

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL

Actualización de herramientas disponibles para la precisión de balances hídricos del suelo en trabajos experimentales

Actualization of available tools for soil hydric balance precision in field experimental works

Dr C. Teresa López Seijas¹, Dr.C. María E. Ruíz Perez¹¹, Dra.C. Felicita González Robaina¹, Dr.C. Greco Cid Lazo¹, Dr.C. Julián Herrera Puebla¹

¹ Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana, Cuba.

¹¹ Universidad Técnica de Manabí, Provincia de Manabí, República de Ecuador.

RESUMEN. El presente trabajo consolida y actualiza los trabajos antecedentes que definieron los aspectos metodológicos y herramientas de trabajo para la precisión de la cuantificación de los balances hídricos y la evapotranspiración de los cultivos en los sistemas agrícolas, para las condiciones de Cuba. La metodología actualizada para la cuantificación de los balances hídricos en los sistemas agrícolas puede definirse con tres etapas fundamentales: *I. Caracterización hidrodinámica del perfil del suelo; II. Registro de las variaciones de humedad y potencial del agua en el suelo durante el ciclo del cultivo y III. Cálculo de los balances hídricos por el método de balance de masas.* Se detallan los datos y herramientas disponibles en las condiciones de Cuba para estos cálculos y procedimientos. Se hace un análisis comparativo de la evapotranspiración calculada por la metodología propuesta y por el balance hídrico simplificado tradicional, para diferentes condiciones de cultivo, suelo y manejo del agua. Los resultados demuestran que el balance simplificado puede conllevar generalmente a la sobrestimación y/o subestimación de la evapotranspiración del cultivo, con valores que están entre 15% y 55%, para manejos de agua que van desde el secano hasta el riego de alta frecuencia. Se hizo además un análisis de trabajos recientes desarrollados por otros investigadores en Cuba que utilizan la información definida a partir de balances hídricos simplificados, los cuales plantean posibles sobrestimaciones o subestimaciones de los valores de evapotranspiración o coeficientes de cultivo comparados con otros resultados a nivel internacional.

Palabras clave: balance de masas, caracterización hidrodinámica, evapotranspiración de cultivo.

ABSTRACT. This work presents a consolidation and actualization of previous works that defined the methodological aspects and tools for precision of hydric balances and crop evapotranspiration quantification in agricultural systems in Cuban conditions. The actualized methodology for hydric balance quantification was defined with three fundamental phases: *I. Hydrodynamic characterization of soil profile; II. Register of variations of soil water content and soil water potential during the crop cycle and III. Quantification of hydric balances by mass balance method.* There were detailed the available data and tools for this determinations in Cuban conditions. It was done a comparative analysis of evapotranspiration quantified by mass balance and simplified traditional hydric balance, for different conditions of crop, soil and water management. The results show that do not take into account the redistribution or drainage losses in the water outputs of hydric balances can do an overestimation or sub estimation of crop evapotranspiration, with values between 15% and 55%, from no irrigation to high frequency irrigation management. It was analyzed too the recent works due for other researches in Cuba, using previous information about crop evapotranspiration by simplified balances. This analysis shows some overestimation or sub estimation of crop evapotranspiration or crop coefficient compared with results at international level.

Keywords: mass balance, hydrodynamic characterization, crop evapotranspiration.

INTRODUCCIÓN

En Cuba se desarrollaron en la década de los años 80-90 del pasado siglo numerosos trabajos experimentales para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos y la definición de los coeficientes que permitieran la cuantificación

de la evapotranspiración de los cultivos a partir de la medición de variables climáticas y en particular la evaporación. En estos trabajos participaron varias instituciones científicas pero la mayoría de los estudios básicos se desarrollaron por el antes Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, hoy Instituto de Ingeniería Agrícola, en la región del sur de la Habana.

En estos trabajos se concibe la metodología para la determinación de la evapotranspiración real de los cultivos, a partir de balances hídricos basados en el seguimiento de la dinámica de humedad del suelo por el método gravimétrico y donde el esquema de balance utiliza una analogía de reservorio que considera al suelo como un simple almacén de agua con límites estáticos. La información así obtenida permitió la determinación de coeficientes bioclimáticos que facilitarían el pronóstico de las necesidades hídricas de los cultivos a partir del llamado Método Bioclimático (Delibaltov y Rey, 1983; Rey *et al.*, 1982).

Posteriormente estos coeficientes fueron actualizados a coeficientes de cultivo a partir de los enfoques de la última publicación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, FAO, en este tema (Allen *et al.*, 2006) que redefinen y estandarizan el concepto de evapotranspiración de referencia, tomando como base la información experimental anterior¹ (Zamora *et al.*, 2014).

Los resultados de otras investigaciones² López *et al.* (2001); y López *et al.* (2003), siguiendo los enfoques definidos a nivel internacional demostraron que la utilización de esquemas simplificados puede llevar a una imprecisión en la estimación de los componentes del balance hídrico, lo que repercute fundamentalmente en la predicción del almacenamiento del agua en la zona radical y la evapotranspiración; información ésta que constituye la base para determinar normas y pronosticar el momento del riego.

