



Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias
Universidad Agraria de La Habana
paneque@isch.edu.cu
ISSN (Versión impresa): 1010-2760
CUBA

2006

Teresa López / G. Cid / Felicita González / Graciela Dueñas / H. Ozier Lafontaine / J.
Sierra

PREDICCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA Y LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN SUELOS
FERRALÍTICOS ROJOS CULTIVADOS BAJO RIEGO EN EL SUR DE LA HABANA

Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, año/vol. 15, número 003

Universidad Agraria de La Habana

La Habana, Cuba

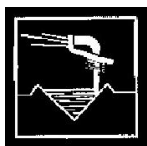
pp. 1-6

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

Universidad Autónoma del Estado de México

<http://redalyc.uaemex.mx>





SUELO Y AGUA
SOIL AND WATER

Predicción de pérdidas de agua y lixiviación de nitratos en suelos ferralíticos rojos cultivados bajo riego en el sur de La Habana

Prediction of water and nitrate leaches in ferrasols cultivated under irrigation in the south of Havana

Teresa López¹, G. Cid², Felicita González², Graciela Dueñas³, H. Ozier-Lafontaine⁴ y J. Sierra⁵

RESUMEN. Este trabajo tiene como objetivo fundamental definir relaciones que puedan predecir las pérdidas de agua y nitratos por debajo de la zona radical de los cultivos en suelos ferralíticos rojos del sur de La Habana. El trabajo se realizó en dos partes, primeramente se utilizó el modelo mecanicista MACRO para simular balances hídricos sobre suelo desnudo con un amplio rango de ingresos de agua. Como resultado se encontró una relación para estimar las cantidades de agua perdidas, por debajo de la zona radical, en función de las humedades precedentes y los ingresos totales diarios por concepto de precipitación más riego. La segunda parte del trabajo consistió en la simulación del mismo rango de cantidades de agua utilizado en la primera parte, combinado con cuatro cantidades diferentes de aplicación de fertilizante nitrogenado. Como resultado de estas simulaciones se obtuvo una relación para estimar las cantidades de nitratos lixiviados en el fondo del perfil del suelo, en función de las cantidades de agua total y fertilizante nitrogenado aplicado.

Los resultados mostraron que en los suelos de estudio las pérdidas de agua y nitratos pueden llegar a ser considerablemente grandes en dependencia de la humedad precedente al riego y los ingresos totales de agua y fertilizante al perfil, debido fundamentalmente al comportamiento de la conductividad hidráulica en los mismos. Por su parte las relaciones definidas pueden ser utilizadas con una precisión adecuada, para la predicción de las pérdidas de agua y lixiviación de nitratos en el perfil del suelo en estudio, para las condiciones de manejo del riego y fertilización nitrogenada de la mayoría de los cultivos agrícolas de la zona en estudio.

Palabras clave: simulación, movimiento de agua y nitratos, suelos irrigados.

ABSTRACT. The main objective of this work is to define relations to predict water and nitrate leaches under crop radical zone in Ferrasols of south of Havana. The work was done in two parts. First it was used a mechanistic model MACRO to simulate hydric balances in soil without crop with a wide range of water incomes to profile. As a result it was fitted a relation to predict water loses under crop radical zone as a function of precedent water content and daily total water incomes. In the second part of the work it was used the same range of incomes of water combined with four different quantities of applied nitrogen fertilizer. As a result it was defined a relation to estimate nitrate leaches at the bottom of soil profile as a function of total applied water and nitrogen fertilizer. The results showed that the loses of water and nitrate can be considerable in this soils in function of precedent water content and total incomes of water and nitrogen fertilizer due mainly to the behavior of hydraulic conductivity on this soils. The fitted relations can be used with a propped precision to predict the losses of water and nitrate leaches under studied soils for the conditions of water and nitrogen fertilization management of the majority of agricultural crops in the studied zone.

Key words: simulation, water and nitrate movement, irrigated soils.

Recibido 18/07/05, trabajo 70/06, investigación.

