



**HAL**  
open science

## Estudio comparativo de dos modelos de simulación de transferencias hídricas en un ferralsol del sur de La Habana

Teresa López, Greco Cid, Felicita Gonzalez, Graciela Duenas, Harry Ozier Lafontaine, Jorge Sierra

► **To cite this version:**

Teresa López, Greco Cid, Felicita Gonzalez, Graciela Duenas, Harry Ozier Lafontaine, et al.. Estudio comparativo de dos modelos de simulación de transferencias hídricas en un ferralsol del sur de La Habana. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 2002, 11 (1), pp.83-90. hal-02670555

**HAL Id: hal-02670555**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02670555>**

Submitted on 31 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias

ISSN: 1010-2760

paneque@isch.edu.cu

Universidad Agraria de La Habana Fructuoso

Rodríguez Pérez

Cuba

López, Teresa; Cid, G.; González, Felicita; Dueñas, Graciela; Ozier, H.; Sierra, J.  
Estudio comparativo de dos modelos de simulación de transferencias hídricas en un ferralsol del sur  
de La Habana

Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 11, núm. 1, 2002, pp. 83-90

Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez

La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93211114>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Estudio comparativo de dos modelos de simulación de transferencias hídricas en un ferralsol del sur de La Habana

## Comparative study of two hydric transfers simulation models in a ferralsol of south of Havana

Teresa López<sup>1</sup>; G. Cid<sup>1</sup>; Felicita González<sup>1</sup>; Graciela Dueñas<sup>2</sup>;  
H. Ozier-Lafontaine<sup>3</sup> y J. Sierra<sup>3\*</sup>

**RESUMEN.** Se realizó un análisis comparativo de dos modelos de simulación de transferencias hídricas en las condiciones edafoclimáticas de la región de Alquizar, en el sur de La Habana. Se compararon los valores observados y simulados de las variables: humedad volumétrica y flujo de drenaje en el perfil, a partir de un análisis de correlación y la prueba *T-Student* para muestras independientes. Los resultados muestran que el modelo STICS no responde a una precisión aceptable al seguimiento de la dinámica de humedad en el suelo, lo que obedece principalmente a las simplificaciones asumidas en su esquema de balance hídrico. La comparación de este modelo con el modelo de base física MACRO, refleja errores medios en la predicción de la humedad desde 1,4 % hasta 4 %. Los valores de eficiencia de simulación (EF) son del 93 al 99% con el modelo MACRO, mientras que con STICS este indicador no supera el 65 %.

**Palabras clave:** Modelación, balance hídrico, flujo agua suelo.

**ABSTRACT.** A comparative analysis of two hydric transfers simulation models was done for soil and climatic conditions of Alquizar at south of Havana. The simulated and observed values of soil water content and soil water flow were compared using a correlation analysis and a T-Student test. The results shows a no accurate prediction of soil water dynamic with STICS model due to the simplifications assumed in the hydric balance scheme. The comparison of this model with the deterministic model MACRO showed average errors for soil water content values between 1,4 %-4 %. The simulation efficiency values oscillated between 93-99 % for MACRO model behind for STICS model had a maximum value of 65 %.

**Key words:** Modeling, soil water balance, soil water flux.

### INTRODUCCIÓN

Del área agrícola de Cuba, los suelos del agrupamiento Ferralsol están entre los más extendidos, sobre todo en la región de la sabana Habana-Matanzas, donde ocupan más del 70 %. En ellos se cultiva gran parte de la producción de granos,

viandas y hortalizas, y por tanto el manejo eficiente del agua en estos para obtener rendimientos agrícolas óptimos, constituye una cuestión de vital importancia para nuestra economía.

La utilización de modelos matemáticos para la simulación y predicción del movimiento del agua en sistemas agrícolas ha resultado en la actualidad una herramienta útil e indispensable

Recibido 14/12/01, trabajo 014/02, investigación.

<sup>1</sup>Instituto de investigación de Riego y drenaje. Apdo postal 6090. C. Habana. Cuba.

<sup>2</sup>Instituto de Suelos de Cuba.

<sup>3</sup>INRA-APC. Guadeloupe. Francia.

Con la colaboración de Nadine INRA. Francia.

para desarrollar soluciones de diferentes problemas de manejo agrícola y medioambiental. No obstante, la precisión de sus resultados puede estar afectada en gran medida por la simplificación que se asume en las representaciones de los balances de agua en el suelo dentro de los modelos (Clemente *et al.*, 1994; Dourado-Neto *et al.*, 1998).

