

Aplicación de modelos agro hidrológicos para predecir el uso del agua y el rendimiento de cultivos. Revisión

Applying agrohydrological models for estimating water use and crop yields in Cuba. A review

María Elena Ruiz¹, Teresa López², Hanoi Medina¹, Mayra Ferrer³ y Jorge García⁴

RESUMEN. Los modelos de simulación para cultivos resultan un elemento importante en los sistemas actuales para la toma de decisiones. Sin embargo se han desarrollado y utilizado para climas templados. En esta exposición se describen los primeros trabajos realizados en Cuba para la calibración, validación y utilización de los modelos agrohidrológicos SWACROP, DRAINMOD, SWAP, MACRO y STICS. El primer aporte cubano fue la utilización en condiciones tropicales del modelo SWACROP para estimar el rendimiento y el uso del agua para la variedad de papa Desiree en suelos Ferralíticos. La función extracción de agua por las raíces de la papa constituyó un aporte internacional. Posteriormente el modelo SWAP fue calibrado, validado y empleado para la caña de azúcar para estimar los rendimientos del cultivo ante los cambios de clima, suelos o fecha de siembra. Su unión a un sistema de información geográfica constituyó un resultado de la Universidad Agraria de la Habana aplicado en áreas del CAI Héctor Molina que también fue utilizado en México, Venezuela, Ecuador y Jamaica a través de proyectos internacionales. El modelo DRAINMOD fue empleado para evaluar la opción óptima de diseño de un sistema de drenaje y los modelos MACRO y STICS, demostraron la necesidad de modificar la metodología utilizada actualmente en el País para el riego y que implica errores entre 15 y 55%. Los trabajos referidos anteriormente, se encuentran contenidos en 2 tesis de doctorado, 3 tesis de maestría, 2 monografías, un capítulo de libro extranjero y 18 artículos científicos nacionales e internacionales.

Palabras clave: modelos agrohidrológicos, propiedades hidráulicas, revisión, riego.

ABSTRACT. Crop simulation models are important tools in decision systems. Nevertheless they have been developed and used in temperate climates. This papers review the first works made in Cuba for calibration, validation and utilization of the agrohydrological models SWACROP, DRAINMOD, SWAP, MACRO and STICS. The first Cuban contribution was the use of model SWACROP in tropical conditions for estimate water use and crop yields of potato (v. Desiree) in Ferralsols. The potato root water extraction function determined was an international contribution. Later SWAP model was calibrated, validated and used for determining changes in sugar cane yields produced by changes in weather, soils and planting dates. SWAP-GIS approach was used in Hector Molina sugar cane factory and also in Mexico, Venezuela, Ecuador and Jamaica through international projects. Model DRAINMOD was used to evaluate the optimum design for a drainage system and models MACRO and STICS showed the necessity of modify the methodology that is used actually in Cuba for irrigation planning. This old methodology causes errors between 15 and 55 %. The mentioned works are found in two PhD thesis, 3 Master thesis, 2 monographs, one book chapter published out Cuba and 18 scientific papers in Cuba and abroad.

Key words: Agrohydrological models, hydraulic properties, review, irrigation.

Recibido 12/04/06, trabajo 13/esp./06, revisión.

¹ Dr. Prof., Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Grupo de Investigaciones Agrofsicas. Apdo. 18, San José de las Lajas, La Habana, Cuba. 32700 E- : mruiz@isch.edu.cu.

² Dr. Inv., Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), Ministerio de la Agricultura.

³ M.Sc., Inv., Instituto de Investigaciones de la caña de azúcar (INICA).

⁴ M.Sc., Prof., Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Grupo de Investigaciones Agrofsicas.

Reconocimiento (Acknowledgement): para el Dr. Joaquín Ruiz por su activa participación en este trabajo.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación para interpretar, cuantificar y llevar a cabo predicciones sobre las necesidades hídricas de los cultivos, el desarrollo de éstos, sus rendimientos y las afectaciones que sufren dada la diversidad de factores que sobre ellos influyen, se han desarrollado durante tres décadas. Como herramientas útiles en la investigación agrícola e hidrológica, han permitido realizar experimentos del tipo «que pasaría si» sin necesidad de llevar a cabo costosos y a veces imposibles experimentos de campo (Burke et al., 1999; Singh et al., 1999).

