

ARTÍCULO ORIGINAL

# Modelación del efecto de la variabilidad de las precipitaciones en los términos del balance hídrico de un suelo Ferralítico Rojo

## *Modeling the effect of rainfall variability on soil water balance of a Rhodic Ferrasol*

Hanoi Medina González<sup>1</sup>; Jorge García Coronado<sup>1</sup>; María E. Ruiz Pérez<sup>1</sup>

**RESUMEN.** Se ilustra una metodología para evaluar el efecto de posibles cambios del régimen de precipitaciones en el balance hídrico de un suelo Ferralítico Rojo sembrado con papa bajo riego en la provincia Mayabeque. Para ello se crean escenarios de variabilidad en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y se evalúa el efecto de éstos en la respuesta de un modelo de simulación en términos del número de riegos para mantener el suelo por encima de un nivel umbral de humedad y el agua percolada. El estudio permite analizar la variabilidad de las precipitaciones en la dinámica de la humedad mediante la generación estocástica de valores de precipitación y un modelo basado en la ecuación de Richards. Se demuestra que bajo los escenarios considerados en el trabajo el número de riegos necesario para suplir una determinada demanda depende de manera análoga de la frecuencia y la distribución de las precipitaciones. Mientras, la percolación está sujeta básicamente a las variaciones de la lámina de precipitaciones a partir de un determinado umbral. Los análisis sugieren que el problema actual con la eficiencia del riego se relaciona más con las dosis actuales que con las frecuencias de riego.

**Palabras clave:** escenarios de precipitación, modelo de simulación, riego, propiedades hidráulicas del suelo.

**ABSTRACT.** It is illustrated a methodology for evaluating the effect of possible changes in the rainfall regime on the soil water balance, in a Red Ferrasol cultivated with potato under irrigation in Mayabeque province. With that purpose scenarios of the variability in the frequency and the intensity of precipitations are created; whilst their effect in the response of a simulation model in terms of the number of irrigations and the percolation for keeping the soil moisture above a certain threshold. The study provides an efficient methodology for the analysis of rainfall variability in the soil moisture dynamics from the stochastic generation of precipitation values and a model based on the Richards equation, implemented in a finite differences scheme. It is demonstrated that under the considered scenarios in this work the number of irrigations needed for supplying a certain demand analogously depends on both, the frequency and the distribution of rainfalls. Percolation is instead basically dependent on the changes in the rainfall amount from a certain threshold. The analyses suggest that the current problem with the water efficiency of the irrigation mainly concerns on the present water dosages rather than with the frequency.

**Keywords:** rainfall scenarios, simulation model, irrigation, soil hydraulic properties.

## INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática, en especial la variabilidad en la ocurrencia en intensidad de las precipitaciones, constituye un desafío creciente para el manejo hídrico eficiente de los suelos. Las evidencias observacionales indican que el clima de Cuba se ha hecho más cálido, y este incremento de la temperatura ha estado acompañado de una reducción del total de precipitaciones anuales del 10 al 20%, y un aumento de la

variabilidad interanual del 5 al 10% (Lapinel, 1988; Centella *et al.*, 1997; Centella *et al.*, 1998; Lapinel *et al.*, 2003).

Sin embargo, la escala de temporal de los cambios en el régimen de precipitaciones, la complejidad y multiplicidad de los factores que intervienen en la respuesta de los suelos y los cultivos a los mismos, así como la limitada disponibilidad de recursos, imposibilitan una correcta evaluación de la respuesta agrohidrológica mediante el diseño de experimentos

**Recibido** 27/06/11, aprobado 20/07/12, trabajo 53/12, artículo original.

<sup>1</sup> Dr. C., Profesor, Universidad Agraria de La Habana, (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Grupo de Investigaciones Agrofísicas, Autopista Nacional km 23 ½ y Carretera de Tapaste, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, E-✉: hanoi@isch.edu.cu

convencionales de campo. Solo a través del empleo de los modelos de simulación se pueden tomar en cuenta los aspectos esenciales relacionados con la dinámica del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera.

Gran parte de los modelos de simulación agrohidrológicos sintetizan el comportamiento hidráulico de los suelos a partir de relaciones no lineales entre la humedad,  $\theta$ , el potencial matricial,  $h$ , y la conductividad hidráulica (Hillel, 1998; Romano y Palladino, 2002). Dichas relaciones se identifican a través de la curva de retención de humedad de los suelos,  $\theta(h)$  (en lo adelante se usa CRHS) y la función conductividad hidráulica,  $K(h)$ , reconocidas como propiedades hidráulicas del suelo (Kutílek, 2005).

