 (0.055)
B (0 a 20)	1.111 (0.040)	1.014 (0.092)	1.114 (0.067)	1.046 (0.125)	1.055 (0.048)
B (20 a 40)	1.096 (0.020)		1.123 (0.061)	1.071 (0.085)	0.997 (0.085)
C (0 a 20)	1.112 (0.040)	1.074 (0.023)	1.126 (0.072)	1.009 (0.051)	0.972 (0.103)
C (20 a 40)	1.100 (1.068)	1.051 (0.083)	1.125 (0.079)	1.082 (0.080)	1.030 (0.046)
D (0 a 20)	1.066 (0.019)	1.045 (0.058)	1.149 (0.143)	0.967 (0.056)	1.060 (0.055)
D (20 a 40)	1.040 (0.052)	1.006 (0.048)	1.218 (0.096)	0.977 (0.055)	1.128 (0.041)

**Cuadro 4. Punto de marchitez permanente de cada sección en cada sitio.**

Sección (Profundidad)	Acozac I Media (Desv)	Acozac II Media (Desv)	Juchitepec Media (Desv)	Santa Catarina Media (Desv)	Coatlinchán Media (Desv)
cm					
A (0 a 20)	10.82 (0.91)	16.33 (1.21)	11.37 (1.56)	16.67 (1.92)	11.73 (0.62)
A (20 a 40)	11.02 (1.09)		10.97 (1.61)	15.62 (1.77)	12.85 (0.38)
B (0 a 20)	11.88 (0.77)	15.88 (0.57)	11.02 (1.95)	17.27 (1.50)	10.93 (0.87)
B (20 a 40)	12.59 (1.11)		11.43 (3.39)	18.27 (0.95)	11.73 (1.17)
C (0 a 20)	10.98 (0.49)	15.52 (1.52)	12.00 (2.18)	17.42 (0.64)	11.92 (1.63)
C (20 a 40)	12.13 (1.35)	16.37 (0.22)	11.23 (1.82)	17.16 (1.13)	11.33 (0.48)
D (0 a 20)	12.82 (0.70)	15.91 (0.71)	8.960 (1.90)	18.50 (0.54)	12.56 (1.03)
D (20 a 40)	13.25 (1.84)	17.16 (1.17)	10.48 (2.21)	18.68 (1.06)	12.85 (1.41)

**Cuadro 5. Capacidad de campo de cada sección en cada sitio.**

Sección (Profundidad)	Acozac I Media (Desv)	Acozac II Media (Desv)	Juchitepec Media (Desv)	Santa Catarina Media (Desv)	Coatlinchán Media (Desv)
cm					
A (0 a 20)	20.58 (0.83)	28.20 (2.91)	20.19 (3.09)	22.71 (8.26)	23.60 (1.39)
A (20 a 40)	18.00 (8.24)		20.53 (3.48)	27.04 (2.74)	24.76 (1.33)
B (0 a 20)	21.67 (1.32)	26.93 (1.43)	20.14 (3.06)	27.77 (2.53)	21.92 (0.81)
B (20 a 40)	20.14 (7.80)		20.50 (3.64)	28.71 (1.71)	23.42 (1.30)
C (0 a 20)	18.33 (7.50)	27.09 (1.68)	20.82 (3.30)	29.45 (1.76)	25.19 (2.31)
C (20 a 40)	23.14 (0.76)	24.14 (1.92)	19.94 (2.59)	28.43 (2.02)	23.61 (1.33)
D (0 a 20)	23.65 (0.98)	27.67 (1.10)	18.50 (6.55)	29.92 (1.15)	27.37 (2.22)
D (20 a 40)	25.10 (1.51)	27.53 (2.20)	13.47 (5.85)	30.55 (1.38)	28.52 (2.35)

en cada uno de los sitios, en cada una de las secciones y a dos profundidades (de 0 a 20 y de 20 a 40 cm). Con lo anterior se obtuvo un total de 48 muestras en cada uno de los transectos, con una intensidad de siete a 12 días entre cada muestra (Cuadros 8 y 9).

Se observaron las variaciones de la humedad en forma periódica para cada una de las secciones de cada uno de los transectos, lo que permite comparar la humedad existente en cada parte de los sitios estudiados.

