

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL

Revisión de los parámetros técnico-operacionales del riego de plantaciones cítricas con máquinas de pivote central

Review of technical-operational parameters of citrus orchard irrigation with center pivot machines

M.Sc. Kaddiel Fernández-Hung^I, Lic. Ismael Fuentes-Elías^I, M.Sc. Damir Fajardo-Núñez^I, M.Sc. Jorge R. Cueto-Rodríguez^{II}, M.Sc. Pedro J. González-Heredia^{III}

^I Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. Grupo de Difusión de Tecnologías de Contramaestre (GDITEC). Contramaestre, Santiago de Cuba, Cuba.

^{II} Grupo Empresarial Agrícola. División de Frutales. Boyeros, La Habana, Cuba.

^{III} Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. Playa, La Habana, Cuba.

RESUMEN. La recuperación de la actividad cítrica en Cuba constituye una de las prioridades del Estado por lo que fue presentada una actualización de su programa de desarrollo, de donde se conoce que la cuarta parte del monto para las inversiones requeridas corresponde a sistemas de riego. Así, algunas empresas cítricas del país están fomentando plantaciones de cítricos de algunas decenas de hectáreas donde se prevé el empleo de máquinas de riego de pivote central. Sin embargo, diferente de otros cultivos, el uso de esta técnica de riego para cítricos no es una práctica extendida tanto en Cuba como a nivel mundial, por lo que con los conocimientos que se tiene sobre el tema se dificultan su diseño y operación. Por tanto, en este trabajo se analizaron los parámetros técnico-operacionales del riego de cítricos con máquinas de pivote central en suelos arcillosos de Cuba, a partir de la revisión de la bibliografía más relevante sobre el tema, de modo que proporcionara los primeros elementos orientadores para las futuras investigaciones. Como resultado, se propone una forma modificada de sus expresiones matemáticas, que consideran el efecto que produce sobre el patrón de humedecimiento del suelo la disposición recomendada para los emisores.

Palabras clave: emisor unidireccional, dosis de riego, intensidad de aplicación, velocidad de infiltración.

ABSTRACT. The recovery of citrus activity in Cuba is one of the priorities of the State for which an update of their development program was presented, being known that a quarter of the amount for required investments corresponds to irrigation systems. Thus, some citrus companies in the country are promoting citrus plantations of some tens of hectares where the use of center pivot irrigation machines is foreseen. However, differently from other crops, the use of this irrigation technique for citrus is not an extended practice both in Cuba and worldwide, so with the knowledge on the subject, its design and operation are difficult. Therefore, in this paper technical-operational parameters of citrus irrigation with center pivot machines in clay soils of Cuba was analyzed through of a review of the most relevant literature on the subject, so to provide the first guiding elements for future researches. As a result, a modified form of its mathematical expressions is proposed, which considers the effect produced on the soil wetting pattern by the recommended disposition for the sprayers.

Keywords: unidirectional sprayer, irrigation dose, application rate, infiltration rate.

INTRODUCCIÓN

La recuperación de la actividad cítrica en Cuba constituye una de las prioridades del Estado, expresada en los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución

aprobados por el VI Congreso del PCC en abril de 2011 (PCC, 2016). Y ratificada en el marco del VII Congreso del Partido en abril de 2016 (PCC, 2016). En el 2008 el extinto Grupo

Empresarial Frutícola (GEF) presentó al Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros un programa de desarrollo cítrico para el período 2008-2018 que su implementación estuvo limitada, fundamentalmente, por dificultades financieras. Este programa fue postergándose y actualizándose sucesivamente hasta que en el 2014 el Ministerio de Economía y Planificación aprobó un estudio de factibilidad¹ que también fue aplazado por carecer del monto suficiente de divisas convertibles para financiar las inversiones previstas. Más recientemente, con la finalidad de gestionar un financiamiento externo, fue presentada una versión actualizada del programa anterior² donde fueron precisadas algunas cifras técnico-financieras.