Mientras, para la modelación de los cambios en el régimen de las precipitaciones se debe necesariamente tomar en cuenta el carácter fuertemente estocástico de esta variable (Rodríguez Iturbe y Porporato, 2004). La combinación de escenarios de variabilidad de las lluvias generados estocásticamente y un modelo de simulación de base física basado en la ecuación de Richards (Richards, 1931) puede ser una estrategia muy útil para el manejo de los términos del balance hídrico.

Ello es particularmente importante para el manejo de los suelos Ferralíticos Rojos de las provincias Artemisa y Mayabeque (antigua provincia La Habana), sobre todo aquellos bajo riego. Sobre los Ferralíticos ha recaído el mayor peso en la producción agrícola del país por espacio de siglos. El buen drenaje y el uso de estos suelos, dedicados por lo general a cultivos priorizados como la papa, lo hacen especialmente vulnerables a cambios en el régimen de precipitaciones por pequeños que estos sean.

El objetivo de este estudio es ilustrar una metodología para evaluar el efecto de posibles cambios del régimen de precipitaciones en el régimen de riegos tomando como caso de estudio un suelo Ferralítico Rojo sembrado con papa del municipio Jaruco, provincia Mayabeque.

## MÉTODOS

Para cumplimentar el objetivo propuesto se desarrolla un estudio que combina un experimento de campo en un suelo Ferralítico Rojo perteneciente a la unidad de producción Ho Chi Minh, en Bainoa, provincia Mayabeque y un estudio sintético basado en la simulación del efecto de la variabilidad

de las precipitaciones, a partir de escenarios de esta variable, en los términos del balance hídrico empleando las curvas de retención de humedad en esta unidad.

## Descripción del modelo

### Ecuación de flujo de agua en el suelo

El flujo del agua de un suelo no saturado es modelado empleando la ecuación de Richards (Richards, 1931) en función de la humedad:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[ K(\theta) \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - 1 \right) \right]}{\partial z} \quad (1)$$

la cual describe el movimiento de agua en condiciones isotérmicas en un medio rígido, homogéneo, no saturado. En esta ecuación  $t$  es el tiempo,  $z$  es la profundidad tomada como positiva hacia abajo con  $z = 0$  en la superficie del perfil.  $\theta(h)$  es el contenido de humedad ( $L^3 L^{-3}$ );  $K(h)$ , ( $L/T$ ), es la conductividad hidráulica no saturada,  $D(\theta) = K(\theta)/C(\theta)$ , [ $L^2/T$ ], representa la difusividad no saturada, siendo  $C(h) = \partial \theta / \partial h$ , [ $1/L$ ], es la capacidad hídrica.

Las relaciones constitutivas que caracterizan la curva de retención de humedad fueron descritas usando la relación analítica de van Genuchten-Mualem (VGM) (van Genuchten, 1980).

$$\theta(h) = \theta_r + \theta_s - \theta_r \left[ 1 + |\alpha h|^n \right]^{-m} \quad (2)$$

$$K(\theta) = K_s S_e^\lambda \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

donde  $\theta_s$  es el contenido de humedad saturada,  $\theta_r$  es el contenido de humedad residual,  $S = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$  es la humedad,  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada y  $\alpha$  ( $L^{-1}$ ),  $\eta$  (-),  $m$  (-) y  $\lambda$  (-) son parámetros empíricos. Una consideración usual, adoptada en este trabajo es asumir  $\lambda = 0,5$  y  $m = 1 - 1/\eta$ .

### Esquema Crank Nicolson (CN) en diferencias finitas

La solución numérica de la ecuación de flujo se implementa usando el algoritmo de Crank Nicolson con linealización explícita de la conductividad hidráulica  $K$ , y la capacidad hídrica. Para los nodos intermedios la ecuación toma la forma:

$$\left( -\frac{D_{i-1/2}^k}{2\Delta z_i \Delta z_u}; \frac{1}{\Delta t^k} + \frac{D_{i-1/2}^k + D_{i+1/2}^k}{2\Delta z_i}; -\frac{D_{i+1/2}^k}{2\Delta z_i \Delta z_l} \right) \begin{pmatrix} \theta_{i-1}^{k+1} \\ \theta_i^{k+1} \\ \theta_{i+1}^{k+1} \end{pmatrix} = \left( \frac{D_{i-1/2}^k}{2\Delta z_i \Delta z_u}; \frac{1}{\Delta t^k} - \frac{D_{i-1/2}^k + D_{i+1/2}^k}{2\Delta z_i}; \frac{D_{i+1/2}^k}{2\Delta z_i \Delta z_l} \right) \begin{pmatrix} \theta_{i-1}^k \\ \theta_i^k \\ \theta_{i+1}^k \end{pmatrix} + \frac{K_{i-1}^k - K_{i+1}^k}{2\Delta z_i} \quad (4)$$

donde el subíndice  $i$  es el número del nodo (que crece hacia abajo), el superíndice  $k$  representa la discretización temporal, y  $\Delta t^k = t^{k+1} - t^k$ . Todos los nodos están en el centro de los compartimentos del suelo, siendo  $\Delta z_u = z_i - z_{i-1}$ ,  $\Delta z_l = z_{i+1} - z_i$  y  $\Delta z_i$  el ancho de los compartimentos (cm). El valor promedio de  $K$  en cada nodo fue calculado como una media aritmética. Para la frontera inferior se asume la condición de "drenaje libre" que conlleva a que  $Q_{bot} = K(\theta)_n$  representando  $n$  el último nodo.

### Creación de escenarios de precipitación

La creación de dichos escenarios se llevó a cabo a partir de la generación estocástica de patrones de ocurrencia (o frecuencia) e intensidad. Para ello se empleó un modelo exponencial asociado a la probabilidad de ocurrencia y otro asociado a la intensidad. De acuerdo a Cox y Miller (1965) la distribución de los tiempos  $\tau$  entre eventos de precipitación puede ser representada de manera exponencial con media  $1/\beta$ , representando  $\beta$  la frecuencia promedio de eventos, es decir:

$$f_T(t) = \tau \times e^{-t}, \text{ para } t \geq 0 \quad (5)$$

mientras la lámina de los eventos de precipitación se asume como una variable aleatoria independiente  $l$ , descrita mediante una función de probabilidad exponencial.

$$f_H(l) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{l}{\beta}}, \text{ para } l \geq 0 \quad (6)$$

donde  $\beta$  es la lámina media entre los eventos.

Los datos del sitio experimental muestran que un modelo exponencial de este tipo se ajusta adecuadamente tanto a la distribución de la lámina de precipitaciones como a la frecuencia de las mismas.

En base a la Ecuación 5 se generan distribuciones de días de lluvia y días de no lluvia, en tanto a partir de la Ecuación 6 se generan probables valores de intensidad para los días de lluvia. Combinando ambas realizaciones estocásticas se obtiene un patrón único de precipitaciones que responde a cada una de las distribuciones.

En el estudio se prefiere simular el efecto de la variabilidad en el período seco por la importancia de esta etapa en la producción de renglones fundamentales como el cultivo de la papa y el peso que tiene el riego en sus rendimientos. Las series de precipitación a generar poseen una duración de 90 días (tres meses), lo cual también responde aproximadamente al ciclo vegetativo de este tubérculo.

### Condiciones del estudio

Para el ejercicio concreto de generación se consideraron cinco posibles valores medios de días entre eventos de precipitación, desde 6 hasta 10 días, y cinco posibles valores de lámina promedio, 5, 7, 9, 11 y 13 mm. Los valores seleccionados toman en cuenta el patrón promedio observado en la estación meteorológica de Banoa para los meses de enero, febrero y marzo durante los últimos 10 años. Por cada valor de frecuencia e intensidad se generaron 20 posibles realizaciones, lo que hace un total de  $10^4$  simulaciones.

En estudio se emplea la curva de retención de humedad del suelo medida en el sitio experimental. Esta propiedad hidráulica se obtuvo a partir de la toma de muestras inalteradas de suelo mediante cilindros de  $100 \text{ cm}^3$  y su posterior análisis empleando una caja de arena y una olla Richards (Soil moisture Equipment, Santa Barbara, CA.). Los valores de los parámetros de la curva ajustados al modelo de van Genuchten (Ecuación 2) son ( $\theta_s = 0,484 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\theta_r = 0,326 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha = 0,047 \text{ cm}^{-1}$  y  $n = 1,33$ ).