Trabajos más recientes desarrollados por otros investigadores (González *et al.*, 2011; 2013; Chaterlan *et al.*, 2010), que utilizan la información definida anteriormente sobre la evapotranspiración de los cultivos, identifican posibles sobreestimaciones o subestimaciones de estos valores comparados con otros resultados a nivel internacional. Por otra parte, otros trabajos que aplican la metodología del balance de masas han valorado su eficacia para una mayor precisión en la cuantificación de los flujos de agua y la estimación de la evapotranspiración de los cultivos (Cisneros *et al.*, 2015 y Rodríguez y López, 2014)

El presente trabajo tiene como objetivo principal el de presentar una actualización de la metodología y las herramientas disponibles para la aplicación del método del Balance de Masas en la cuantificación de los balances hídricos del suelo en trabajos experimentales de campo y demostrar la importancia de

su aplicación para la precisión de los estudios de necesidades hídricas en las condiciones de Cuba.

MÉTODOS

El trabajo consolida y actualiza los trabajos antecedentes que definieron los aspectos metodológicos y herramientas de trabajo para la precisión de la cuantificación de los balances hídricos en los sistemas agrícolas en las condiciones de Cuba (Ruíz *et al.*, 1995; López *et al.*, 2003, Cid *et al.*, 2012).

La metodología actualizada para la cuantificación de los balances hídricos en los sistemas agrícolas puede definirse con tres etapas fundamentales:

- I. Caracterización hidrodinámica del perfil del suelo.
- II. Registro de las variaciones de humedad y potencial del agua en el suelo durante el ciclo del cultivo en estudio.
- III. Cálculo de los balances hídricos.

La etapa I de **Caracterización hidrodinámica del perfil del suelo** debe partir del conocimiento de los valores de referencia de propiedades físicas básicas en las diferentes capas del perfil que se analiza, como son la *textura*, *densidad aparente* e *índice de porosidad*. Estas propiedades permitirán explicar el comportamiento de las propiedades hidráulicas fundamentales del perfil del suelo: las curvas de retención ó curvas características, θ (h) y la conductividad hidráulica de saturación y no saturación, K_s y K_{ns} .

Las curvas características deben ser determinadas en el laboratorio a partir de muestras inalteradas tomadas en el perfil seleccionado de la zona de estudio sometidas a diferentes tensiones (de 0 -1500 kPa) utilizando los métodos de la Caja de Arena y la Olla de Richards (Cid *et al.*, 2012) y para su procesamiento se recomienda utilizar el modelo de Van-Genuchten que ha sido demostrado en la literatura como el de mejor ajuste a las condiciones reales de un rango amplio de tipos de suelos (Ruíz *et al.*, 1995):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + \alpha h^n)^m}$$

Dónde: α , n y θ_r son parámetros para el ajuste a los datos experimentales de tensión y humedad.

Si no es posible la determinación de la curva para las condiciones reales del estudio se propone utilizar los resultados del trabajo de Ruíz *et al.* (1995) que resume para los principales agrupamientos de suelos de Cuba los parámetros de ajuste de curvas promedios al modelo de Van-Genuchten:

TABLA 1. Parámetros de Van Genuchten para los principales agrupamientos de suelos cubanos (fuente: Ruíz *et al.*, 1995)

Agrupamiento de Suelos	qr	a (cm ⁻¹)	n	m	qs
Ferrasols	0.176	0.016	1.867	0.375	0.388
Cumbisols	0.184	0.014	1.902	0.430	0.378
Fluvisols	0.179	0.012	1.858	0.427	0.447
Arenosols	0.125	0.016	1.892	0.456	0.390
Vertisols	0.315	0.008	1.795	0.409	0.631

¹ ZAMORA, E.; CHATERLÁN, Y.; OSORIO, M., PÉREZ, R., LAMBERT, M., DUARTE, C.; LEÓN, M.; CISNEROS, E.; REY, R.; GIRALT, E.: Informe final del proyecto: Ajuste de coeficientes para el pronóstico de riego en Cuba. Archivo Técnico Consejo Científico IIRD, La Habana, 34pp., 2004.

² RUÍZ, M. E. *Simulación computacional del rendimiento de la papa en suelos Ferralíticos del sur de la Habana*. Tesis en opción al grado de Dr C. Agric. Univ. Agraria de La Habana (UNAH). 1997.

La conductividad hidráulica de no saturación, K_{ns} , que representa una función de la humedad volumétrica o la tensión, $K(\theta)$ o $K(h)$, deben ser determinada, siempre que sea posible, por el método del Drenaje Interno (Hillel, 1972) que está considerado como el método patrón ya que es “in situ”, y por tanto representa con mayor precisión las condiciones reales del perfil del suelo.

La determinación de la K_{ns} a partir del método del Drenaje Interno implica establecer un área en una zona representativa del suelo estudiado, no menor de 9-10 m², que se lleve hasta la condición de saturación y donde se pueda registrar la variación de la humedad (por algún método indirecto) y la variación de la tensión (con tensiómetros instalados a diferentes profundidades). Los registros de tensión y humedad deben ser muy frecuentes en las primeras 24h-48 h y pasar después a ser diarios hasta lograr niveles de humedad semejantes a los que existían antes de comenzar la prueba.