Muchos modelos diferentes han sido desarrollados, en un inicio para explicar diversos procesos sólo en el sistema suelo-agua, o sólo en la planta o en la interacción planta atmósfera. En el ámbito internacional se aprecian tres países con mucha fuerza y años de trabajo: Australia (ver revisión de Hammer (2002), Holanda (ver revisión de ITERSUN, et al., 2003) y Estados Unidos (ver revisión de Jones, et al., 2003), no obstante los modelos de base física (aquellos basados en leyes físicas del Sistema Suelo-Agua-Planta-Atmósfera) y que integran los diferentes procesos que influyen en el cultivo, llevan a los más exactos resultados en las simulaciones (Wagenet et al., 1991; Leenhardt et al., 1995; Connolly, 1998).

Entre los modelos desarrollados se encuentran el modelo SWACROP (Wesseling et al., 1989), posteriormente derivado en continuas versiones hasta llegar al SWAP de Van Dam et al (1997). Estos modelos han estado dirigidos a estimar los rendimientos de cultivos. Otros modelos como el MACRO (Jarvis, 1996) y el STICS (Breeson et al., 1997) han sido empleados haciendo énfasis al movimiento del agua en el suelo, mientras que el DRAINMOD (Skaggs, 1980) ha sido construido para el diseño de sistemas de drenaje.

No obstante, como ya fue señalado, estos modelos se han desarrollado para condiciones bien diferentes a las de Cuba, por consiguiente resulta necesario determinar los parámetros y funciones de entrada que permitan su aplicación en nuestras condiciones y por tanto facilitar la toma de decisiones. En este trabajo se enumeran de forma breve los trabajos relacionados con la utilización de modelos de simulación para estimar el uso del agua y los rendimientos de cultivos, y para encontrar las funciones y parámetros de entrada necesarios. Se realizan entonces aportes que no constituyen una simple extensión de tecnología.

DESARROLLO

El primer aporte cubano en esta materia fue la utilización en condiciones tropicales del modelo SWACROP (Ruiz, 1997) para estimar el rendimiento y el uso del agua por la variedad de papa Desiree en suelos Ferralíticos. Este trabajo obtuvo el premio a la mayor originalidad en la Universidad Agraria de la Habana (UNAH) en 1997. Para este modelo fueron encontradas las funciones y parámetros de entrada, entre ellos la función de extracción de agua por las raíces del cultivo, publicada en la conocida revista *Potato Research* (Utset, et al., 2000), con la coautoría del Prof. Reiner Feddes (Universidad de Wageningen) reco-

nocida personalidad en la temática. Simultáneamente se aplica el modelo DRAINMOD (López, 1996) para evaluar la opción óptima de diseño de un sistema de drenaje, sin necesidad de llevar a cabo el costoso experimento que esto implicaría. Posteriormente, se determinaron los parámetros y funciones de entrada para disponer de un modelo para la caña de azúcar que permitiese estimar los rendimientos del cultivo y sus afectaciones ante los cambios de clima, suelos o fecha de siembra. Esto se logró mediante la ejecución de un proyecto nacional de ciencia y técnica (CITMA, 1996) en conjunto con el Instituto de investigaciones de la caña de azúcar (INICA) y el Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD). El trabajo experimental se ejecutó en la Estación Experimental de la Caña de azúcar en Jovellanos, Matanzas. Las propiedades hidráulicas de los suelos, indispensables como entrada a los modelos, fueron estudiadas ampliamente: se realizaron estudios sobre los métodos para su determinación tanto en laboratorio como en el campo, de los modelos más convenientes para expresar dichas propiedades y se publicaron por primera vez los parámetros para describirlas en los principales grupos de suelos cubanos (Ruiz y Utset, 1992, 1995a, 1995b, 1996; Ruiz et al., 1994; 1995), por último se compararon las funciones de pedotransferencia (Bouma et al., 1987) para el caso de los suelos Ferralíticos Rojos determinando la más conveniente para nuestros suelos (Medina, et al, 2001). Estas funciones se utilizan actualmente para extender a grandes regiones la utilización de los modelos cuando no se conocen a esta escala las propiedades hidráulicas determinadas en laboratorio o «in situ». Estos resultados han sido incorporados a la docencia de pregrado y postgrado, y se han escrito dos monografías (Ruiz, et al, 2001; 2002).