**Cuadro 6. Humedad volumétrica total de las muestras en cada sitio, en 1997.**

Sección (Profundidad)	Juchitepec	Santa Catarina	Acozac II	Acozac I
cm				
A (0 a 20)	444.42	610.10	414.45	265.10
A (20 a 40)	503.23	630.07	-	304.53
B (0 a 20)	428.43	597.01	327.42	295.69
B (20 a 40)	522.75	629.39	-	291.38
C (0 a 20)	446.68	597.26	393.32	284.86
C (20 a 40)	523.11	686.99	390.22	319.55
D (0 a 20)	495.43	649.36	383.42	290.15
D (20 a 40)	512.90	680.29	381.78	330.71

La humedad del suelo (PS) dentro de este estudio corresponde a una variable que depende de la posición del sitio dentro de la pendiente en general (Pg) del terreno y, a su vez, genera un cambio en el rendimiento (R) de los cultivos que se desarrollan en esas condiciones.

$$PS = f(Pg) \text{ y}$$

$$R = f(PS)$$

**Cuadro 7. Humedad volumétrica total de las muestras en cada sitio, en 1998.**

Sección (Profundidad)	Juchitepec	Santa Catarina	Coatlinchán
cm			
A (0 a 20)	59.04	96.86	72.12
A (20 a 40)	62.57	105.97	75.96
B (0 a 20)	69.47	Sección integrada a C	65.00
B (20 a 40)	73.88		69.27
C (0 a 20)	61.99	102.68	61.84
C (20 a 40)	67.57	109.80	64.40
D (0 a 20)	60.89	104.66	69.63
D (20 a 40)	66.36	112.90	76.81

**Cuadro 8. Humedad gravimétrica total de las muestras en cada sitio, en 1997**

Sección (Profundidad)	Juchitepec	Santa Catarina	Acozac II	Acozac I
cm				
A (0 a 20)	403.65	544.73	392.84	235.85
A (20 a 40)	446.55	561.06	-	251.26
B (0 a 20)	384.59	570.76	322.90	266.15
B (20 a 40)	465.49	587.67	-	265.86
C (0 a 20)	396.70	591.93	366.22	256.17
C (20 a 40)	464.99	634.93	271.29	291.56
D (0 a 20)	431.18	671.52	366.91	272.19
D (20 a 40)	421.10	696.31	279.50	317.99

Aun cuando se pudieron establecer otras relaciones entre el cultivo con la cantidad de humedad aprovechable existente la cual, como se ha indicado, es, a su vez, función de los valores de las constantes de humedad y de la densidad aparente de cada uno de los suelos.

**Medición del rendimiento del cultivo.** Para evaluar los efectos de las variables anteriormente señaladas, se tomaron como variables dependientes finales a la biomasa aérea del cultivo, así como al rendimiento del grano obtenido en cada uno de los ciclos de producción.

**Biomasa.** Se consideró como biomasa (B) al peso seco obtenido en la cosecha al final de cada ciclo de producción, donde se pesó al tallo, a las hojas, a las espigas y a la mazorca.

El procedimiento para tomar el peso de la biomasa aérea fue la de cosechar las plantas en cinco muestras de 10 m de largo del surco, en cada una de las secciones, procurando que los surcos tuvieran el número de plantas completo, de acuerdo con la densidad de población establecido y que estuvieran distribuidos uniformemente dentro de cada sección.

**Rendimiento de grano.** El rendimiento de grano (R), en  $\text{kg ha}^{-1}$ , se obtuvo con el peso seco del grano de la biomasa total en cada una de las cinco muestras, tomadas de cada sección.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Densidad Aparente

Los valores, obtenidos de la densidad aparente para cada uno de los sitios, se promediaron por sección, calculando, a la vez, la desviación estándar para cada media (Cuadro 3).

En este cuadro, se observa que existió variación de las densidades de las secciones en cada uno de los transectos, lo que indica que hay diferencias en la capacidad de almacenar humedad en las posiciones de cada sección, a causa de las densidades aparentes que se encontraron.

Por lo tanto, es un dato útil para los cálculos volumétricos de humedad en cada una de las secciones establecidas en los sitios seleccionados.

La variación que se observa de los datos para la densidad aparente es aceptable, ya que la desviación estándar es menor que 10% de la media en cada una de las secciones de los distintos sitios.