La investigación se apoyó a su vez en un experimento de campo basado en un seguimiento del potencial hídrico en un suelo sembrado con papa bajo riego. Como parte del mismo se colocaron tres juegos de tensiómetros, separados entre sí a aproximadamente 100 m, y conformados por tres de estos dispositivos ubicados a las profundidades de 10, 25 y 35 cm. Lecturas sistemáticas del potencial fueron efectuadas durante un período de aproximadamente dos meses, desde el 7 de enero hasta el 4 de marzo de 2011.

Este experimento permitió, por un lado, comprobar “in situ” el comportamiento de la variabilidad del potencial hídrico en condiciones reales y los criterios de manejo que se siguen para el riego. Por otro lado, sirvió para determinar por método inverso la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), equivalente a 0,53 m/día, necesaria en las simulaciones del flujo de agua en el perfil. Este método consiste en inferir matemáticamente el valor “óptimo” de la conductividad para el cual se logra un mejor ajuste de los valores de potencial observados en campo. La curva de retención de humedad del suelo y la función conductividad hidráulica (Ecuaciones 5 y 6, respectivamente) empleadas en el estudio y pertenecientes al sitio experimental se muestran en la Figura 1.

Empleando las curvas de retención de humedad medidas y el valor de conductividad estimado se evaluó el efecto de la variabilidad asociada a los patrones de precipitación en los términos del balance hídrico, considerando una tasa evapotranspirativa constante, igual a 4 mm/día. Para ello se consideró el hecho de que las lecturas del Evaporímetro Clase A, ubicado en la propia estación meteorológica, no tuvieron gran desviación en torno a un valor promedio de 4,2 mm/día. Según FAO 56, la evapotranspiración potencial (ETp), puede ser estimada como el producto de un coeficiente del cultivo ( $K_c$ ), un coeficiente asociado al evaporímetro ( $K_{pan}$ ) y la lectura del mismo. Asumiendo un valor de  $K_c$  igual a 1,1 y un  $K_{pan}$  de 0,85, de acuerdo a lo reportado por FAO se obtuvo una ETp aproximada de 4 mm/día. Se asume también el que evapotranspiración bajo un régimen de riegos frecuentes es prácticamente potencial.

La curva de retención de humedad del suelo y la función conductividad hidráulica (Ecuaciones 5 y 6, respectivamente) empleadas en el estudio y pertenecientes al sitio experimental se muestran en la Figura 1.

Básicamente se contrastaron dos variables en las simulaciones. En primer lugar el número de riegos total de la campaña necesario para mantener la humedad del suelo siempre por encima del 85% de la capacidad de campo, aplicando láminas de riego de 17 mm, tal y como se hace en la práctica productiva de la unidad. El otro término evaluado es la lámina de agua percolada por debajo de los 100 cm del suelo.

El modelo de simulación fue implementado en MATLAB (Versión 7.0), teniendo en cuenta las ventajas que ello ofrece con respecto a aplicaciones profesionales como HYDRUS (Simunek *et al.*, 2005), donde el usuario no puede interactuar con el código fuente. El análisis de los resultados se apoya en la elaboración de mapas de contorno de la media y la desviación estándar del número de riegos y el agua percolada para cada escenario, analizando cómo intervienen en estos resultados la propia curva de retención de humedad y el umbral de potenciales utilizado para dar inicio a un riego.