¹ Con la colaboración de Nadine Brisson. INRA. Francia.

² Dr. Inv. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD). Apdo. Postal 6090. C. Habana. Cuba. E- * : teresa@iird.cu

³ M.Sc. Inv. IIRD.

⁴ Inv. Instituto de Suelos de Cuba.

⁵ Inv. INRA- APC. Guadeloupe. Francia.

INTRODUCCIÓN

Del área agrícola de Cuba, los suelos del agrupamiento ferralítico 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 y los fertilizantes 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 y los solutos en sistemas agrícolas, ha resultado en la actualidad una herramienta útil e indispensable 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 mecanicistas 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 la fertilización, así como un uso racional y sostenible de los recursos (Urso *et al.*, 1999; Dust *et al.*, 2000; Jarvis *et al.*, 2000).

El presente estudio tiene como antecedentes dos trabajos donde se hace un análisis comparativo de dos modelos evaluados para la zona agrícola del sur de La Habana, STICS y MACRO (López *et al.*, 2002a y b), en cuanto a sus esquemas de resolución del balance de agua y nitrógeno en el suelo. Los resultados de estos trabajos demostraron que la predicción del comportamiento hídrico y la lixiviación del nitrógeno en el perfil del suelo se afecta considerablemente por la simplificación del esquema de balance de agua utilizado en los modelos. La comparación entre el modelo simplificado STICS (Brisson *et al.*, 1997), con el modelo de base física MACRO (Jarvis, 1996), 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.

Este trabajo tiene por tanto como objetivo fundamental utilizar el modelo mecanicista MACRO para definir relaciones que puedan predecir las pérdidas de agua y nitratos por debajo de la zona radical de los cultivos en suelos ferralíticos rojos del sur de La Habana. Estas relaciones podrán ser utilizadas, además, para corregir los valores simulados por el modelo funcional STICS de pérdidas de agua y nitratos y poder utilizar este último

para la predicción de estrategias de riego y fertilización nitrogenada en estas condiciones de suelo y clima y para cultivos de importancia económica de la zona de estudio.

Resumen de los antecedentes del trabajo con el modelo MACRO

El modelo MACRO (Jarvis, 1996), en su versión 3.2, considera el régimen no permanente del flujo de agua y el transporte de solutos en un suelo estratificado. Este modelo es capaz de simular un balance completo del agua, incluyendo el tratamiento de la precipitación (lluvia y riego), evapotranspiración, extracción de agua por las raíces del cultivo, percolación profunda y flujo horizontal hacia un dren soterrado. El modelo puede trabajar considerando uno o dos dominios de flujo (micro y macro poros), lo que permite una evaluación cuantitativa del impacto del flujo preferencial por las grietas y fisuras del suelo en los procesos de transporte de solutos.

Cuando se trabaja considerando dos dominios, los micro y macroporos operan como regiones de flujo separadas, cada una caracterizada por el grado de saturación, la conductividad hidráulica y el flujo; aunque también se considera el intercambio entre ambas zonas. Para el caso de un solo dominio (suelos considerados «rígidos») el modelo se reduce a la resolución de la ecuación de Richards para el flujo del agua en el suelo y las ecuaciones de convección-dispersión para el flujo de solutos.

Rodríguez y López (2000) realizaron una validación y un análisis de sensibilidad sobre sus variables más significativas para lo que utilizaron datos obtenidos en una prueba de Drenaje Interno realizada sobre un ferralítico rojo compactado en una zona del sur de La Habana. Se obtuvo una excelente correspondencia entre los perfiles de contenido de agua en el suelo y los flujos de drenaje interno medidos en el campo y simulados. Del análisis de sensibilidad realizado se obtuvo que MACRO presentó mayor sensibilidad a la humedad frontera y humedad residual, dos de los parámetros que definen las funciones hidráulicas del suelo.