Los valores de K_{ns} para cada profundidad, Z_r , correspondientes a cada valor de humedad volumétrica medida, θ , se determinan a partir de la ecuación de flujo no saturado, simplificada para la dimensión vertical y considerando solo los componentes gravitacional (profundidad, z) y matricial (tensión, h) del potencial total del agua en el suelo, $H = h + z$,

según la expresión: $\left[\frac{dA}{dt}\right] = K\left[\frac{dH}{dz}\right]$ que puede ser resuelta

numéricamente como: $\frac{\Delta A}{Z_r \Delta t} = K \frac{\Delta H}{\Delta z}$

donde: $A = \int_0^{\theta} \theta dz \approx \bar{\theta} \cdot Z_r$, siendo A - la lamina de agua almacenada en el perfil de suelo hasta la profundidad considerada, Z_r , (en mm)

No obstante, dado que este procedimiento requiere de mucho tiempo de medición así como resulta costoso por el equipamiento que se utiliza, se recomienda también el método indirecto a partir de las curvas de retención, según la teoría de Mualem, utilizando las curvas ajustadas al modelo de van Genuchten (según lo plantea Ruíz *et al.*, 1994):

en función de la humedad:

$$K_{ns}(S) = K_s S^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 ; S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

S - se conoce como humedad efectiva, donde θ_r es la humedad residual y θ_s la humedad de saturación en función de la tensión:

$$K_{ns}(h) = K_s \frac{\left[1 - (\alpha h)^{n-1} \left(1 + (\alpha h)^n \right)^m \right]^2}{\left[1 + (\alpha h)^n \right]^{\frac{m}{2}}}$$

Los parámetros α , n y m de este modelo son los obtenidos en el ajuste de las curvas de retención. Por otra parte la conductividad hidráulica de saturación, parámetro también necesario para el ajuste a este modelo, se recomienda estimarla a partir de muestras inalteradas analizadas en un permeámetro

de laboratorio o tomar el valor según el tipo de suelo de los resultados presentados por Cid *et al.* (2011) para los principales suelos de Cuba.

Para el ajuste de los datos de tensión y humedad al modelo de van Genuchten y la definición de la función conductividad hidráulica no saturada se recomienda utilizar la herramienta RECT (van Genuchten *et al.*, 2009) que es un código informático útil para este proceso y comprende la posibilidad de ajuste a distintos modelos referidos en la literatura para ambas funciones y contiene además datos de referencia para tipos de suelos por su textura así como la posibilidad de utilizar funciones de pedotransferencia para obtener las propiedades hidráulicas a partir de propiedades texturales básicas de los suelos.

La caracterización hidrodinámica del perfil debe incluir también la *cuantificación del agua disponible en el perfil de suelo para las plantas (ADSP)*:

$$ADSP = LSAD_{Z_r} - LIAD_{Z_r}$$

donde:

LSAD- Límite superior del agua disponible en el suelo que se cuantifica como la lámina correspondiente a la humedad máxima del almacenamiento del agua en el suelo hasta la profundidad radical del cultivo, Z_r . Para la cuantificación de esa humedad máxima se identifican varios criterios:

i)- el criterio de Nachabe (1998) que cuantifica el contenido normalizado de agua a capacidad de campo (θ_{ccn}) según

$$\theta_{ccn} = \left(\frac{q_{cc}}{K_s} \right)^{\frac{1}{n}} ; \text{ donde: } \theta_{ccn} = \frac{\theta_{cc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} ;$$

q_{cc} - flujo de drenaje o redistribución a capacidad de campo (~0,05 mm día⁻¹) y K_s , θ_s , θ_r , n - conductividad saturada, humedad de saturación, humedad residual y parámetro n del ajuste de las curvas características;

ii)- el criterio de Gardner (1988) que cuantifica in situ la humedad volumétrica correspondiente a un flujo de redistribución de 1 mm día⁻¹;

iii)- la humedad correspondiente a una tensión de 33 kPa (0,33 atm) según Reichardt y Timm (2004);

iv)- la humedad a *capacidad de campo*, parámetro definido originalmente por Veimeyer y Hendrickson (1949) que se determina en condiciones de campo.

El criterio recomendado es el de Gardner (ii) ya que cuantifica “in situ” la condición de “flujo despreciable” y puede utilizarse los valores que se registren en la prueba de Drenaje Interno que se realice para la estimación de la K_{ns} .

No obstante los criterios **i** y **iii** son útiles y prácticos si se conocen las curvas características ajustadas al modelo de Van Genuchten.

El criterio de la capacidad de campo (**iv**) es también útil y práctico y su precisión aumenta cuando se realizan pruebas de campo en la condición de estudio. No obstante cuando no sea posible se puede tomar el valor según el tipo de suelo de los resultados presentados por Cid *et al.* (2012) para los principales suelos de Cuba.

LIAD- Límite inferior del agua disponible en el suelo, que se recomienda determinar como la lamina de agua correspondiente al valor de la humedad volumétrica a la tensión de 1500

kPa (15 atm). Cuando no sea posible se puede tomar también el valor según el tipo de suelo de los resultados presentados por Cid *et al.* (2012) para los principales suelos de Cuba.