La primera versión del modelo fue presentada en reporte técnico ante el Comité de expertos del CITMA en 1999 (Ruiz, et al., 1999). La calibración y el análisis de sensibilidad del modelo está contenido en una tesis de Maestría titulada «Puesta a punto y análisis de sensibilidad del modelo SWAP para el manejo del agua en la caña de azúcar» (Medina, 1998). Otra tesis de maestría, «Determinación de la función absorción de agua por las raíces de la caña de azúcar variedad C-323-68», fue dedicada a una de las principales funciones: la extracción de agua por las raíces de la caña de azúcar (García, 1998; García, et al., 1999). Posteriormente el modelo en unión a un sistema de información geográfica, a través de una interfase (Garea, 1999) constituyó el resultado «Sistema para predecir la afectación en los rendimientos de la caña de azúcar por clima y suelos» de la Universidad Agraria de la Habana, resultado que también fue avalado por dirección del CAI Héctor Molina Riaño. También fue utilizado en los proyectos internacionales Efectos del fenómeno del Niño – Oscilación Sur (ENOS) en los rendimientos de la caña de azúcar en varios países latinoamericanos (México, Venezuela, Cuba) (ISP III 47, 1998) y Uso de un generador de tiempo y un modelo para predecir los efectos sobre el rendimiento de la caña de azúcar en varios países latinoamericanos (Ecuador, Jamaica, Cuba) (PARA-001, 2002). Se empleó también en un proyecto de investigación entre la Universidad de

Ghent (Bélgica) y la UNAH titulado Mejora del manejo de suelos salinos plantados de caña de azúcar usando Geoinformática. (EI-479, 1999) Un conjunto de publicaciones contiene los principales resultados (Ruiz y Utset, 1998a; 1999; Ruiz, et al., 1996; 2001; 2003).

Por otra parte estudios de las necesidades hídricas del frijol y el papayo, se llevaron a cabo empleando los modelos MACRO y STICS, demostrando la necesidad de modificar la metodología utilizada actualmente en el País para el riego y que implica una pérdida del agua suministrada entre un 15 y 55% (López, 2001; López, et. a.l., 2002; 2003). Otros trabajos vinculados son los de González y López (2002); González et al., (2002) y Hernández et al.(2003).

Los trabajos relacionados con la aplicación de modelos agrohidrológicos en Cuba y con la determinación de las principales propiedades necesarias para su utilización, se encuentran contenidos en 2 tesis de doctorado, 3 tesis de maestría, 2 monografías, un capítulo de libro extranjero arbitrado a través de la revista Soil and Tillage de Elsevier, 22 artículos científicos, 3 de ellos en revista de impacto. El trabajo realizado constituye un conjunto de aportes en condiciones tropicales y cubanas en particular, para el empleo de los modelos de simulación en la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

- Se ofrecen por primera vez en Cuba los parámetros que describen las propiedades hidráulicas (curva tensión humedad y función conductividad hidráulica) para los principales grupos de suelos cubanos. Estos resultan indispensables para el empleo de cualquier modelo de simulación de base física para estimar los rendimientos de cultivos, sus necesidades hídricas o las variantes óptimas de riego/drenaje.
- Se calibra y valida por primera vez en condiciones tropicales el modelo SWACROP para la papa (*Solanum tuberosum* L.c.v. Desiree), sólo utilizado anteriormente para condiciones de clima templado, aportándose a nivel internacional una nueva función para describir la extracción de agua por las raíces.
- Se obtiene una versión del modelo SWAP para la caña de azúcar que permite predecir las afectaciones por cambios en clima, suelo y fecha de siembra que fue empleado en una UBPC del CAI Héctor Molina y los países México, Venezuela, Jamaica y Ecuador a niveles de empresas cañeras, a través de proyectos internacionales.
- Se ofrece un aporte metodológico para la programación del riego que implica eliminar errores actuales en la aplicación del agua entre 15 y 55%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CITMA: Modelación del efecto de los factores climáticos en la humedad del suelo y el rendimiento de la caña de azúcar en suelos Ferralíticos de la llanura sur Habana-Matanzas. PNCT 050130006, 1996.
- BOUMA, J., VAN LANEN, J. A. J.: Transfer functions and threshold values: From soil characteristics to land qualities p. 106-110. In K.J. Beek et al (ed) Quantified land evaluation. Int. Inst. Aerospace Surv. Earth Sci ITC Publ 6 ITC, Enschede, The Netherlands, 1987.
- BRISSON NADINE, BRUNO MARY: Notice utilisateur. Modele STICS. INRA. AGPM-Agrotransferts-CETIOM-CIRAD-ITCF, 1997.
- BURKE, S., MULLIGAN, M., THORNES, J. B.: Optimal irrigation efficiency for maximum plant productivity and minimum water loss. Agric. Water Management 40:377-391, 1999.
- EI-479. Mejora del manejo del manejo de suelos salinos plantados de caña de azúcar usando Geoinformática. Proyecto financiado por la agencia VLIR de Flandes, Bélgica, 1999-2003.
- GARCÍA, J.: Determinación de la función absorción de agua por las raíces de la caña de azúcar variedad C-323-68. Tesis para optar por el título de Master en Física Aplicada a la Agricultura, 1998.
- GARCÍA, J., UTSET, A., RUIZ, MARÍA: Uso del modelo SWACROP para determinar las necesidades hídricas de la papa.III. Absorción de agua por las raíces. Ciencias Tec. Agrop.8(1), 67-70,1999.
- GAREA, E.: Interfase entre el modelo SWAP y el SIG ILWIS. Reporte Técnico No. 10 . PNCT 050130006, 1999.
- GONZÁLEZ, FELICITA, LÓPEZ, TERESA: Distribución espacial de la conductividad hidráulica de saturación en un área cañera de la llanura Habana-Matanzas. Ciencias técnicas Agropecuarias 11 (1): 71-76, 2002
- GONZÁLEZ, FELICITA, LÓPEZ, TERESA, CID, G.: Aplicación de técnicas multivariadas a la estimación de la curva tensión humedad en un suelo Ferralítico Rojo de la llanura Habana-Matanzas. Ciencias Técnicas Agropecuarias 11 (1):61-65, 2002.
- HAMMER, G.L., KROPFF, M.J., SINCLAIR, T.R. and PORTER, J. R.: Future contributions of crop modeling-from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. Europ. J. Agronomy 18 (2002), 15-31, 2002.
- HERNÁNDEZ, C., MARTÍNEZ, R., PUIG, O., LÓPEZ, TERESA, SOTOMAYOR, G.: Elementos agronómicos para el riego localizado en el cultivo del papayo. Ciencias Técnicas Agropecuarias 12(2):55-60, 2002.
- ITTERSUM, M.K. LEFFELAAR, P.A. VAN KEULEN, H., KROPFF, M.J., BASTIAANS L., GOUDRIAAN, J.: On approaches and applications of the Wageningen crop models. Europ. J. Agronomy 18 (2003) 201_234