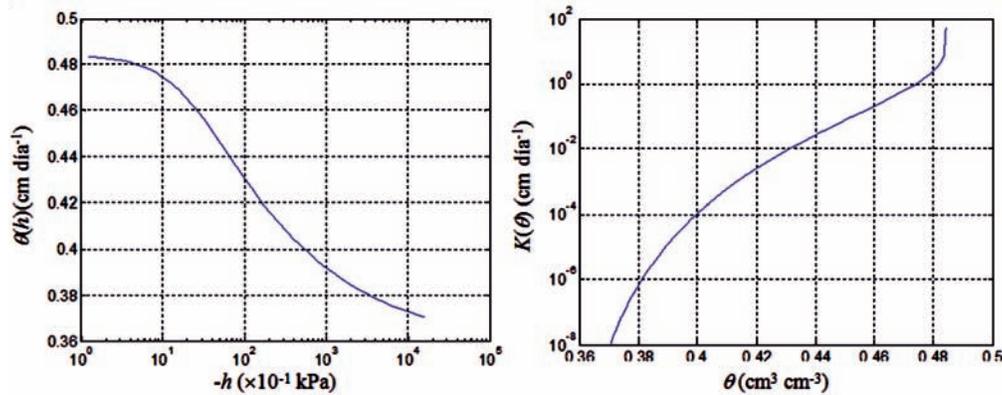


FIGURA 1. Curva de retención de humedad y función conductividad hidráulica del sitio experimental.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se ilustra el desenvolvimiento del modelo para una realización en la que se asume una lámina media de precipitaciones igual a 5 mm y 6 días como tiempo promedio entre días de lluvias. La Figura 2a muestra el patrón de lluvia generado estocásticamente así como los riegos simulados de acuerdo al criterio impuesto, según el cual la humedad debe mantenerse por encima del 85% de capacidad de campo. Evidentemente el modelo responde bien al patrón de variabilidad de las precipitaciones impuesto. Para períodos prolongados sin precipitaciones, (como por ejemplo durante los últimos 25 días), se obtiene un patrón de riegos cada casi 3,5 días, un tanto por debajo de la norma en la unidad productiva.

La dificultad mayor no parece estar asociada tanto a la frecuencia de riego establecida, como a la lámina de riego. En la Figura 2b se muestra el comportamiento del flujo en la parte inferior del perfil, o lo que es lo mismo, el agua que percola, obtenido a partir del balance hídrico. Lo más notorio es el pico a aproximadamente los 45 días, debido a que a un riego para esa fecha se sucede una lluvia de proporciones similares (Figura 2a). Debido a la elevada conductividad hidráulica de estos suelos el exceso de humedad se convierte de inmediato en un drenaje hacia horizontes inferiores. El pico al inicio de las simulaciones responde a la condición inicial escogida, con una humedad constante en profundidad y cercana a la saturación.

El patrón cíclico del flujo se relaciona fundamentalmente con el patrón de riegos; los picos sugieren que se riega más de lo necesario. Es conocido que el riego debe superar en cierta cuantía la demanda hídrica del cultivo, de manera que se garantice el lavado de las sales, pero de acuerdo a la gráfica ello se supl con dosis menores. Es por ello la búsqueda de la eficiencia en el riego debe traducirse sobre todo en definir las dosis adecuadas.

La Figura 2c muestra por último el comportamiento de la humedad superficial del suelo. La humedad fluctúa aproximadamente entre 0,42 y 0,47  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , que, aunque representa un rango estrecho de humedades, equivale a -1600 cm y -60 cm, respectivamente. Precisamente un elemento a tener en cuenta, además de la ya mencionada elevada conductividad hidráulica de estos suelos, es su limitada capacidad de retención hídrica. De ahí la importancia de tener en cuenta las propiedades hidráulicas específicas del lugar en el manejo hídrico de los suelos.

El resultado de la modelación del efecto de la variabilidad en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones en términos del balance hídrico es mostrado en la Figura 3. En el eje "x" se representa el promedio de días entre eventos de precipitación, o lo que es lo mismo, el inverso de la frecuencia de precipitaciones, en tanto por el eje "y" se representa el valor promedio de la lámina de precipitación.

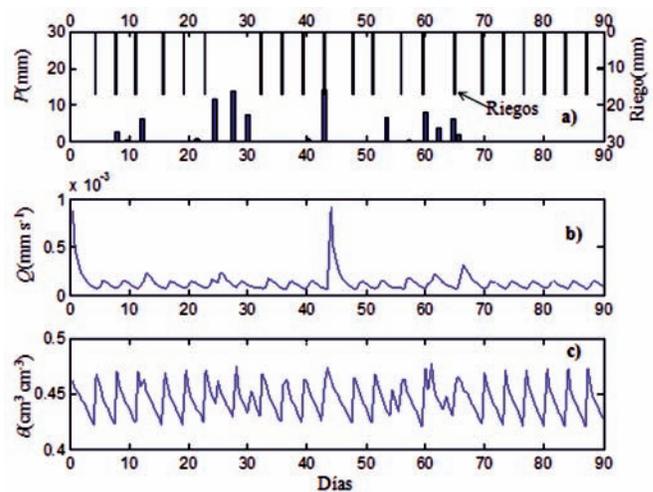


FIGURA 2. Distribución temporal de una realización de a) las precipitaciones estocásticamente generadas y el riego simulado, b) el flujo al final del perfil de suelo calculado mediante el balance hídrico y c) la humedad en el nodo superior del suelo, en la que se asume una lámina media de precipitaciones igual a 5 mm y 6 días como tiempo promedio entre días de lluvias.