Por su parte la comparación de este modelo con el modelo simplificado STICS (López *et al.*, 2002 b) demostró que 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. Los resultados mostraron que el modelo de base física MACRO, 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.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en dos partes. Primeramente se utilizó el modelo MACRO como herramienta para simular un balance de agua sobre suelo ferralítico rojo compactado con un amplio rango de ingresos de agua (riegos de 15 mm

cada dos días; de 25 mm semanales, de 50 mm cada 15 días y no riego) junto a dos períodos extremos de lluvia (año medio seco y año medio húmedo), según valores reportados para esta zona por Chaterlán (1998).

En la Tabla 1 se resumen las opciones y parámetros utilizados para definir la simulación del balance de agua en el perfil del suelo ferralítico rojo compactado con el modelo MACRO.

TABLA 1. Resumen de los parámetros que definen las propiedades hidráulicas del suelo ferralítico rojo compactado en la simulación con MACRO

Parámetro	Unidad	Significado	Profundidad	Valor
ASCALE	mm	Distancia de difusión efectiva (mitad del ancho de los agregados)	todas	1
KSM	mm/día	Conductividad hidráulica frontera (correspondiente a la humedad volumétrica frontera).	todas	0,1
XMPOR	% vol.	Humedad volumétrica frontera (humedad a partir de la cuál el agua se mueve por la macroporosidad).	20 40 60 80	37 44 44,8 45
ZM	-	Factor de tortuosidad (exponente n en el modelo de Brooks y Corey)	todas	0,5
CTEN	cm	Tensión del agua frontera.	todas	12
RESID	% vol.	Humedad residual.	todas	15
ZN	-	Factor de tortuosidad/ distribución de tamaño de poros en la macroporosidad (exponente n^* en el modelo de Mualem)	todas	4
KSATMIN	mm/h	Conductividad hidráulica saturada (mínimo valor cuando se considera la macroporosidad)	20 40 60 80	150 150 150 100
TPORV	% vol.	Humedad de saturación.	20 40 60 80	50 50 50 48
ZLAMB	-	Índice de distribución de tamaño de poros (exponente λ en el modelo de Brooks y Corey)	todas	0,1
ZP	-	Pendiente de la curva de encogimiento (0 cuando se considera suelo rígido)	todas	0

Como resultado de estas simulaciones se obtuvieron 100 valores de cantidades de agua perdidas por debajo de la zona radical que constituyen el término de Drenaje Interno en la ecuación de balance hídrico del suelo (DI), en mm/ día a la profundidad de 40 cm (profundidad radical para la mayoría de los cultivos agrícolas de la zona de estudio). Estos valores se correlacionaron con las correspondientes humedades precedentes a esta profundidad (θ_{pre40}) y los ingresos totales diarios por concepto de precipitación más riego ($P+R$). Con estos valores se efectuó un análisis de regresión múltiple y se encontró el modelo de mejor ajuste, utilizando el paquete informático STATISTICA sobre Windows, versión 4.5.

La segunda parte del trabajo consistió en la simulación del mismo rango de cantidades de agua utilizado en la

primera parte, combinado con 4 cantidades diferentes de aplicación de fertilizante nitrogenado: 145 kgN/ ha, 290 kgN/ ha, 435 kgN/ ha y 580 kgN/ ha. Cada combinación de agua y fertilizante se simuló en un período de 10 días y se repitió en tres períodos diferentes del año (enero, marzo, julio y octubre) para abarcar un rango amplio de ingresos de agua por lluvia y pérdidas por evaporación.

Como resultado de estas simulaciones se obtuvieron 50 valores de cantidades de nitratos lixiviados en el fondo del perfil de suelo analizado (Q_{les}) que se correlacionaron con las correspondientes cantidades de agua total (A_{guaT}) y fertilizante nitrogenado (N_{total}) aplicados. De igual forma se efectuó un análisis de regresión múltiple y se encontró el modelo de mejor ajuste utilizando el paquete informático STATISTICA sobre Windows, versión 4.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se muestra el resultado de la simulación en cuanto a la dependencia de las cantidades de agua perdidas por drenaje interno en el suelo ferralítico rojo compactado (*DISIM*, en mm/ día) en función de la humedad precedente (*HUMPRE*, en cm^3/cm^3) y los ingresos diarios de agua (*AguaD*, en mm/ día).