- ISP-3-47: Efectos del fenómeno del Niño – Oscilación Sur (ENOS) en los rendimientos de la caña de azúcar en varios países latinoamericanos (Mexico, Venezuela, Cuba). Proyecto financiado por el Instituto Interamericano para el estudio del cambio Global (IAI), 1999-2000
- JARVIS, N.: The MACRO Model (Version 3.2)- Technical Description and Sample Simulation. Monograph 19. Depart. Soil Sci., Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala, 1996, 51pp.
- JONES, J.W., HOOGENBOOM, G., PORTER, C.H., BOOTE, K.J., BATCHELOR, W.D., HUNT, L.A., WILKENS, P.W., SINGH, U., GIJSMAN, A.J., RITCHIE, J.T.: The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235-265, 2003.
- LÓPEZ, G.: Empleo de la modelación para el diseño de Sistema de Drenaje en Suelos con nivel Freático Somero. Tesis en opción al Título de Master en Riego y Drenaje, 1996.
- LÓPEZ, T.: Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del sur de La Habana: contribución metodológica al procedimiento actual para la determinación de balances hídricos. Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. 2002.
- LÓPEZ, TERESA, CID, G., GONZÁLEZ, F., DUEÑAS, G., LAFONTAINE, H. SIERRA, J.: Estudio comparativo de dos modelos de simulación de transferencias hídricas en un ferralsol del sur de la Habana. *Ciencias técnicas Agropecuarias* 11(1): 83-89,2002.
- LÓPEZ, T., RUIZ, M. E. GONZÁLEZ, F.: Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del sur de la Habana: Contribución metodológica en la determinación de los balances hídricos. *Ciencias Técnicas Agropecuarias* 12(2):49-53, 2003.
- MEDINA, H.: Puesta a punto y análisis de sensibilidad del modelo SWAP para el manejo del agua en la caña de azúcar. Tesis para optar por el título de Master en Física aplicada a la Agricultura. 1998.
- MEDINA, H., TARAWALLY, M., DEL VALLE, ALICIA, y RUIZ, MARÍA E.: Estimating soil water retention curve in rhodic ferralsols from basic soil data. *Geoderma* 108(3-4):277-285, 2002.
- PARA-001: Uso de un generador de tiempo y un modelo para predecir los efectos sobre el rendimiento de la caña de azúcar en varios países latinoamericanos (Ecuador, Jamaica, Cuba). Proyecto financiado por el Instituto Interamericano para el estudio del cambio Global (IAI), 2002-2003.
- RUIZ, M. E.: Utilización del modelo SWACROP en la simulación del uso del agua y el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.c.v. Desiree) en suelos Ferralíticos Rojos. Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. 1997.
- RUIZ, MARÍA E. UTSET, A.: Curva tensión humedad I. Su determinación e interpretación. *Ciencias Técnicas Agropec.* Vol 5(2):69-72,1995^a
- RUIZ, MARÍA E. UTSET, A.: Curva tensión humedad II. Modelos analíticos. *Ciencias Técnicas Agropec.* Vol 5(2): 73-76,1995.
- RUIZ, MARÍA E. UTSET, A., HERRERA, J., LLANOS, MARÍA A.: Curva tensión humedad III. Comparación de tres modelos analíticos. *Ciencias Técnicas Agropec.* Vol 5(2): 77-80,1995b.
- RUIZ, MARÍA E. UTSET, A.: Curva tensión-humedad para algunos agrupamientos de suelos cubanos. *Cienc. Tec. Agrop.* 3(1):11-14, 1992.
- RUIZ, MARÍA E. UTSET, A.: El tensiómetro. Fundamento y puesta a punto. *Ciencias Tec. Agrop.* 6(1):1-3, 1996.
- RUIZ, MARÍA E. UTSET, A., LAU, A.: Determinación de la conductividad capilar a partir del método del drenaje interno y de la curva tensión-humedad. *Ciencias Técnicas Agropecuarias* Vol. 4(2):55-59, 1994.
- RUIZ, M., UTSET A., MEDINA, H., GARCÍA, J., FLEITAS, E., RUIZ, J., FERRER, M.: Modelo determinístico para estimar el rendimiento de la caña de azúcar. Reporte Técnico No.3, PNCT 050130006, Ministerio de Ciencia y Tecnología. Habana, 1999.
- RUIZ, MARÍA E. UTSET, A., MEDINA, H. RUIZ, J. FERRER, MAYRA, DEL VALLE, ALICIA, GARCÍA, J. FLEITAS, E.: A simple SWAP model version for estimating sugar cane yields under rainfed conditions. In «Soils and Soil Physics in Continental Environment. Allied Publishers, Chennai. 2003.
- RUIZ, MARÍA ELENA UTSET, A., MEDINA, H., FLEITAS, E.: Monografía titulada «Algunos aspectos sobre la Curva Tensión Humedad». Versión electrónica UNAH ISBN 959-16-0133-6. Julio 2001
- RUIZ, MARÍA ELENA UTSET, A., MEDINA, H., FLEITAS, E.: Monografía titulada «Determinación de la Conductividad Hidráulica en suelos». Versión electrónica ISBN 959-16-0133-6. Septiembre 2002.
- RUIZ, MARÍA, UTSET, A.: Uso del modelo SWACROP para determinar las necesidades hídricas de la papa. I. Fundamento teórico. *Ciencias Tec. Agrop.*, 7 (1), 1998.
- RUIZ, MARÍA, UTSET, A.: Uso del modelo SWACROP para determinar las necesidades hídricas de la papa.II. Propiedades hidráulicas del suelo. *Ciencias Tec. Agrop.*8(1), 61-65, 1999.
- RUIZ, MARÍA, UTSET, A., ROQUE, R., BERNAL, P.: Simulación del uso del agua y el rendimiento de la patata en un Ferralsol. *Investigación Agraria. Serie Producción y Protección de Vegetales (España)*. 11(3), 1996.