### Constantes de Humedad del Suelo

Los valores de humedad que el suelo puede retener en los puntos de marchitez permanente y de capacidad de campo, se presentan para cada uno de los sitios en los Cuadros 4 y 5. En cada uno de ellos, se presentan las medias calculadas para cada una de las secciones de cada sitio, junto con las desviaciones estándar de cada una de ellas.

Los datos obtenidos para los valores de constantes de humedad presentan una variación aceptable, ya que las desviaciones estándar, en su mayoría, no rebasan el diez por ciento de las medias. Únicamente para el caso de la capacidad de campo, se tuvieron algunos valores con variaciones muy altas (> 20%).

### Humedad Gravimétrica

Durante 1997, se realizaron mediciones de humedad en cada una de las secciones de cada uno de los sitios, con una periodicidad semanal y, durante 1998, con una periodicidad mensual. Para todos los

**Cuadro 9. Humedad gravimétrica total de las muestras en cada sitio, en 1998.**

Sección (Profundidad)	Juchitepec	Santa Catarina	Coatlinchán
cm			
A (0 a 20)	59.04	96.86	72.12
A (20 a 40)	62.57	105.97	75.96
B (0 a 20)	69.47	Sección integrada a C	65.00
B (20 a 40)	73.88		69.27
C (0 a 20)	61.99	102.68	61.84
C (20 a 40)	67.57	109.80	64.40
D (0 a 20)	60.89	104.66	69.63
D (20 a 40)	66.36	112.90	76.81

casos, se tomaron tres repeticiones en cada una de las secciones. La sumatoria de la humedad gravimétrica, registrada en cada muestra, se presenta en los Cuadros 5 y 6, para los dos años de estudio.

La humedad gravimétrica de cada una de las muestras se obtiene como un porcentaje del peso del suelo seco, si se multiplica por la densidad aparente, se transforma en porcentaje de humedad volumétrica, que puede emplearse para el cálculo de la lámina de humedad existente. Para este estudio, se empleó directamente la humedad gravimétrica total acumulada de las muestras (Cuadros 6 y 7), que representa la cantidad porcentual del volumen de suelo que fue ocupado por la humedad en todos los días en que se registraron los datos para esta variable (Figuras 5 y 6). Los datos de humedad son comparables para las secciones de cada uno de los sitios, debido a que las muestras se obtuvieron en las mismas fechas para todas las secciones de cada sitio. De esta manera, se emplearon los valores de humedad acumulada para calcular su efecto sobre el rendimiento del maíz.

En la Figura 5, se observa que, en 1997, hay acumulación de la humedad en las partes más bajas de cada uno de los sitios estudiados. Pero, en 1998, (Figura 6) la tendencia es la de tener mayor humedad acumulada en las partes más altas (a excepción del sitio Coatlinchán).

### Rendimiento de Maíz

**Biomasa de la parte aérea (B).** El peso obtenido de las muestras colectadas en cada una de las secciones se transformó a peso por hectárea y es presentado sección por sección en los Cuadros 10 y 11, para los valores obtenidos en 1997 y 1998, respectivamente.

Con los datos de los Cuadros 10 y 11, se calculó la respuesta del rendimiento en biomasa (B) en función de la posición (P, desde 1 hasta 4) de la muestra sobre la pendiente del terreno. En este caso, se otorga un valor de P = 1 a la Sección A, que corresponde a la posición más elevada de cada sitio, un valor de P = 2 a la posición donde inicia el incremento de la pendiente (Sección B), un valor de P = 3 a la Sección C donde se tiene la pendiente pronunciada inferior, y un valor de P = 4 a la parte más baja del terreno, donde la pendiente se reduce de manera considerable (Sección D). La biomasa no respondió significativamente a la posición por sí sola, sino que respondió en combinación con la variable sitio (S, desde 1 hasta 5) y a los años (Y, desde 1 hasta 2) en que se obtuvieron

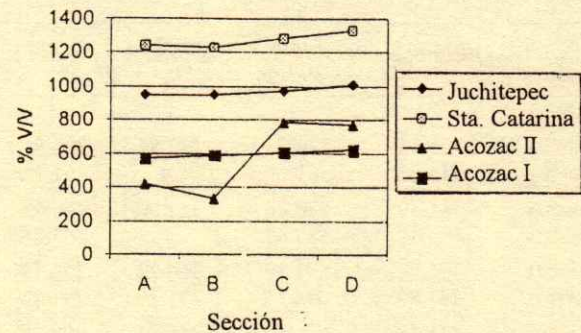


Figura 5. Humedad acumulada muestreada, en 1997.