La etapa II comprende el **Registro de las variaciones de humedad y potencial del agua en el suelo durante el ciclo del cultivo en estudio**. Para este registro debe contarse al menos con un punto de observación en cada tratamiento analizado donde se registren las variaciones de la humedad por capas del perfil del suelo hasta una profundidad mayor a la profundidad radical por el método gravimétrico ó cualquier otro método indirecto de medición de la humedad del suelo (sondas de neutrones, sondas TDR, etc.).

Para el registro de la variación del potencial debe contarse además con 3 baterías de tensiómetros en el mismo punto de

observación de la humedad y a las mismas profundidades, o al menos a una profundidad por encima y otra por debajo de la profundidad radical. No obstante, si se cuenta con las curvas de retención para cada capa del perfil del suelo puede calcularse la tensión a partir del registro solamente de la humedad o viceversa.

La etapa III consolida la precisión en los **Cálculos de los balances hídricos** y propone introducir para esta determinación el método de Balance de Masas (Hillel, 1972, adecuado por López *et al.* 2003) a partir de la caracterización hidrodinámica del perfil del suelo previamente realizada.

Para la cuantificación de los balances hídricos por el método de Balance de Masas, se utilizó la ecuación general de balance hídrico definida por López *et al.* (2003) como sigue:

$$\Delta A = \sum \text{ingresos} - \sum \text{egresos} = \Delta A = (P + I) - (DI + ETc)$$

Dónde: ΔA .- Variación en la lámina almacenada hasta la profundidad considerada para el balance; **P**.- Precipitación en mm; **I**.- Agua aplicada durante el riego (mm), medida en pluviómetros colocados en cada punto de estudio; **DI**- Drenaje interno, determinado como la integral del flujo de drenaje a la profundidad de la zona considerada para el balance (q_z), en un intervalo de tiempo determinado, que numéricamente puede calcularse como:

$$q_z = -K(\theta) \frac{\Delta H}{\Delta Z}; \frac{\Delta H}{\Delta Z} = \frac{(h_{z_2+z_2}) - (h_{z_1+z_1})}{z_2 - z_1}$$

Donde: z_1 y h_1 - profundidad y tensión a la profundidad Z_{r-i} ; z_2 y h_2 - profundidad y tensión a la profundidad Z_{r+i} , e i - es el intervalo de medición considerado.

Las pérdidas por drenaje interno o redistribución de la humedad del suelo durante el período analizado a la profundidad radical, en mm/período, se determinan como:

$$DI = q_{\text{medio}} \cdot t$$

La evapotranspiración del cultivo, **ETc**, se calcula por despeje: $ETc = (P+I) - (DI+\Delta A)$

Se desprecia en esta ecuación el escurrimiento superficial (**ES**) asumiendo que sean parcelas con relieves relativamente planos y que los ingresos (**P+I**) no sobrepasaron en ningún momento la lámina correspondiente a la humedad de saturación del suelo. Para condiciones diferentes este término debe cuantificarse y sumarse dentro del paréntesis de los egresos.

Para la determinación de este término del balance hídrico pueden utilizarse relaciones de ajuste encontradas a partir de la simulación matemática con modelos de base física de un rango amplio de manejos de riego y humedades precedentes sobre el tipo de suelo que se estudie. Para el suelo Ferralítico Rojo compactado a la profundidad radical de 40cm, se recomienda la relación encontrada por López *et al.* (2006) a partir de la simulación con el modelo MACRO:

$$D_{40\text{cm}} = 298,55 \cdot \theta_{\text{pre40cm}}^2 - 128,74 \cdot \theta_{\text{pre40cm}} + 0,87 \cdot (P+R);$$

donde: θ_{pre40cm} - humedad precedente al día actual a los 40cm, en cm³/cm³; **P+R** - ingresos totales por lluvia y riego entre la fecha anterior y la actual, en mm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 resume el comportamiento de los elementos del balance hídrico cuantificados a partir de la aplicación de esta metodología durante el ciclo del cultivo del frijol bajo un régimen de riego por aspersión que mantuvo la humedad entre el límite máximo (correspondiente a la capacidad de campo) y el 85% de este valor como limite productivo.

Como se observa en la figura, las pérdidas por redistribución del agua de lluvia o riego se incrementan en los períodos de mayor ingreso, mientras que en los de menor ingreso el almacenamiento del agua en el suelo se reduce. Las pérdidas por drenaje o redistribución constituyeron como promedio un 55% de los ingresos totales, no obstante en los períodos de mayor ingreso por el aporte de las lluvias, éstas llegaron a constituir como media un 75% del total de los ingresos en ese periodo. Es importante también apuntar que en los periodos de altos ingresos, los valores del flujo de redistribución estuvieron definidos fundamentalmente por los valores de conductividad hidráulica no saturada, ya que el potencial total del agua del suelo y debido a la homogeneidad del humedecimiento del perfil del mismo en la zona radical se comportó con valores cercanos a la unidad (flujo estacionario). No obstante, con la disminución de la humedad, el gradiente de energía aumentó en la dirección descendente del flujo y tuvo importancia en la cuantificación del mismo al descender rápidamente los valores de conductividad con el decrecimiento de la humedad.