Los modelos mecanísticos o de base física, que resuelven en un esquema numérico las ecuaciones generales del flujo del agua en el suelo, han demostrado ser más eficientes, al minimizar los errores en la predicción del balance de agua (Urso *et al.*, 1999). En la actualidad el uso combinado de estos modelos junto a técnicas de sensores remotos y sistemas de información geográfica resultan una herramienta poderosa para la evaluación espacial y temporal de los requerimientos hídricos, así como del transporte de solutos (nitratos, bromuros, pesticidas) hacia y fuera de la zona radical, información que permite sustentar un manejo adecuado del riego y un uso racional y sostenible de los recursos hídricos (Urso *et al.*, 1999; Dust *et al.*, 2000; Jarvis *et al.*, 2000).

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental realizar un análisis comparativo de dos modelos, que ya han sido evaluados anteriormente para la zona agrícola del sur de La Habana, en cuanto a sus esquemas de resolución del balance de agua en el suelo; y demostrar la influencia de la modelación precisa de los flujos de agua en la precisión de la simulación del manejo del agua en los sistemas agrícolas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, en el municipio Alquizar de la provincia de La Habana, situado a los 22° 47' de latitud norte y los 82° 36' de longitud oeste, a 6 m sobre el nivel del mar. El suelo de la Estación es ferralítico rojo compactado (Rhodic Ferralsol según clasificación FAO-UNESCO) (Instituto de Suelos, 1996 a y b).

**Características del ensayo.** El ensayo duró 6 semanas. En una parcela de 4x4m se instalaron 3 baterías de tensiómetros para el seguimiento de las variaciones de la tensión del agua en el suelo, a las profundidades de 20, 40, 60, 80, y 100 cm; y tubos de acceso para el seguimiento de la humedad del suelo con sonda de neutrones.

**El manejo del agua** consistió en lo siguiente: 1<sup>o</sup>) se añadieron 14,3 mm de agua sobre un perfil húmedo que incrementó la humedad en el suelo a una condición cercana a la saturación. 2<sup>do</sup>) a los 21 días se añadieron 46 mm de agua sobre un perfil relativamente seco, que incrementó la humedad del suelo a una condición de humedad cercana al límite superior del agua disponible y 3<sup>ro</sup>) a los 30 días se añadieron 27 mm y la prueba concluyó a los 45 días.

### Características de la simulación con MACRO

Se utilizó la versión 3.2 de MACRO (Jarvis, 1996). La simulación se llevó a cabo considerando un perfil de suelo dividido en cuatro capas de 20 cm cada una hasta la profundidad de 80 cm. Como condición frontera inferior se definió un gradiente hidráulico unitario constante y las humedades volumétricas del perfil inicial fueron de 32,7 %, 43,6 %, 41,9 % y 43,7 %, para las profundidades de 20, 40, 60 y 80 cm respectivamente.

Se utilizaron los parámetros de las propiedades hidráulicas del suelo definidos por Rodríguez y López (2000) para las mismas condiciones de suelo. Las curvas de retención se ajustaron al modelo de Brooks y Corey (1964) y la conductividad hidráulica no saturada al modelo de Mualem (1976).

Por otra parte se utilizó para el fichero climático los valores de lluvia diarios registrados para el período analizado en la estación climática del lugar de estudio.

Se definió un manejo de agua similar al ensayado en la parcela de estudio y se corrió el modelo en la opción de trabajo de un solo dominio de la porosidad, ya que el suelo analizado no presenta características de arcillas dilatables y por tanto no resulta importante considerar el flujo preferencial a través de la macroporosidad.

Las variables consideradas en la salida del modelo para cada profundidad analizada fueron: **humedad volumétrica, almacenamiento del agua y flujo de drenaje.**

### Características de la simulación con STICS

Se utilizó la versión 3.0 de STICS (Brisson *et al.*, 1997). La simulación se realizó considerando un perfil de suelo dividido en cuatro capas de 20 cm cada una, hasta la profundidad de 80 cm. Se utilizaron los parámetros de las propiedades del suelo definidos por López *et al.* (1999) para las mismas condiciones de suelo.

Por otra parte se utilizó para el fichero climático los valores de radiación neta y lluvia diarios registrados para el período analizado en la estación climática del lugar de estudio.

Se definió un itinerario técnico para suelo desnudo con los valores de ingreso de agua similares a los del ensayo y se corrió el modelo STICS-GEN.

Las variables consideradas en la salida del modelo para cada profundidad analizada fueron: **humedad volumétrica, almacenamiento del agua y flujo de drenaje.**

Criterios estadísticos para la evaluación comparativa de los modelos.

Para la evaluación comparativa de los modelos en cuanto a su esquema de resolución del balance de agua se utilizaron los criterios estadísticos definidos por Loague y Green (1991) para las variables de salida: **humedad volumétrica** para cada profundidad analizada y **flujo de drenaje** en la base del perfil.