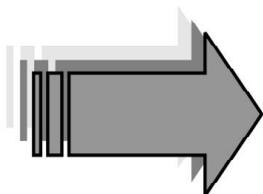
- RUIZ, MARÍA, UTSET, A., RUIZ, J. DEL VALLE, ALICIA, MEDINA, H., FERRER, MAYRA GAREA, E., FLEITAS E.: Sistema para estimar la afectación en los rendimientos de la caña de azúcar por clima y suelos. Proceedings del XV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. 2001.
- SINGH, G., BROWN, D.M., BARR, A.G., JUNG, R.: Modelling soil water status for irrigation scheduling in potatoes. II. Validation. Agric. Water Manag. 23:343-358, 1999..
- SKAGGS, R.W. DRAINMOD: Reference Report. Methods for design and evaluation of drainage water management systems for soil with high water tables, USDA-SCS, 324p., 1980.
- UTSET, A., RUIZ, MARÍA E., GARCÍA, J., FEDDES, R. A: A SWACROP-based potato root water-uptake function as determined under tropical conditions. Potato Research 43:19-29, 2000.
- UTSET, A., RUIZ, M:E., MEDINA, H., DEL VALLE, A. y GAREA E. A: modeling-GIS approach for estimating sugar-cane yields in some Cuban soils. Ciencias Técnicas Agropecuarias 11(1):33-45, 2002.



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