La cuantificación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) reflejó su dependencia del período de crecimiento del cultivo y de la disponibilidad del agua en el suelo. El análisis comparativo de la evapotranspiración calculada por los dos balances (Figura 1B) demostró que la ETc queda sobrestimada por el balance tradicional en los períodos de menores ingresos, ya que éste asume que el agua se almacena estáticamente en la zona radical del cultivo y está disponible totalmente para el consumo de la planta, con valores entre 20% y 120% de la ETc, lo que resulta importante considerar para la estimación de los coeficientes de cultivo por fases fenológicas del mismo. En períodos de mayores ingresos, la ETc estuvo subestimada en un 30% como promedio,

ya que se asume que el proceso de redistribución ocurre instantáneamente y toda el agua que está por encima del límite máximo del agua aprovechable drena hacia capas más profundas sin que esté disponible para el consumo de la planta. En total la Etc para todo el ciclo quedo sobreestimada en un 25% por el balance tradicional con respecto a la metodología propuesta.

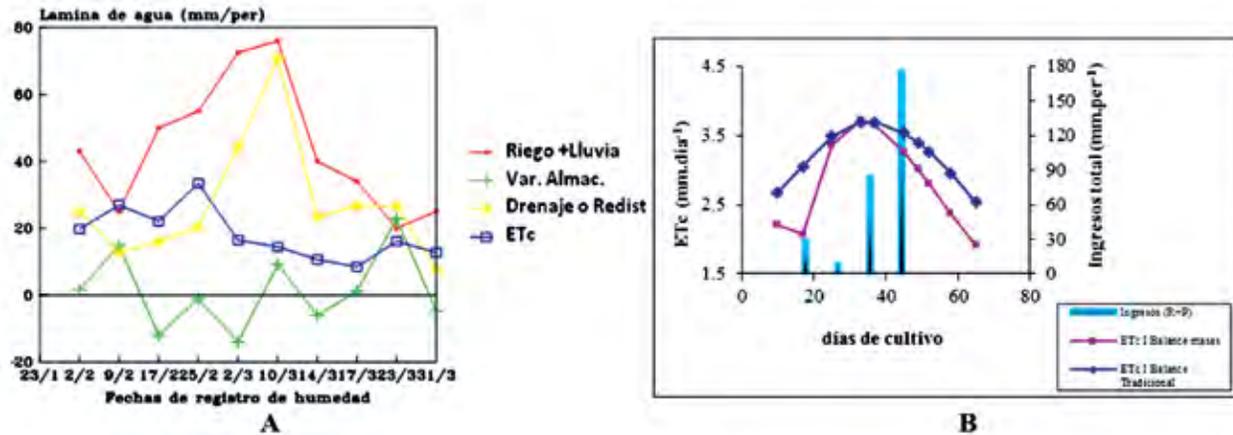


FIGURA 1. Caso I- ciclo del cultivo del frijol en suelo Ferralítico Rojo bajo riego por aspersión: A- Comportamiento de los elementos del balance hídrico; B- Comparación de la evapotranspiración cuantificada por ambos métodos (Balance de masas y Balance simplificado tradicional).

En la Figura 2 se presenta un análisis similar para el caso donde se tiene un riego localizado de alta frecuencia que mantiene todo el tiempo una humedad alta en la zona radical del cultivo de la papaya sobre suelo Ferralítico Rojo. Como se aprecia en la figura, las pérdidas por redistribución son constantes durante todo el ciclo y se incrementan considerablemente en los períodos de mayor ingreso (de 23 a 100 mm por período). En este caso, el gradiente del potencial del agua en el suelo fue por lo general unitario y el flujo de redistribución estuvo regido fundamentalmente por la conductividad hidráulica, y tomo valores considerablemente altos en los momentos donde se produce el riego (entre 7 y 30 mm día⁻¹).

El comportamiento de la lámina de agua almacenada en la zona radical refleja que esta se encontró fluctuando alrededor del límite superior del agua disponible e influyó en el comportamiento de la evapotranspiración con diferencias para cada período de crecimiento del cultivo.

En este caso el análisis comparativo de la evapotranspiración calculada por los dos balances (Figura 2 B) demostró igualmente que la Etc queda sobrestimada por el balance

tradicional en los períodos de menores ingresos, con valores medios del 50%, y subestimada en los períodos de mayores ingresos, con diferencias del 90%-100% de la Etc. En total la Evapotranspiración del cultivo para todo el ciclo quedo sobrestimada en un 50% por el balance tradicional con respecto a la metodología propuesta.

Por otra parte, el comportamiento de los elementos del balance hídrico para el caso del cultivo del boniato en un suelo Gley Amarillento en condiciones de lisímetro, con nivel freático mantenido a los 45 cm de la superficie, mostró que el proceso es de ascensión capilar y ocurre más lentamente, con valores de flujo mucho menores que en los casos anteriores. La cantidad de agua ingresada por concepto del flujo ascendente es solo considerable en los momentos de menores ingresos y éste constituye por tanto en esos períodos un ingreso importante a considerar para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (entre 10-20 mm por período). Estos ingresos son despreciables (cercanos a la unidad) en períodos de mayores ingresos, aun cuando continúa ocurriendo el proceso de ascensión capilar.