La Figura 3a ilustra el número de riegos necesario para mantener la humedad del suelo de manera tal que el potencial por encima de los 35 cm sea superior a los -30 kPa, valor muy próximo al 85% de la capacidad de campo obtenido a partir de la CRHS y que se ajusta muy bien al criterio observado en la práctica productiva. Como se puede apreciar, el rango de variación se mueve aproximadamente entre un mínimo de 19,4 riegos, para la menor frecuencia e intensidad, y un máximo de 22,6 riegos durante tres meses, para el rango opuesto. Ello representa un riego cada 4,6 y 4 días, respectivamente. La diferencia entre ambos extremos conlleva una diferencia máxima de  $3.9 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ha}$  de agua, considerando láminas de riego de 17 mm. En la unidad que se toma como referencia el cultivo de la papa se riega como norma cada cuatro días.

El número de riegos aplicados es ligeramente más sensible a la frecuencia de las precipitaciones que al tamaño de la lámina cuando estas no sobrepasan los 9 mm aproximadamente y para las superiores a 11 mm aproximadamente; nótese que para estos intervalos cambia poco la escala de colores, cualquiera que sea la frecuencia elegida. En cambio entre 9 y 11 mm la sensibilidad a ambos términos es prácticamente similar. Gráficamente esto último se refleja en el hecho de que hay una respuesta semejante en el mapa de contorno a variaciones por cualquiera de los ejes.

En tanto, la percolación promedio (Figura 3b) varía entre un mínimo de 10,54 cm y un máximo de 17,2 cm. Las mediciones del flujo subsuperficial son en extremo complejas, de ahí que es difícil obtener datos reales para confrontar estas cifras. A diferencia del número de riegos la percolación es prácticamente independiente de la frecuencia. Sí es, en cambio, muy sensible a las variaciones de la intensidad, pero únicamente cuando estas superan aproximadamente los 9 mm. Es este un resultado lógico, pero aun muy interesante. Indica que en un rango bajo de intensidades las pérdidas por debajo de los 100 cm de profundidad son casi constantes, pero, dado un valor mínimo de intensidad por evento, estas pérdidas tienden a crecer linealmente. Nótese que ese mínimo tiende a ser ligeramente mayor cuando decae la frecuencia.

Como parte de este estudio se llevó a cabo un análisis

de la sensibilidad de este valor mínimo a los parámetros que caracterizan la curva de retención humedad. Para ello se variaron cada uno de los parámetros de la curva ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  y  $n$ , ver Ecuación 2), así como la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) en  $\pm 5$ ,  $\pm 10$  y  $\pm 15$  % del valor empleado y se ejecutó el modelo asumiendo cada una de las posibles combinaciones. Antes fue necesario ajustar los valores correspondientes de umbral para el comienzo del riego en cada caso teniendo en cuenta el valor del parámetro  $\alpha$  de la curva, cuyo inverso se asocia frecuentemente con la capacidad de campo de un suelo.

Se pudo comprobar que esta lámina mínima de precipitaciones a partir de la cual crece linealmente el drenaje depende en lo fundamental de los valores de los parámetros  $\theta_s$ ,  $n$ , y la  $K_s$  en el modelo de van Genuchten (1980). En cambio es poco sensible a los valores de  $\theta_r$  y  $\alpha$ . Este resultado concuerda con el obtenido por autores como Vrugt *et al.* (2001, 2003) y Ritter (2004).

Lógicamente el valor está también condicionado al régimen hídrico al que está expuesto el suelo, con un nivel de humedad que se mueve en un estrecho rango de potenciales cercanos a la saturación. Otro elemento de interés es la sensibilidad en la respuesta a un cambio del umbral de potencial a partir del cual se inicia el riego. Como parte del estudio se evalúa qué efecto produce variar el umbral de potencial con respecto al criterio del 85% de capacidad de campo, correspondiente en este caso a -30 kPa.