Como puede observarse, a medida que la humedad precedente aumenta por encima de los $0,40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ que en estos suelos corresponde al límite superior del agua disponible para las plantas (López, 2002), las cantidades de agua perdidas por debajo de la zona radical se incrementan considerablemente para ingresos diarios mayores de 40 mm. Estas pérdidas se hacen máximas para humedades por encima de los $0,45 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, aun para relativamente pequeños ingresos de agua, debido fundamentalmente al aumento de la conductividad hidráulica, que en estos suelos para este rango de humedades, puede llegar a ser dos veces mayor por cada 1 % de humedad volumétrica incrementada (López, 2002).

Los parámetros del modelo encontrado se dan en la Tabla 2, así como los resultados del análisis de regresión y de varianza del mismo. Como se puede apreciar se obtuvo un alto valor del coeficiente de determinación (0,966) y un error estándar de estimación relativamente bajo y todos los coeficientes de regresión resultaron altamente significativos, demostrando que las variables independientes describen adecuadamente el proceso. La calidad del modelo encontrado se reafirma en el análisis de varianza que resultó altamente significativo.

TABLA 2. Resultados del análisis de regresión múltiple para la variable drenaje interno a los 40 cm, DI_{40} , en un suelo ferralítico rojo compactado, en función de la humedad precedente, $q_{pre_{40}}$, y los ingresos totales diarios, $P+R$

Variable	Coef.	Error std	Nivel de signif.	Coef. R ²	Error std estimac.	D-Wat stat.
$\theta_{pre_{40}}$	-128,7380	53,1529	0,0173	0,9652	10,5946	2,178
$P+R$	0,8700	0,0186	0,0000			
$(\theta_{pre_{40}})^2$	298,5533	0,1789	0,0000			
Análisis de varianza de la regresión						
Fuente	SC	GL	SC media	Valor F	Nivel signif.	
Modelo	30 884,0	3	102 928,0	916,990	0,0000	
Error	10 887,8	97	112,246			

Esta relación es válida para estimar las pérdidas diarias por redistribución o drenaje a la profundidad de 40 cm (DI_{40}), en un suelo ferralítico rojo compactado, en función de la humedad volumétrica registrada a esta profundidad ($\theta_{pre_{40}}$) y los ingresos totales por lluvia y riego ($P+R$) producidos en el día precedente. La misma sólo es válida en el rango de humedades de $0,376$ a $0,587 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, y en el intervalo de ingresos de agua diarios simulados, de 0 a 260 mm/día.

No obstante, a pesar de estas limitaciones, el modelo encontrado resulta una herramienta práctica importante para la cuantificación de los balances hídricos en función del pronóstico del riego de los cultivos agrícolas de la zona de estudio, donde más del 70 % de los suelos son del tipo ferralítico rojo y el rango de humedades e ingresos analizados cubre toda la gama de manejos de agua que se realizan en dicha zona, desde el secano hasta el riego de alta frecuencia.