Los estadígrafos calculados fueron: *error medio (AE)*; *raíz cuadrada media del error (RMSE)*, *eficiencia de modelación (EF)* y *coeficiente de masa residual (CRM)*.

*AE*, *RMSE*, *RMS*, *CRM* tienen como valor inferior límite 0, el cual constituye el óptimo. Si *CRM* es positivo el modelo subestima y si *CRM* es negativo el modelo tiende a sobreestimar.

*EF* tiene como valor máximo y óptimo 1. Si *EF* es menor que 0 el modelo predice peor que utilizando el valor medio de los datos observados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se resumen los aspectos más significativos que permiten comparar ambos modelos utilizados en cuanto a su esquema de resolución del balance de agua en el suelo.

Como puede apreciarse el modelo STICS se basa fundamentalmente en las variables meteorológicas que le permiten realizar un balance energético en el suelo, mientras que el mo-

delo **MACRO** es fundamentalmente un modelo de simulación de balance de masas, donde se cuantifican los flujos de agua en el suelo a partir de las leyes que lo rigen y conociendo sus propiedades hidráulicas fundamentales. Está diseñado para tener en cuenta los flujos preferenciales en la macroporosidad, importante en suelos con arcillas dilatables. No obstante para este estudio lo analizaremos solamente en su opción de trabajo para suelos "rígidos".

En el modelo **MACRO** es posible analizar con mayor detalle perfiles no homogéneos de suelo (divididos hasta un máximo de 15 capas, contra 5 en el modelo **STICS**) y la opción de un paso de tiempo horario aumenta la precisión de los cálculos del balance de agua.

La analogía de reservorio empleada en el modelo **STICS** para el balance del agua en el suelo se basa en definir límites estáticos para el agua disponible en el suelo en cada capa y no considera la redistribución del agua en el perfil del suelo que se produce dada por gradientes hidráulicos que se establecen entre las distintas capas del suelo.

Esto puede conllevar a errores en la predicción de la humedad y los flujos de agua por debajo de la zona radical; por tanto en la determinación de la disponibilidad del agua para las plantas y el término de extracción del agua por las raíces, el cual junto al desarrollo del índice foliar determinan la transpiración y el consumo de agua por las mismas.

En las Figuras 1 y 2 se muestra la comparación de los perfiles de humedad volumétrica observados durante el ensayo realizado sobre el suelo Ferralsol, con los simulados para las mismas condiciones con el modelo **MACRO** y **STICS**.

En la Figura 1 A-C se reflejan algunos perfiles observados y simulados durante los 12 días posteriores a la aplicación del primer riego (14,3mm), el cual se efectuó sobre un perfil de suelo con un contenido de humedad medio hasta los 80 cm de  $0,394 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Como puede apreciarse existe una excelente correspondencia entre los valores observados y simulados por el modelo **MACRO**, no siendo así para el modelo **STICS**. A las 2 h del ensayo, o sea, después del riego aplicado (Figura 1A), se observa que el modelo **MACRO** simula un perfil de humedad que está en un punto entre el límite superior del agua disponible (LSAD) y la saturación. No obstante para el modelo **STICS**, el perfil después del riego corresponde al LSAD, considerando una redistribución instantánea del agua que está por encima de este límite.

A las 48 h (Figura 1B) se observa un perfil de humedad cercano al límite superior del agua disponible (LSAD); a partir de este momento la humedad tendrá un lento descenso, ya que se registraron algunas lluvias de poca cuantía (entre 4 y 9 mm) durante el período. Los valores simulados por el modelo **MACRO** predicen adecuadamente estas variaciones de la humedad, las que se registrarán fundamentalmente para la capa superficial (20 cm) afectada por la evaporación desde la superficie del suelo y en las capas inferiores del perfil donde el proceso de redistribución es más rápido, debido a un decrecimiento menos brusco de la conductividad hidráulica con la humedad del suelo. A los 40 cm se tiene prácticamente un flujo estacionario.

En la Figura 1B se observa, además, que el modelo **STICS**, una vez que el perfil del suelo alcanzó los valores del LSAD, inmediatamente después del riego, ya no tiene más variacio-

nes, a no ser para la profundidad de 20 cm, afectada por la evaporación desde la superficie del suelo. En las capas inferiores la humedad permanece invariable, puesto que no hay pérdidas de agua ni por evaporación ni por transpiración y no se tiene en cuenta el proceso de redistribución de la humedad que puede persistir a una tasa relativamente considerable en este suelo hasta 15 días después de una inundación (según López, 1996).

A los 12 días (Figura 1C) el perfil de humedad observado se incrementa ligeramente, debido a un ingreso por lluvia de 25 mm, y de nuevo concuerda con el simulado por el modelo **MACRO**. El modelo **STICS** por su parte predice que esta lluvia lleva a la capa superficial al valor de humedad correspondiente al LSAD, sin incrementar la humedad en las capas subsiguientes que permanecen todo el tiempo en el valor del límite superior del agua disponible.