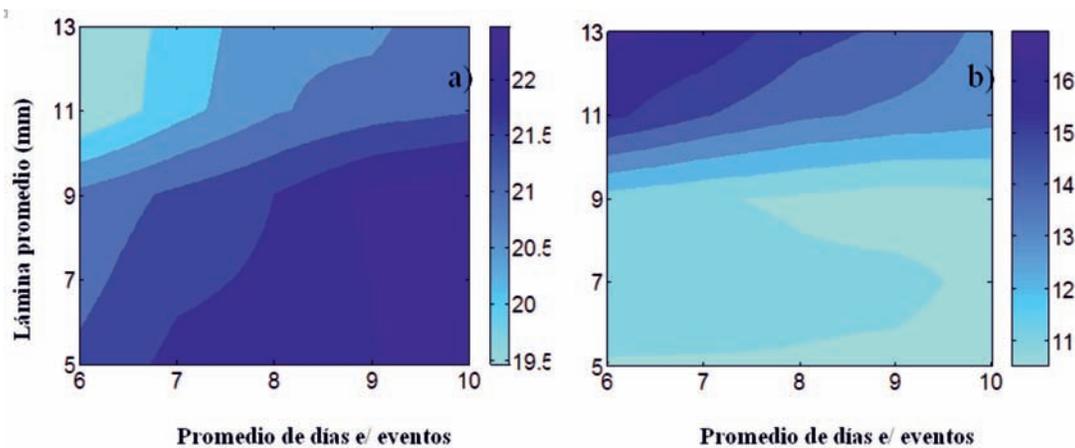


FIGURA 3. Mapas de contorno representando el valor promedio de a) número de riegos y b) agua que percola al final del perfil, en función de los días entre eventos de precipitación y la intensidad de las mismas.

Se obtiene que una variación del umbral de potenciales de  $\pm 5$  kPa, es decir, considerando -25 y -35 kPa como criterio de potencial para el riego, conlleva a diferencias de 1,1 riegos como promedio y 2,3 cm en pérdidas de agua por percolación para los tres meses. Esto representa 0,36 riegos y 0,76 cm de diferencia como promedio al mes, cifras que aunque parezcan pequeñas, resultan significativas a escala de toda una región.

En tanto, la desviación estándar de las series de valores de riegos (Figura 4a) refleja que la variabilidad de la media de los valores simulados del número de riegos se ve afectada por la frecuencia de las precipitaciones, pero varía muy poco con el volumen de las mismas, sobre todo en el rango de elevadas frecuencias. A medida que disminuye la frecuencia, o lo que es lo mismo, con el aumento de la cantidad de días entre even-

tos, se incrementa ligeramente la incertidumbre de estimación del modelo. Este resultado indica que, si se desea aminorar el error en la respuesta del modelo en cuanto a número de riegos, se debe muestrear un número mayor de frecuencias en el intervalo descrito. En cambio, más simulaciones evaluando otras posibles distribuciones estocásticas de la lámina en el rango evaluado es poco efectivo.

La dispersión de los valores de percolación (Figura 4b), al igual que el valor promedio de este término de balance, es en particular sensible a la lámina media de precipitaciones, aunque solo a partir de los nueve milímetros. Como es de suponer, en este cuenta más la estructura de la intensidad, sobre todo teniendo en cuenta que se está en presencia de un suelo con muy elevada conductividad hidráulica.

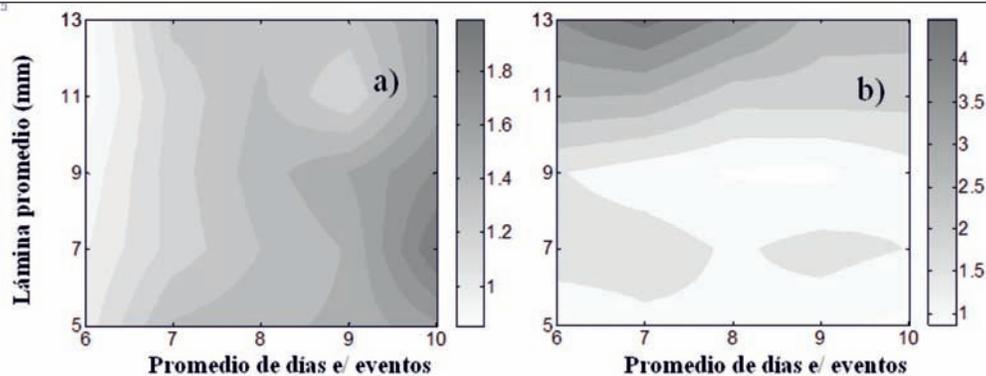


FIGURA 4. Mapas de contorno representando la desviación estándar del a) número de riegos y b) agua que percola al final del perfil, simulados por el modelo para las distintas realizaciones en función de los días entre eventos de precipitación y la lámina.