En la Figura 2, por su parte, se reflejan los resultados de

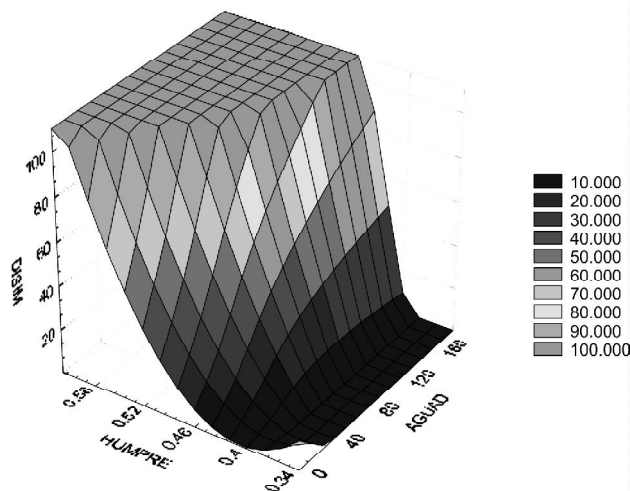


FIGURA 1. Resultados de la simulación en cuanto a la dependencia de las cantidades de agua perdidas por drenaje interno en el suelo ferralítico rojo compactado (*DISIM*, en mm/ día) en función de la humedad precedente (*HUMPRE*, en cm^3/cm^3) y los ingresos diarios de agua (*AguaD*, en mm/ día).

la simulación en cuanto a la dependencia de la cantidad de nitratos lixiviados en el fondo del perfil del suelo en estudio y de las cantidades totales de agua y fertilizantes aportados.

Como puede apreciarse la lixiviación de los nitratos se hace máxima, con valores mayores a los 500 kg/ha, para cantidades mayores a los 250 kgN/ha aportados como fertilizante y para cantidades totales (riego más lluvia) de agua aportadas mayores a los 650 mm. No obstante para relativamente pequeñas cantidades de nitrógeno aportadas, la lixiviación puede llegar a tomar valores cercanos a los 400 kg/ha para grandes ingresos totales de agua (por encima de 400 mm). Este comportamiento está dado fundamentalmente por los altos valores de flujo del agua que pueden cuantificarse en estos suelos para grandes ingresos y altos valores de humedad en el perfil del suelo, debido al aumento considerable de la conductividad hidráulica, como ya se vio en el análisis de la Figura 1.

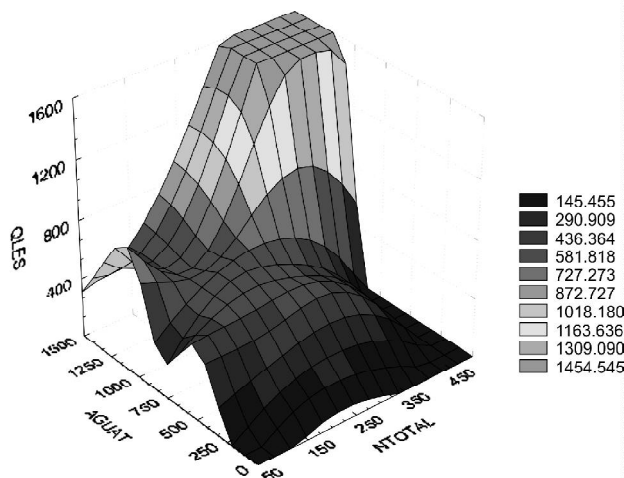


Figura 2. Resultados de la simulación en cuanto a la dependencia de la cantidad de nitratos lixiviados en el fondo del perfil (Qles, en Kg/ha) del suelo Ferralítico Rojo compactado de las cantidades totales de agua y fertilizante aportados (AguaT, en mm/periodo; Ntotal, en KgN/ha).

En la Tabla 3 se resumen los parámetros del modelo de mejor ajuste encontrado así como los resultados del análisis de regresión y de varianza del mismo. Igualmente se tiene para este modelo un alto coeficiente de determinación (0,963) y un error estándar de estimación relativamente bajo y todos los coeficientes de regresión así como el análisis de varianza del modelo resultaron altamente significativos.

Esta relación puede ser utilizada para predecir las cantidades de nitratos lixiviados fuera del perfil de 80cm en suelos Ferralíticos Rojos compactados, para el rango de ingresos de agua y fertilizante nitrogenado evaluados (0-1500 mm/periodo y 50-500 kgN /ha). No obstante estas limitaciones, al igual que la relación anterior para las pérdidas de agua, resulta una herramienta útil para el manejo racional de los recursos agua y fertilizantes en la mayoría de los cultivos agrícolas de la zona de estudio.