En la Figura 2 A-C se muestra la comparación del comportamiento de los perfiles de humedad registrados con los simulados por ambos modelos para los períodos posteriores al segundo y tercer riego efectuados en el ensayo.

Como puede apreciarse sigue observándose una excelente correspondencia entre los valores observados y los simulados por el modelo **MACRO**, no siendo así con el modelo **STICS**, donde la correspondencia es aún más mala que para el período anterior.

El segundo riego se produce sobre un perfil de humedad inicial algo superior al observado en el primer riego (humedad media en el perfil hasta los 80 cm de  $0,401 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) y se aplicó una cantidad de agua mayor (46 mm). Inmediatamente después de la infiltración del agua se vuelve a observar un perfil en un punto entre el LSAD y saturación (Figura 2A), en este caso mayor que el observado después del primer riego (Figura 1A). Este, a las 48 h (Figura 2B), ha disminuido considerablemente en comparación con el período anterior, ya que no se produjeron ingresos por lluvias. Los perfiles de humedad simulados por el modelo **MACRO** predicen adecuadamente el comportamiento de la humedad observado.

La predicción realizada por el modelo **STICS** no indica variación entre los perfiles de humedad registrados antes, después y a las 48 h de la aplicación del segundo riego, ya que el perfil de humedad se encontraba en el valor del LSAD al final del período anterior (ver Figura 1C).

El tercer riego se produce a los 7 días posteriores al segundo riego (27 mm) con un perfil de humedad inicial mucho menor a los observados anteriormente (humedad media en el perfil hasta 80 cm de  $0,379 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) e incrementa nuevamente el perfil de humedad por encima del LSAD, el cual se ve nuevamente incrementado a las 24 h por una lluvia (81 mm) y a los 7 días posteriores a este tercer riego, el perfil de humedad alcanza valores cercanos al LSAD (Figura 2C), siempre algo inferiores para la capa de 20 cm afectada por la evaporación desde la superficie del suelo.

Como se observa en la Figura 2C, el modelo **MACRO** reproduce adecuadamente este perfil final, mientras que con el modelo **STICS**, todos los perfiles de humedad para el período posterior al tercer riego son idénticos, el agua aplicada incrementa la humedad en la capa superficial hasta el límite superior, el ingreso por lluvia se pierde totalmente por drenaje y no se observan variaciones en los 7 días posteriores al ensayo.

Por otra parte, en la Figura 3 se presenta la comparación de los valores del flujo de drenaje a los 80 cm, calculados a partir del registro de la variación del almacenamiento y de los gradientes de potencial del agua en el suelo y los simulados por los modelos **MACRO** y **STICS**. Como puede apreciarse los valores simulados por **MACRO** tienen una excelente correspondencia con los calculados, mientras que los valores simulados por **STICS** están dados fundamentalmente, como la cantidad de agua por encima del límite superior del agua disponible en cada capa.

Los mayores valores del flujo se observan en los períodos de grandes ingresos por lluvia y/o riego (entre 14 y 179 mm) lo que coincide con lo simulado por **MACRO**. Con el modelo **STICS** esta situación es diferente, ya que en las capas inferiores no se considera movimiento del agua y los valores van a coincidir con el agua que queda por encima del límite superior del agua disponible para esa última capa del perfil del suelo (entre 12 y 68 mm).

La diferencia entre los valores calculados por el balance y los observados por **MACRO** aumentan significativamente en algunos períodos, ya que el paso de tiempo horario empleado por **MACRO** permite una cuantificación mucho más precisa del flujo del agua que la que se realiza en los balances, donde se promedian valores de flujo entre períodos de 1 a 7 días.

En la Tabla 2 se resumen los estadígrafos considerados para el análisis de la eficiencia de simulación de los modelos en cuanto a la predicción de la humedad del suelo por capas del perfil.

Como puede apreciarse el rango del error medio en la predicción de la humedad en las diferentes capas del perfil es de 0,6-0,7 % para el modelo **MACRO** y de 1,4 %-4 % para el modelo **STICS**, lo que equivale a los 40 cm a láminas de 2,4 - 2,5 mm y 5,6-16 mm respectivamente. Los valores de las diferencias en las láminas simuladas con **STICS** resultan considerables si se comparan con la evapotranspiración de los cultivos agrícolas.

Los valores de RMSE y RMS se acercan más a su valor óptimo (0) para el modelo **MACRO** que para el **STICS**, donde estos son superiores de 2,5 a 7 veces. Por otra parte los valores de eficiencia de simulación (*EF*) son del 93 al 99 % para el modelo **MACRO**, mientras que para el **STICS** este indicador no supera el 65 % con una media de 36 %.