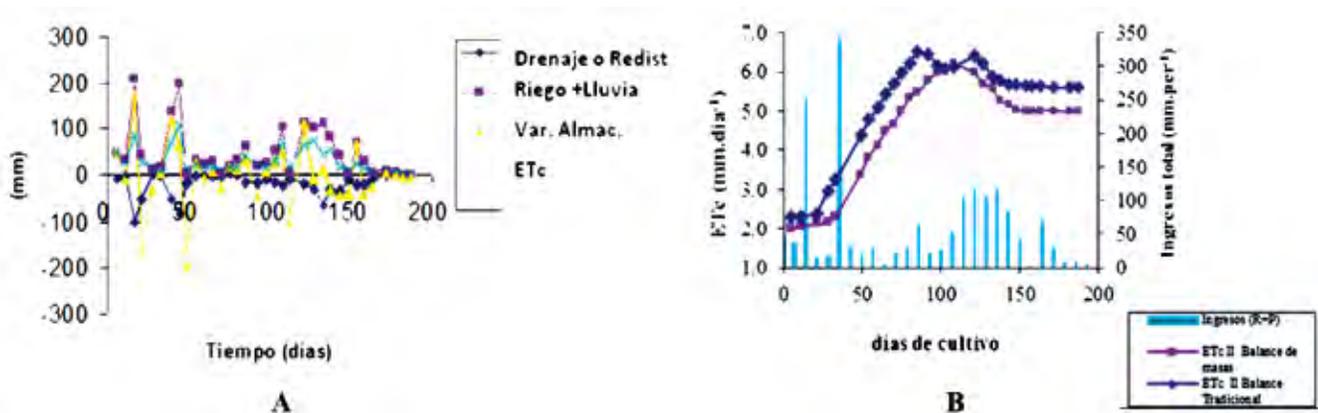


FIGURA 2. Caso II- ciclo del cultivo de la papaya en suelo Ferralítico Rojo bajo riego localizado: A- Comportamiento de los elementos del balance hídrico; B- Comparación de la evapotranspiración cuantificada por ambos métodos (Balance de masas y Balance simplificado tradicional).

El análisis comparativo de la cuantificación de la evapotranspiración por ambos balances (Figura 3) mostró en este caso, que la ET_c queda subestimada por el balance tradicional pero como el suelo tiene una menor conductividad hidráulica, y los valores de flujo son por tanto muy inferiores a los ya analizados, las diferencias entre las ET_c calculadas por ambos balances no son grandes y solo llegan a tomar valores del 15% en los períodos de menores ingresos, precisamente donde el flujo ascendente toma valores considerables. En total la ET_c para todo el ciclo quedo subestimada en un 5% por el balance tradicional con respecto a la metodología propuesta.

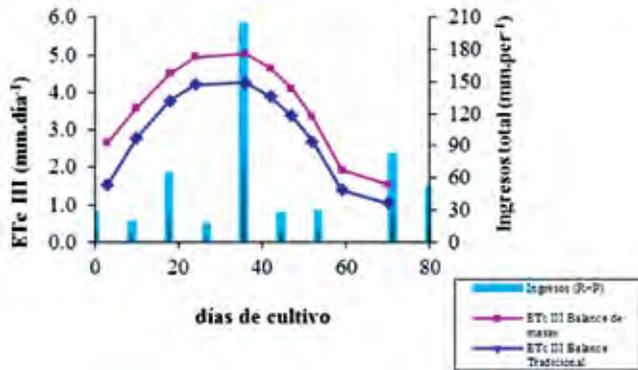


FIGURA 3. Caso III- ciclo del cultivo del boniato en un suelo Gley Amarillento en condiciones de lisímetro con nivel freático mantenido a los 45 cm de la superficie: Comparación de la evapotranspiración cuantificada por ambos métodos (Balance de masas y Balance simplificado tradicional).

Otros trabajos de modelación y simulación realizados en Cuba por diferentes investigadores utilizando la información experimental antecedente, confirman las deficiencias en la estimación de la evapotranspiración por el balance simplificado tradicional.

González *et al.* (2013) en un estudio de las funciones evapotranspiración - rendimiento utilizando los resultados experimentales desarrollados en Cuba por más de 30 años en la estimación de las necesidades hídricas de 14 cultivos

agrícolas, identifica dispersiones significativas de los valores de la desviación estándar de los errores, en cultivos como la malanga, boniato y banano, y señaló entre las causas de estas diferencias, a los errores en el método simplificado de cálculo de los balances hídricos para la determinación de la ET_c utilizados en todos los experimentos consultados.

Por otra parte González *et al.* (2011), en un trabajo de modelación de la función agua rendimiento para el cultivo del sorgo, a partir de información experimental existente de estudios de necesidades hídricas de este cultivo en la región del sur de La Habana, encontraron diferencias en los rangos de la evapotranspiración estimada en Cuba en experimentos de secano con respecto a los obtenidos por otros autores a nivel internacional y definieron que podrían estar asociado a errores en el método simplificado de cálculo de los balances hídricos del suelo para la determinación de la evapotranspiración.