los datos. Con toda la información, se obtuvo la función de respuesta:

$$B = 11202.8078 + 745.236 P - 774.7034 S - 4018.8915 Y \dots (4)$$

Pr > F del modelo es de 0.0036

$$r = 0.6622$$

Esta función indica que, al pasar de las partes altas de los sitios hacia las partes más bajas, hay una tendencia de incrementar el rendimiento; en cuanto al efecto de sitios indica que algunos sitios, como Acozac II y Santa Catarina, tuvieron un rendimiento sensiblemente más bajo que los demás sitios y, por último, 1998 fue un año de menor rendimiento en biomasa que 1997.

**Rendimiento de grano de maíz (R).** En cada una de las muestras cosechadas, se obtuvo el grano de maíz, cuyo peso se transformó a kilogramos por hectárea, tanto en 1997, como en 1998; estos datos se presentan

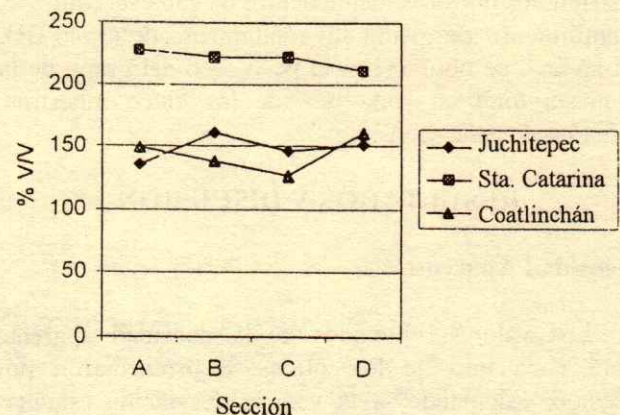


Figura 6. Humedad acumulada muestreada, en 1998.



**Cuadro 9. Humedad gravimétrica total de las muestras en cada sitio, en 1998.**

Sección (Profundidad) cm	Juchitepec	Santa Catarina	Coatlinchán
A (0 a 20)	59.04	96.86	72.12
A (20 a 40)	62.57	105.97	75.96
B (0 a 20)	69.47	Sección	65.00
B (20 a 40)	73.88	integrada a C	69.27
C (0 a 20)	61.99	102.68	61.84
C (20 a 40)	67.57	109.80	64.40
D (0 a 20)	60.89	104.66	69.63
D (20 a 40)	66.36	112.90	76.81

para cada una de las secciones en los Cuadros 12 y 13, donde se observa que para 1997 los rendimientos son más altos debido a precipitaciones abundantes y continuas en la etapa de floración del cultivo.

Empleando los datos de rendimiento de grano (R), de los Cuadros 12 y 13, se calculó la función de respuesta a las variables P, S y Y, y se encontró nuevamente que el cultivo de maíz responde significativamente a más de una de estas variables, obteniendo la función de respuesta:

$$R = 4143.6776 - 607.5489 S - 846.5443 Y \quad (5)$$

$$Pr > F \text{ del modelo es de } 0.54 \quad R = 0.5271$$

Donde se confirma que se presentaron diferencias notables y significativas de rendimiento de grano entre los sitios y entre los dos años.

**Cuadro 10. Biomasa de la parte aérea de maíz, en 1997.**

Sección	Juchitepec	Santa Catarina	Acozac I	Acozac II
----- kg ha <sup>-1</sup> -----				
A	11 604.40	2050	7609.76	1726.36
B	6571.43	3025	8073.17	5390.24
C	14 373.63	3650	9837.40	5902.44
D	13 780.22	3300	11 626.02	5243.90

**Cuadro 11. Biomasa de la parte aérea de maíz, en 1998.**

Sección	Juchitepec	Santa Catarina	Coatlinchán
----- kg ha <sup>-1</sup> -----			
A	4656.82	1539.60	2651.92
B	4016.90	1281.82	2166.22
C	3352.26	2253.67	1947.46
D	4658.71	-	2424.93

Considerando que la humedad participó de manera relevante en la producción del cultivo de maíz en estos dos ciclos, se decidió que era útil y necesario involucrar la humedad muestreada en las funciones de respuesta, tanto de la biomasa (B), como del rendimiento de grano (R).