El estadígrafo CRM se acerca más a su valor óptimo (0) para todas las capas con el **MACRO**. Para el caso del **STICS** toma valores negativos, lo que indica una sobrestimación por el modelo de la humedad del suelo.

Otros autores han trabajado también en la comparación de modelos simplificados o funcionales con modelos mecanísticos o de base física (Clemente *et al.*, 1994; Maraun y Lafolie, 1998; Bhattacharya y Sastry, 1999). Los resultados de estos trabajos coinciden en remarcar que los modelos funcionales no reproducen correctamente la dependencia temporal de los flujos de agua dentro del suelo y desde el suelo (drenaje interno y evaporación). Esta aproximación por otra parte no puede tomar en cuenta los ingresos por capilaridad que pueden producirse temporalmente de una capa a otra. Todo lo cual influye negativamente sobre la estimación de los componentes del balance hídrico, fundamentalmente el almacenamiento del agua en la zona radical y la evapotranspiración.

## CONCLUSIONES

- La predicción del comportamiento hídrico del suelo se afecta considerablemente por la simplificación del esquema de balance de agua en el suelo del modelo utilizado. La comparación entre el modelo simplificado **STICS**, con el modelo de base física **MACRO**, demostró que este último es más eficiente en la predicción de la dinámica de la humedad del suelo (*EF* medio = 96 %) con menores valores del error medio en todas las capas del perfil del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- BHATTACHARYA, B.K. AND P.S.N. SASTRY: Comparative Evaluation of Three-Crop Growth Models for the Simulation of Soil Water Balance in Oilseed Brassica, *Agricultural Water Management*, 42: 29-46, 1999.
- BRISSON NADINE, MARY BRUNO *et al.*: Notice Utilisateur, Modèle **STICS**, INRA. AGPM-Agrotransferts-CETIOM-CIRAD-ITCF, 1997.
- BROOKS, R. AND A. COREY: "Hydraulic Properties of Porous Media", *Hydrology Paper*, no. 3, 27 pp., Colorado State Univ, 1964.
- CLEMENTE, R., *et al.*: "Testing and Comparison of Three Unsaturated Soil Water Flow Models, *Agricultural Water Management*, 25: 135-152, 1994.
- Dourado-Neto D. *et al.*: "Principles of Crop Modelling and Simulation: I. Uses of Mathematical Models in Agricultural Science," *Sci. Agric. Piracicaba*, 55 (Número Especial): 46-50, 1998.
- Dust, M. *et al.*: "Simulation of Water and Solute Transport in Field Soils With the LEACHIP Model", *Agricultural Water Management* 44: 225-245, 2000.
- FEDDES, R.; P. KOWALIK AND H. ZARADNY: Simulation of Field Water Use and Crop Yield, 189 pp., PUDOC, Wageningen, Simulation Monographs, 1978.
- INSTITUTO DE SUELOS, MINAG: Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba, 102 pp., Editorial Academia, La Habana, 1996a.
- INSTITUTO DE SUELOS, MINAG: *Correlación de la nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba, con clasificaciones internacionales (SOIL TAXONOMY y FAO-UNESCO) y clasificaciones nacionales (2da. clasificación genética y clasificación de series de suelos)*, 22 pp., Publicación Interna, La Habana, 1996b.
- JARVIS, N.: *The MACRO Model (Version 3.2)- Technical Description and Sample Simulation*, 55 pp., Monograph 19, Depart. Soil Sci., Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala, 1996.
- JARVIS, N.J.; C.D. BROWN; AND E. GRANITZA: "Sources of Error in Model Predictions of Pesticide Leaching: a Case Study Using the MACRO Model", *Agricultural Water Management* 44: 247-262, 2000.
- LOAGUE, K., AND R. GREEN: Statistical and graphical Methods for Evaluating Solute Transport Models, *J. Contam. Hydrol*, 7:51-73, 1991.

- LÓPEZ TERESA, FELICITA GONZÁLEZ Y G. CID: "Factibilidad del uso de modelos de simulación de crecimiento en la definición de estrategias para el riego deficitario en los cultivos de Maíz y Frijol en suelo Ferralítico del sur de La Habana", *Informe final del Proyecto 06-02 del P.R.*, Riego y Drenaje, MINAG, 2000.
- MARAUX, F. AND F. LAFOLIE: "Modeling Soil Water Balance of a Maize-Sorghum Sequence, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 62: 75-82, 1998.
- MUALEM, Y.: "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Prous Media", *Water Resour. Res.*, 12(3513-522), 1976.
- MUALEM, Y.: "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Resour. Res.* 12(3), 513-522, 1976.
- RODRÍGUEZ, J.A. Y TERESA LÓPEZ: "Validación y análisis de sensibilidad del modelo MACRO en un suelo Orthic Ferrasol del sur de La Habana", *Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetales, España*, vol. 15 (1-2): 47-55, 2000.
- URSO, G.D.; M. MENENTI; A. SANTINI: Regional Application of One-Dimensional Water Flow Models for Irrigation Management", *Agricultural Water Management*, 40: 291-302, 1999.