Chaterlán *et al.* (2012) en un estudio de precisión de coeficientes de cultivo, utilizando herramientas de modelación con balances hídricos más detallados, encontró valores de k_c para el cultivo del ajo en las condiciones de producción del sur de La Habana, superiores a los señalados para estas condiciones por Zamora *et al.* (2004). Los coeficientes k_c resultaron superiores en un 60% para la fase inicial, 10% para la fase media y 22% para la fase final, lo cual se asocia entre otros factores a las simplificaciones asumidas en los trabajos antecedentes en los cálculos de balance hídrico para la estimación de la evapotranspiración del cultivo. Con estas diferencias de los coeficientes k_c se cuantifican para estas condiciones sobrestimaciones de la ET_c de 0,3-0,7 mm día⁻¹ lo que representa entre 11 y 13 mm para las fases inicial y media respectivamente, así como sobreestimaciones de hasta 17 mm para la fase final.

Para el caso del cultivo de la cebolla en estas mismas condiciones de estudio, Chaterlan *et al.* (2010) mostraron que en comparación con los valores anteriores, los k_c precisados son también superiores para las fases inicial y final, lo cual implica sobreestimaciones de la ET_c de 0.3-0.7 mm día⁻¹, que representan entre 9 y 18 mm para estas fases del cultivo.

TABLA 2. Diferencias encontradas en la estimación de coeficientes K_c para los cultivos de ajo y cebolla en las condiciones edafoclimáticas del sur de La Habana (elaborada a partir de información presentada por Chaterlan *et al.* (2010))

Fases del cultivo	Cultivo de ajo		Cultivo de cebolla	
	Zamora <i>et al.</i> (2014) balance simplificado	Chaterlan <i>et al.</i> (2012) modelación	Zamora <i>et al.</i> (2014) balance simplificado	Chaterlan <i>et al.</i> (2010)- modelación
Inicial	0,43	0,70	0,37	0,49
media	0,91	1,00	1,04	1,04
final	0,61	0,75	0,61	0,75
promedio	0,65	0,82	0,67	0,76

Cisneros *et al.* (2015) en una investigación para definir las necesidades hídricas del cafeto bajo riego localizado superficial en las condiciones edafoclimáticas de la región de San Andrés, utilizaron los principios de la metodología propuesta para el balance hídrico del suelo en la determinación de la evapotranspiración del cultivo del cafeto. Partieron de la caracterización del perfil del suelo en cuanto a sus propiedades físicas y modelaron las curvas características por profundidades del perfil del suelo ajustadas al modelo de Van Genuchten y las curvas de conductividad hidráulica no saturada. Contaron además con el registro de variaciones de tensión del agua en el suelo a partir de baterías de tensiómetros y asumieron un gradiente unitario en la variación del potencial del agua en el suelo dados los altos valores de humedad que mantuvo el manejo del riego localizado durante todo el ciclo del cultivo.

La aplicación de la metodología por estos autores les permitió obtener una mayor precisión de la evapotranspiración del cultivo del café por fases fenológicas y obtener además los primeros valores de coeficientes de cultivo para las condiciones de Cuba, los cuales estuvieron en el rango de los referidos en trabajos internacionales para sistemas bajo riego localizado.

Por su parte Rodríguez y López (2014), en un estudio comparativo del flujo del agua en un suelo Ferrasol bajo riego por goteo superficial y sub superficial, aplicaron la metodología para la cuantificación de los flujos de agua en la zona radical de los cultivos mediante el estudio de los perfiles de humedad y el potencial del agua del suelo, utilizando baterías de tensiómetros a diferentes profundidades (20 cm - 100 cm). La cuantificación precisa del proceso de redistribución de la humedad en las diferentes profundidades del perfil del suelo en cada uno de los tratamientos de riego aplicados, mostró que en el riego por goteo superficial en sentido general existen importantes pérdidas diarias de agua hacia los horizontes profundos y mantiene altos valores de humedad volumétrica y conductividad hidráulica en los estratos superiores.