En los Cuadros 8 y 9, se presentan los datos de humedad volumétrica que se acumuló (H) en las muestras colectadas en 1997 (Cuadro 8) y en 1998 (Cuadro 9). Con todos los datos en conjunto, se obtuvieron las siguientes funciones de respuesta para la biomasa (B) y para el rendimiento de grano (R):

$$B = 28059.2014 + 569.3447 P - 18.7214 H - 949.8864 S - 11324.6464 Y \dots \quad (6)$$

$$Pr > F \text{ del modelo es de } 0.0001 \quad r = 0.7634$$

$$R = 9898.2189 - 5.82 H - 745.3814 S - 3021 Y \dots (7)$$

$$Pr > F \text{ del modelo es de } 0.0005 \quad r = 0.5528$$

En ambos modelos, puede observarse que la humedad afecta considerablemente a los efectos de las demás variables independientes, a la vez que se mejoran las características de los modelos, aumentando su valor de significancia y sus valores de correlación.

Se observa en ambas respuestas, que la humedad (H) participa con una pendiente negativa, lo que indica que hay una disminución del rendimiento conforme se baja la humedad y que la disminución fue más

**Cuadro 12. Rendimiento de grano de maíz, en 1997.**

Sección	Juchitepec	Santa Catarina	Acozac I	Acozac II
----- kg ha <sup>-1</sup> -----				
A	4292.26	609.86	2325.86	-
B	3468.62	389.46	738.27	1092.16
C	8554.95	355.17	1583.69	974.73
D	7270.52	611.11	2725.82	617.72

**Cuadro 13. Rendimiento de grano de maíz, en 1998.**

Sección	Juchitepec	Santa Catarina	Coatlinchán
----- kg ha <sup>-1</sup> -----			
A	2411.32	513.73	1161.20
B	2214.24	454.03	893.25
C	1803.37	906.69	874.15
D	2790.49	-	1059.39

acentuada en la producción de la biomasa que en el rendimiento de grano.

### CONCLUSIONES

- Los valores de la densidad aparente no tuvieron asociación significativa con las secciones con diferente pendiente.
- Las constantes de humedad no son afectadas por las secciones con diferente pendiente en cada uno de los sitios, pero se manifiesta diferencia significativa entre las dos profundidades, siendo más altos los valores encontrados en la profundidad de 20 a 40 cm.
- La humedad volumétrica total muestreada registra diferencias significativas entre las secciones de cada uno de los sitios, siendo mayor en las Secciones A y D.
- Las secciones afectan significativamente a la producción de biomasa y la producción es mayor en las Secciones A y D, las cuales, en todos los sitios, representan pendientes menores que 5%.
- La humedad gravimétrica total muestreada tiene una alta correlación con la producción del cultivo, tanto en biomasa, como en rendimiento de grano.

### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto SPIES (Índices de Productividad de Suelos y su Sensibilidad a la Erosión), contrato ERBIC 18CT960096, financiado por la Comisión de la Comunidad Económica Europea, a quienes ampliamente agradecemos su apoyo.

### LITERATURA CITADA

- Andrade, A. 1975. La Erosión. Fondo de Cultura Económica, México, D.F.
- CONAZA. Comisión Nacional de Zonas Áridas. 1993. Plan de Acción para combatir la desertificación en México (PACD-MÉXICO). Secretaría de Desarrollo Social. Saltillo, Coahuila, México.
- Estrada, J.W. y C.A. Ortiz S. 1982. Plano de erosión hídrica del suelo en México. Geografía Agrícola 3: 23-27.
- Figueroa S., B., A. Amante O., H. Cortés T., J. Pimentel L., E. Osuna C., J. Rodríguez O. y F. Morales F. 1992. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F.
- Johnson, L.J. 1979. Introductory soil science. McMillan. New York.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1986. Inventario de áreas erosionadas en México. México, D.F.
- Vázquez A., V. 1986. La erosión y conservación del suelo en México. Realidades y perspectivas. Terra 4: 158-172.

ÍNDICE DE AUTORES  
AUTHORS INDEX

Aguilar, A. † 55  
Arévalo G., G. 19, 55

Blum, W.E.H. 1, 5

Mentler, A. 5, 29

Prat, C. 19

Quinton, J.N. 41

Rampazzo, N. 1, 5, 29  
Rey C., J.A. 41, 55

Sancho, F. 19, 29, 41  
Strauss, P. 19, 41

Tah I., J.F. 55  
Torres E., A. 55

Veihe, A. 41  
Villatoro, M. 29

Waldingbrett, A.R. 5

**REVISORES QUE PARTICIPARON EN ESTE NÚMERO ESPECIAL  
REVIEWERS WHO PARTICIPATED IN THIS SPECIAL NUMBER**

Asteinza Bilbao, G.