**TABLA 1. Comparación de los modelos de estudio en cuanto a los aspectos más significativos para la simulación del balance del agua en el suelo**

Aspectos	MACRO	STICS
<b>Variables climáticas</b>	Precipitaciones (valores horarios o diarios); <i>Etp</i> diaria u horaria por Penman.	Precipitaciones (valores diarios o decenales); Temperatura mín. Temp. máx.; Radiación; <i>Etp</i> diaria o decenal por Penman.
<b>Perfil del suelo</b>	Dividido en capas de espesor constante o variable (máximo 15 capas).	Dividido en capas de espesor constante o variable (máximo 5 capas).
<b>Condiciones iniciales</b>	Especificar valores iniciales de humedad para cada profundidad o calcularlos asumiendo un equilibrio de drenaje con un nivel freático en la profundidad límite.	Especificar por el usuario los valores iniciales de humedad para cada profundidad o asumir valores correspondientes al perfil de capacidad de campo.
<b>Condiciones de frontera</b>	5 opciones: gradiente hidráulico constante; flujo=0; nivel freático; potencial hidráulico constante; lisímetro con drenaje libre.	-
<b>Propiedades físico-hidráulicas del suelo</b>	<b>Curvas características de retención</b> (ajustadas al modelo de Brooks y Corey, 1964). <b>Conductividad hidráulica no saturada</b> (ajustada al modelo de Mualem, 1976). <b>Pendiente de la curva de encogimiento</b> (para suelos rígidos $p=0$ ). <b>Densidad aparente</b> ( $g/cm^3$ ).	<b>Humedad correspondiente a la capacidad de campo</b> (% peso de suelo seco) <b>Humedad al punto de marchitez permanente</b> (% peso de suelo seco). <b>Densidad aparente</b> ( $g/cm^3$ ).
<b>Esquema de balance de agua en el suelo</b>	Flujo saturado y no saturado del agua en la macro y microporosidad. Para un solo dominio, <b>resuelve ecuación de Richards</b> y obtiene el valor de $\theta$ y $h$ para cada $z$ y $t$ . Término sink para extracción del agua por las raíces; función del contenido de agua en el suelo (analogía al modelo de Feddes, 1978).	Balance hídrico en capas elementales de 1cm con <b>analogía de reservorio</b> . Aportes de agua suplen las capas hasta un límite superior que corresponde a la capacidad de campo de la capa. Si el agua en una capa elemental no es suficiente para evaporación y transpiración, entonces se toma de la capa subyacente.