CONCLUSIONES

- La utilización de balances hídricos simplificados para la cuantificación de la evapotranspiración y los coeficientes de cultivo en condiciones de campo, conlleva generalmente a una sobrestimación y/o subestimación de estos valores, con un rango que está entre 15% y 55% con respecto a los calculados por el balance de masas, para manejos de agua que van desde el secano hasta el riego de alta frecuencia.
- La utilización de la información definida a partir de balances simplificados sobre la evapotranspiración y coeficientes de cultivos, en otros estudios relacionados con la respuesta de los cultivos al riego, puede ser una de las causas que conllevan a resultados diferentes a los reportados a nivel internacional.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de investigadores del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric) Dr.C. Yoima Chaterlan, Dr.C. Roberto Martínez Varona, M.Sc. Elisa Zamora Herrera, Dr.C. Enrique Cisneros Zayas y Dr.C. Manuel R. Rodríguez, por su valiosa colaboración a esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CID, G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; RUIZ, M. E.: "Características físicas que definen el comportamiento hidráulico de algunos suelos de Cuba", *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN-2306-1545. 2(2): 26-33, 2012.
- CISNEROS, E.; REY, R.; MARTÍNEZ, R.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.: "Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el café en la provincia de Pinar del Río", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN -1010-2760, RNPS-0111, 24(2): 23-30, 2015.
- CHATERLÁN, Y., LEÓN, M.; DUARTE, C.; PAREDES, P.; LOPEZ, T.; PEREIRA, L. S.: "Determination of crop coefficients for horticultural crops in Cuba through field experiments and water balance simulation", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN 1010-2760, 19(1): 90-95, 2010.
- DELIBALTOV, Y.; REY, R.: "Pronóstico de la necesidad y el tiempo de riego en condiciones tropicales", *Por el Progreso Técnico en la Hidroeconomía* (1): 24-34, 1983.
- GARDNER, E. A. Understanding Soils and Soil Data. Chapter 10, Soil Water. Soil Conservation Research Branch, Queensland. pp 153-184, 1988.
- GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; LÓPEZ, T.; CID, G.: "Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra. Función agua rendimiento", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN 1010-2760, 20(1): 40-46, 2011.
- GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; LÓPEZ, T.; CID, G.: "Funciones agua rendimiento para 14 cultivos agrícolas en condiciones del sur de La Habana", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN 1010-2760, 22(3): 5-11, 2013.
- HILLEL, D.: The field water balance and water use efficiency. (T. T. Kozlowski, ed.). 100pp. Academic Press, New York. 1972.
- LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; DUEÑAS, G.; CHATERLÁN, Y.; CID, G.; SIERRA, J.; OZIER-LAFONTAINE, H.: "Modelación del manejo óptimo del agua en suelos Ferralíticos del sur de la Habana", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN -1010-2760, RNPS-0111, 15(4): 37-41, 2006.
- LÓPEZ, T.; CID, G.; ZAMORA, E.; GONZÁLEZ, F.; MARTÍNEZ, R.: "Caracterización del proceso de redistribución de la humedad del suelo para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos agrícolas". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. ISSN 1010-2760, 10 (2): 81-85, 2001.
- LÓPEZ, T.; CID, G.; GONZÁLEZ, F.; DUEÑAS, G.; OZIER-LAFONTAINE, H.; SIERRA, J.: "Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del sur de la Habana: Contribución metodológica en la determinación de los balances hídricos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN 1010-2760, 12 (2): 49-53, 2003.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C.: *Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações*. Ed. Manole Ltda., ISBN 85-204-1773-6, Barueri, SP, Brasil, 478 pp., 2004
- REY, R.; HERRERA, J.; ROQUE, R.; LAMELA, C.: "El pronóstico del riego en Cuba", *Revista Ciencia y Técnica en la Agricultura. Serie Riego y Drenaje*, ISSN: 0138-8487, 5(1):10-15, 1982.
- RODRIGUEZ, M. R.; LOPEZ, T.: "Comparación del comportamiento del flujo del agua en un Ferrasol bajo riego por goteo superficial y sub superficial", *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN-2306-1545. 4(2): 3-9, 2014.
- RUIZ, M. E.; UTSET, A.; LAU, A.: "Determinación de la K capilar a partir de los métodos del Drenaje Interno y de estimación mediante la curva tensión-humedad", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN 1010-2760, 4 (2): 77-79, 1994.
- RUIZ, M. E.; UTSET, A.; LAU, A.: "Curvas Tensión-Humedad III. Comparación de algunos modelos analíticos de algunos suelos de Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN 1010-2760, 5(2): 77-79, 1995.

VAN GENUCHTEN, M. Th.; SIMUNEK, J.; LEIJ, F. J.; SEJNA, M.: *RETC, version 6.02: Code of quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils [en línea] 2009, Disponible en: www.hydrus3d.com, [Consulta: enero 22 2015].*

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H.: "Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soil", *Soil Science*, ISSN-0038-075X, 68: 75-94, 1949.

ZAMORA, E.; DUARTE, C.; CUN, R.; PEREZ, R.; LEÓN, M.: "Coeficientes de cultivos (Kc) en Cuba", *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN-2306-1545, 4(3): 24-29, 2014.

Recibido: 23/10/2015

Aprobado: 15/06/2016.

Teresa López Seijas, Investigador Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgic), Avenida Camilo Cienfuegos y Calle 27, Apartado 6090, Municipio Arroyo Naranjo, La Habana. Cuba, Correo electrónico: directoradjunta@iagric.cu

María E. Ruíz Perez, Correo electrónico: mruizperez@gmail.com

Felicita González Robaina, Correo electrónico: dptoambiente4@iagric.cu

Greco Cid Lazo, Correo electrónico: dptoambiente1@iagric.cu

Julián Herrera Puebla, Correo electrónico: direccioninvest1@iagric.cu



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



6^{to} Aniversario de la Revista Ingeniería Agrícola

"La Ingeniería Agrícola al servicio de la producción sostenible de alimentos en Cuba"