## CONCLUSIONES

- El presente estudio muestra una metodología eficiente y práctica para estudiar el efecto de la variabilidad de las precipitaciones en el balance hídrico del suelo. Dos elementos distinguen esta aproximación con respecto a otras llevadas a cabo con similares propósitos. Uno, el hecho de dar un tratamiento estocástico a la variabilidad de las precipitaciones, en lugar de hacerlo de manera determinística. Un segundo aspecto, es la posibilidad de interactuar directamente con el modelo de simulación a través de su implementación computacional siguiendo un esquema en diferencias finitas mediante un algoritmo Crank Nicolson. Ello posibilita considerar una resolución temporal mayor a la de los modelos convencionales, que por lo general consideran un día, facilitar la implementación computacional de los criterios del riego, lo cual no está concebido en muchas aproximaciones, y provee gran flexibilidad en cuanto al uso de la variable de estado modelada (humedad o potencial matricial).
- El estudio evidencia que bajo los escenarios considerados la sensibilidad de número de riegos necesario para suplir una determinada demanda es variable en dependencia del rango y la frecuencia de las precipitaciones. Mientras, la del agua percolada está sujeta básicamente a las variaciones de la lámina de precipitaciones a partir de un determinado umbral. Los análisis sugieren que el problema actual con la eficiencia del riego se relaciona más con las dosis actuales que con las frecuencias de riego. Para el sitio estudiado un rango entre 9 y 11 mm de riego parece ser el adecuado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CENTELLA A., L. NARANJO y L.R. PAZ: *Variaciones y cambios del clima de Cuba*, 59pp., Instituto de Meteorología, Centro Nacional del Clima, La Habana, Cuba, 1997.
2. CENTELLA, A.: *Variabilidad y cambios del clima en Cuba*, Reporte técnico del Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, 1998
3. COX, D.R., & H.D. MILLER: *The theory of stochastic processes*, London, Methuen, doi:10.2136/sssaj2001.65119x, 2001. 2044, England, 1965.
4. HILLEL, D.: *Environmental Soil Physics*, Academic Press, San Diego, CA, USA, 1998.
5. KUTÍLEK, M.: *Hydraulic functions of soil based upon characteristics of porous system*, 100pp., Lecture notes, ICTP Trieste College of soil physics, Trieste, Italy, 2005.
6. LAPINEL, B.: *La circulación atmosférica y las características espacio-temporales de las precipitaciones en Cuba*, 120pp., Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas), Universidad de la Habana, La Habana, Cuba, 1988.
7. LAPINEL B., FONSECA, C., CUTIÉ, V., PÉREZ, D., AROCHE, R., BÁEZ, R., RIVERO, R., RIVERO, I., y R. PÉREZ: *La sequía en Cuba*, 243pp., Centro del Clima, Instituto de Meteorología, La Habana Cuba, (monografía), 2003.
8. RICHARDS, L. "Capillary conduction of liquids through porous medium", *Physics*, 1: 318-333, 1931.
9. RITTER, A., MUÑOZ-CARPENA, R., REGALADO, C.M., VANCLOOSTER, M., & S. LAMBO: "Analysis of alternative measurement strategies for the inverse optimization of the hydraulic properties of a volcanic soil", *Journal of Hydrology* 295: 124-139, 2004.
10. RODRIGUEZ-ITURBE I, y A. PORPORATO: *Ecology of water controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics*, New York: Cambridge University Press, New York, USA, 2004.
11. ROMANO, N. & M. PALLADINO: "Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes", *J. Hydrol.*, 265: 56-75, 2002.
12. SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M.T. & M. SEJNA: *The HYDRUS 1D Software Package for Simulating the One-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Porous Media*, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA., USA, 2005.
13. VAN GENUCHTEN, M.T.H.: "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of American Journal* 44(5): 892-898, 1980.
14. VRUGT, J. A., BOUTEN, W., & A. H. WEERTS: "Information content of data for identifying soil hydraulic parameters from outflow experiments", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 19-27, 2001.
15. VRUGT, J. A., BOUTEN, W., GUPTA, H. V., & J. W. HOPMANS: "Toward improved identifiability of soil hydraulic parameters: on the selection of a suitable parametric model", *Vadose Zone J.*, 15(2): 98-113, doi:10.2136/vzj2003.0098, 2003a. 2035, 2037, 2003.