Benedicto Valdés, G.S.

Bravo Espinosa, M.

Buschiazzo, D.E.

Galvis Spinola, A.

López Martínez, J.D.

Ordaz Chaparro, V.M.

Rivera Ruiz, P.

Rojano Aguilar, A.

Sánchez Cohen, I.

Tiscareño López, M.

Vargas Hernández, M.

Vergara Sánchez. M.A.



# Red Nacional de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo

## RENAEECS<sup>1</sup>

### CONVOCATORIA

La **División de Educación y Enseñanza de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C.**, tiene el agrado de invitar a participar a todos los Socios, Profesionistas, Educadores y Estudiantes del área y disciplinas afines, interesados en la conformación de la **Red Nacional de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo**, a integrarse en ella y sumar esfuerzos en la consecución de una educación que nos permita preservar el recurso Suelo a través del mejoramiento de la calidad de la misma e inclusión de la temática desde la infancia; generando en los niños y acrecentando en los jóvenes, una cultura y una conciencia crítica de conservación y mejoramiento del Suelo como elemento indispensable para la realización de los ciclos biogeoquímico, de producción y económico administrativo en un contexto ecológico.

Para ello y como primeras acciones que nos lleven a la formación y consolidación de la **RENAEECS**, te invitamos a llenar tu formato de registro y enviarlo directamente a la **Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C.**, a través de su FAX: (01) (595) 95-217-21 o al correo electrónico [smcs@taurus1.chapingo.mx](mailto:smcs@taurus1.chapingo.mx) y [lbrs@servidor.unam.mx](mailto:lbrs@servidor.unam.mx), e integrarte al conjunto de trabajos que te invitaremos a realizar de forma organizada con nosotros; mismas que serán dadas a conocer periódicamente a la Comunidad Edafológica Nacional, a través de las publicaciones de **TERRA**, por correo electrónico y en diversas páginas electrónicas de Instituciones públicas. Así mismo, te convocamos a hacernos partícipes de tus ideas y propuestas para el mejoramiento de la Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo en nuestro País.

**¡Vamos todos juntos en la Cruzada Nacional por la preservación del Recurso Suelo!**

FORMULARIO DE INSCRIPCIÓN A LA Red Nacional de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo	
Nombre Completo:	
Institución a la que pertenece:	
Dirección:	
Teléfono:	Fax:
E-mail:	
Grado Académico:    Doctor <input type="checkbox"/> M. en C. <input type="checkbox"/> Licenciado <input type="checkbox"/>	
Titulo Profesional (Indicar):	
Estudiante:	
Me adscribo a la Convocatoria de Formación de la RENAEECS :	
Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	
..... Firma	
Abril del año 2003.	

<sup>1</sup> División de Educación y Enseñanza de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Proyecto: "Así son los Suelos de mi Nación"



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

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos;  
km 38.5 Carr. México -Texcoco  
Tel. y Fax: 01 595 95 2 17 21. Tel. 01 595 95 2 15 00 ext. 5237  
Correo ordinario: Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Méx.

### FORMA DE SUSCRIPCION A LA REVISTA TERRA

La revista Terra es publicada trimestralmente. Todas las suscripciones son anuales e incluyen un volumen con cuatro números. El costo de la suscripción es de \$ 750.00 en el país y 80.00 Dólares americanos en el extranjero. Incluye costos de envío en ambos casos.

Enviar suscripción a:

Nombre: \_\_\_\_\_

Empresa: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Colonia: \_\_\_\_\_

Código Postal: \_\_\_\_\_

Ciudad: \_\_\_\_\_

Estado: \_\_\_\_\_

País: \_\_\_\_\_

e-mail: \_\_\_\_\_

Teléfono: \_\_\_\_\_

Fax: \_\_\_\_\_

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

**HOY ES EL MEJOR MOMENTO PARA APOYAR A LA REVISTA TERRA  
! SUSCRÍBETE !**

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.  
Cuenta 044 657115  
Bancomer Número de Plaza 010  
Sucursal 3441 Texcoco, Estado de México.