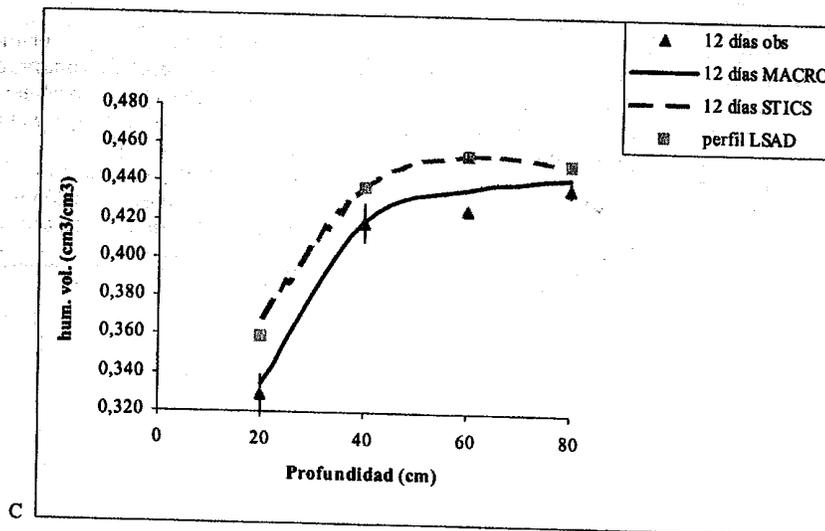
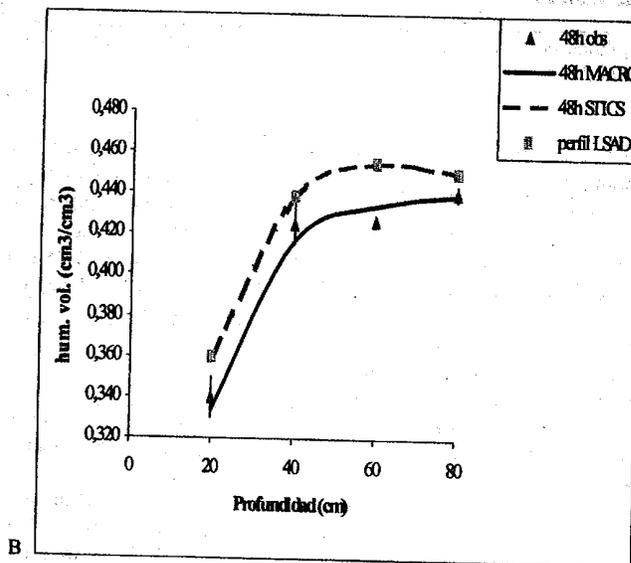
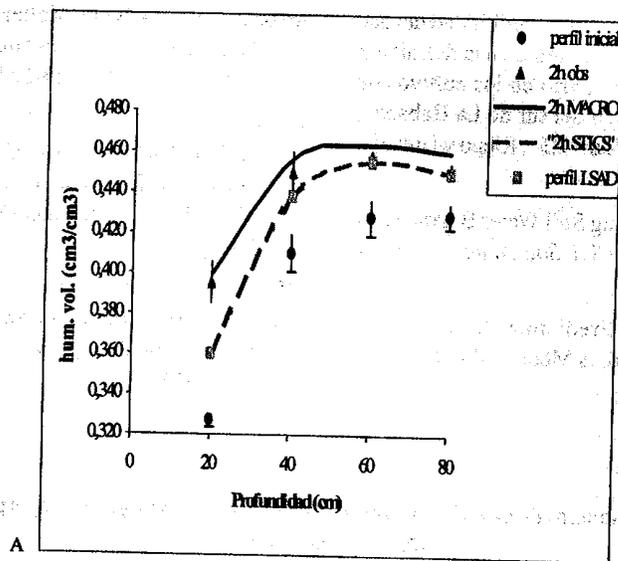


FIGURA 1. Comparación de perfiles de humedad registrados durante el período posterior al primer riego del ensayo, con los simulados por los modelos: A)-a 2h después del riego; B)- a 48h y C)- a los 12 días.

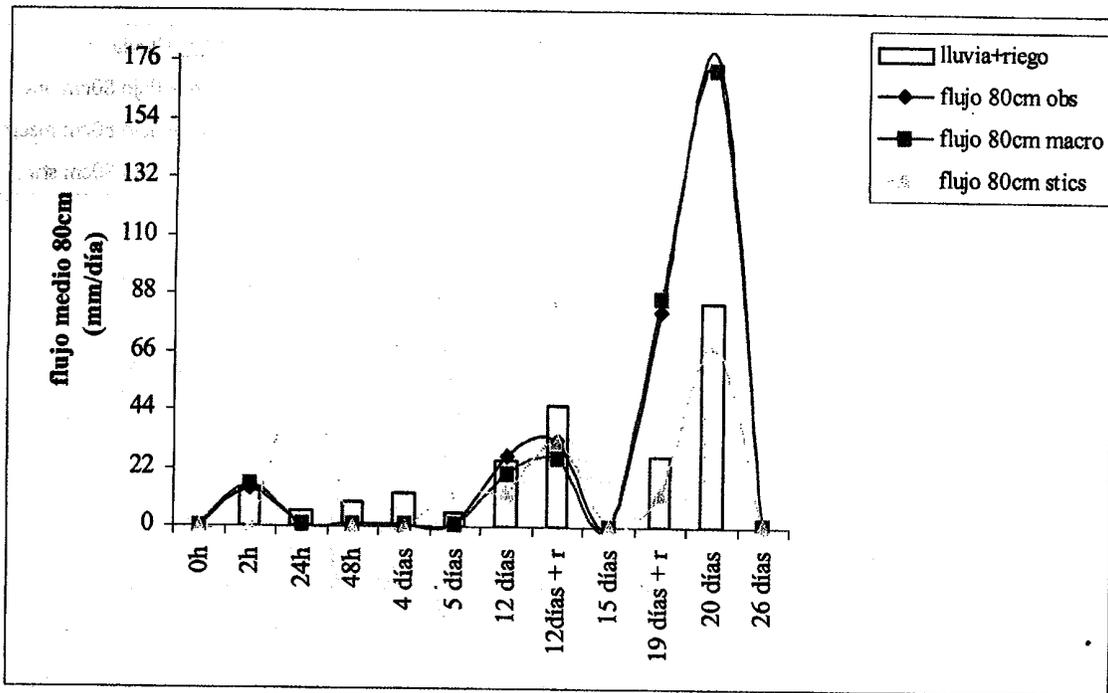


FIGURA 3. Comparación de los flujos de drenaje a los 80cm registrados durante el ensayo, con los simulados por los modelos MACRO y STICS.