TABLA 3. Resultados del análisis de regresión múltiple para la variable cantidad de nitratos lixiviados, Qles, por debajo de los 80cm de profundidad en un suelo Ferralítico Rojo compactado, en función de las cantidades totales de agua y fertilizante nitrogenado aportados por periodo (AguaT y Ntotal respectivamente)

Variable	Coef.	Error std	Nivel de signif.	Coef. R ²	Error std estimac.	D-Wat stat.
AguaT	0,5845	0,0134	0,0003	0,9633	13,170	1,77
NTotal	0,6059	0,0127	0,0012			
Análisis de varianza de la regresión						
Fuente	SC	GL	SC media	Valor F		Nivel signif.
Modelo	308 784,0	2	102 928,0	916,990		0,0000
Error	10 887,8	97	112,246			

CONCLUSIONES

- En los suelos ferralíticos rojos compactados las pérdidas de agua y nitratos pueden llegar a ser considerablemente grandes en dependencia de la humedad precedente al riego y los ingresos totales de agua y fertilizante al perfil, debido fundamentalmente al comportamiento de la conductividad hidráulica en los mismos.

- Las relaciones definidas utilizando como herramienta el modelo de simulación MACRO, pueden ser utilizadas con una precisión adecuada, para la predicción de las pérdidas de agua y lixiviación de nitratos en el perfil de suelo ferralítico rojo compactado para las condiciones de manejo del riego y fertilización nitrogenada de la mayoría de los cultivos agrícolas de la zona de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRISSEON NADINE, BRUNO MARY *et al.*: *Notice utilisateur. Modele STICS*, INRA, AGPM-Agrotransferts-CETIOM-CIRAD-ITCF, 1997.
- CHATERLÁN, YOÍMA: « Informe resumen de la Estación Climática de Pulido», Alquízar, Publicación Interna IIRD, 1998.
- 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: 46-50, (Número Especial), 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.

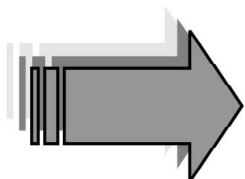
- JARVIS, N.: «The MACRO Model (Version 3.2)- Technical Description and Sample Simulation», **Monograph 19**, 51 pp., Depart. Soil Sci., Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala, 1996.
- JARVIS, N.J.; C.D. BROWN and E. GRANITZA: «Sources of error in model predictions of pesticide leaching: a case study using the MACRO model», *Agricultural Water Management*, 44: 247-262, 2000.
- LÓPEZ, TERESA *et al.*: «Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del sur de La Habana: Contribución metodológica al procedimiento actual para la determinación de los balances hídricos», Tesis Dr., INIFAT, IIRD, marzo 2002.
- LÓPEZ, TERESA *et al.*: «Estudio comparativo de dos modelos de simulación de transferencias hídricas en un Ferrasol del sur de La Habana», *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 11(1): 83-90, 2002a.
- LÓPEZ TERESA *et al.*: Informe parcial Etapa 02: «Observaciones experimentales de las variables necesarias para la completa evaluación de los modelos», Proyecto 11-06, PR Recursos Naturales, 10 pp., MINAG, 2002b.
- 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*, vol. 15 (1-2): 47-48, Producción y Protección de Vegetales, España, 2000.
- URSO, G.D.; M. MENENTI and A. SANTINI: «Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management», *Agricultural Water Management*, 40: 291-302, 1999.



CENTRO DE MECANIZACIÓN AGROPECUARIA

LABORATORIO DE OLEOHIDRÁULICA

SERVICIOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS



- Descontaminación de aceites oleohidráulicos
- Fabricación de equipos portátiles de filtraje de aceites
- Recuperación (emboquillado) y fabricación de mangueras
- Diagnóstico y evaluación de circuitos oleohidráulicos y sus componentes
- Cursos y entrenamientos de posgrado

Solicitudes por correo
electrónico a:
Dr. Mario Herrera Prat
E-mail:
udcema@infomed.sld.cu