TABLA 2. Análisis estadístico de la eficiencia de simulación de los modelos estudiados en la predicción de la humedad del suelo por capas del perfil

Estadígrafos	AE	RMSE	RMS	EF	CRM
Humedad media perfil					
MACRO	0,006	1,670	0,699	0,971	0,001
STICS	0,023	7,621	3,190	0,402	-0,007
Humedad 20 cm					
MACRO	0,007	2,040	0,741	0,988	0,009
STICS	0,039	14,189	5,153	0,421	0,036
Humedad 40 cm					
MACRO	0,006	1,609	0,695	0,928	0,007
STICS	0,019	4,951	2,140	0,321	-0,008
Humedad 60 cm					
MACRO	0,006	1,515	0,662	0,938	-0,009
STICS	0,021	5,864	2,561	0,071	-0,037
Humedad 80 cm					
MACRO	0,006	1,573	0,696	0,942	0,000
STICS	0,014	3,924	1,735	0,640	-0,014

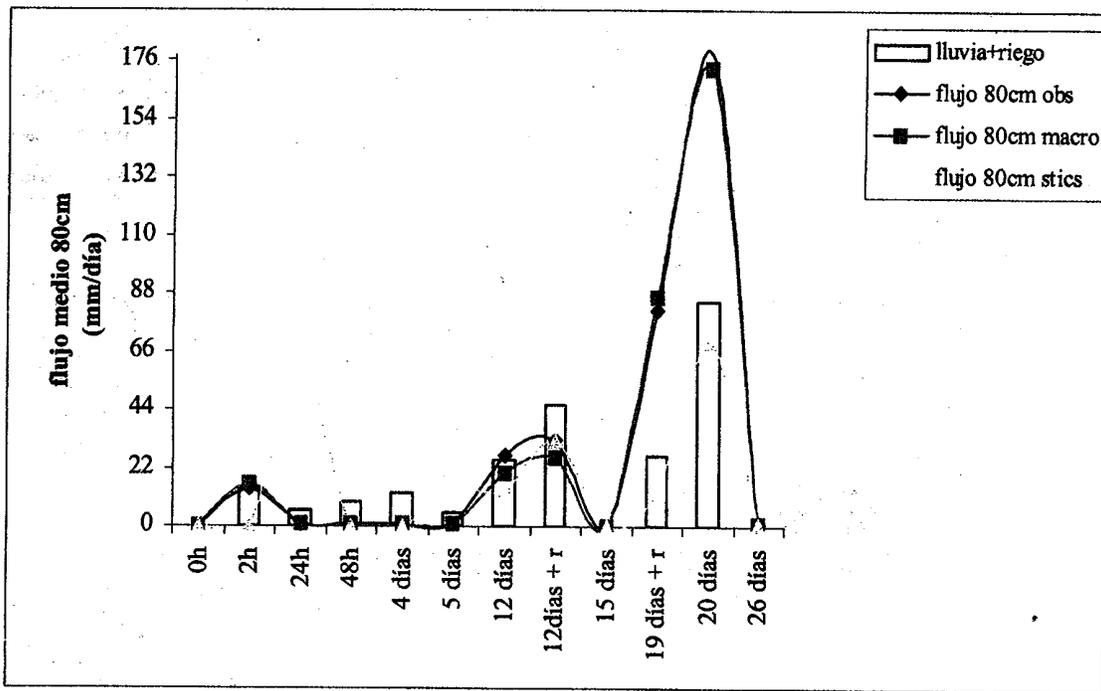


FIGURA 3. Comparación de los flujos de drenaje a los 80cm registrados durante el ensayo, con los simulados por los modelos MACRO y STICS.

TABLA 2. Análisis estadístico de la eficiencia de simulación de los modelos estudiados en la predicción de la humedad del suelo por capas del perfil

Estadígrafos	AE	RMSE	RMS	EF	CRM
Humedad media perfil					
MACRO	0,006	1,670	0,699	0,971	0,001
STICS	0,023	7,621	3,190	0,402	-0,007
Humedad 20 cm					
MACRO	0,007	2,040	0,741	0,988	0,009
STICS	0,039	14,189	5,153	0,421	0,036
Humedad 40 cm					
MACRO	0,006	1,609	0,695	0,928	0,007
STICS	0,019	4,951	2,140	0,321	-0,008
Humedad 60 cm					
MACRO	0,006	1,515	0,662	0,938	-0,009
STICS	0,021	5,864	2,561	0,071	-0,037
Humedad 80 cm					
MACRO	0,006	1,573	0,696	0,942	0,000
STICS	0,014	3,924	1,735	0,640	-0,014