Adicionalmente, ante un panorama fitosanitario caracterizado por la presencia en Cuba de la enfermedad Huanglongbing de los Cítricos (HLB), el Grupo Empresarial Agrícola (GAG) tiene trazada una estrategia de manejo de las plantaciones que difiere de la empleada en épocas anteriores. Se requiere captar las producciones lo más temprano y en el más corto tiempo posible antes que las plantaciones muestren las consecuencias negativas de la enfermedad, para lo cual es imprescindible lograr altos rendimientos productivos desde los primeros años. Esto se puede lograr fundamentalmente con altas densidades de siembra, un exhaustivo control fitosanitario, un manejo nutricional efectivo e, indefectiblemente, la aplicación del riego. También desde el punto de vista fitosanitario es conveniente que las siembras se realicen en grandes bloques compactos de varios cientos de hectáreas (Bergamín y Beozzo, 2016), que generalmente implica la construcción de grandes y costosos sistemas de riego.

Por otro lado, del más reciente programa de desarrollo cítrico se deduce que casi la cuarta parte (24%) del monto financiero en Pesos Cubanos Convertibles (CUC) requeridos para cubrir las inversiones previstas en los primeros cinco años del programa, corresponden a los sistemas de riego. Esto significa que la materialización de estas inversiones será determinante en el cumplimiento del mencionado programa de desarrollo. Así, algunas empresas cítricas del país han comenzado a explorar áreas donde fomentar plantaciones de cítricos con extensiones de algunas decenas de hectáreas ubicadas muy próximas a las fuentes de agua, con el propósito de reducir el monto de inversión inicial que requeriría el sistema de riego del gran bloque compacto recomendado por razones fitosanitarias. El ejemplo más importante lo constituye la experiencia que se desarrolla en áreas de la Empresa Agropecuaria “Jiguaní” ubicada en el municipio del mismo nombre, en la provincia de Granma, donde se fomenta desde mayo de 2016 las primeras 32 ha de cítricos que se benefician con una máquina de riego de pivote central que anteriormente regaba viandas, granos y hortalizas en el mismo sitio.

Aun cuando se reportan algunas experiencias internacionales acerca del riego de plantaciones de cítricos con máquinas

de pivote central que sugieren la factibilidad de esta técnica en el cultivo de interés, su uso no es una práctica generalizada (Albani and Palentini, 2016; Senninger, 2016; Valmont Irrigation, 2011; Munro, 2005; Valmont Irrigation, 2003). Todo indica que tampoco en Cuba constituye una práctica extendida, si se tiene en cuenta que no se han encontrado publicaciones sobre alguna experiencia en el riego de cítricos con máquinas pivote central; en cambio, esta técnica sí ha sido muy empleada para el riego de papa, caña de azúcar, granos, hortalizas y piña, en decir, para cultivos de cobertura completa no arbóreos³ (Camejo *et al.*, 2017; López *et al.*, 2017; Pérez y Sabatier, 2015; Mujica *et al.*, 2014). De este modo, los parámetros técnicos-operacionales de las máquinas de pivote central que refiere la literatura técnica, corresponden fundamentalmente al caso de humedecimiento del 100% del área y no a cuando solamente se riega una parte de ella, como sucede con los cítricos según se tratará más adelante (Santos *et al.*, 2010; Phocaidés, 2007; Tarjuelo 2005).

Esta situación indica que con los conocimientos actuales sobre el tema, se dificultan el diseño y la operación de las máquinas de pivote central para el riego de las áreas cítricas que pudieran ser beneficiadas como parte del programa de desarrollo de la agricultura cítrica cubana. A esto se suma que una parte importante de las áreas previstas se ubican en suelos arcillosos de limitada capacidad de infiltración, que constituye una circunstancia desfavorable a tener en consideración. Por tanto, con el presente trabajo se pretende analizar los parámetros técnico-operacionales del riego de plantaciones cítricas con máquinas de pivote central en suelos arcillosos de Cuba, a partir de la revisión de la bibliografía más relevante sobre el tema, de modo que proporcione los primeros elementos orientadores para las futuras investigaciones.

Ventajas e inconvenientes de las máquinas de pivote central

Desde su surgimiento a principios de los años 50 en los EE.UU., las máquinas de riego de pivote central han ido ganando popularidad entre agricultores de todo el mundo y son la preferencia de muchos dadas las ventajas que presentan con relación a otras técnicas de riego (Redagrícola, 2017; Mader, 2010; Alfred, 2008). Entre los méritos más importantes relacionadas por varios autores (Santos *et al.*, 2010; Phocaidés, 2007; USDA-NRCS, 1997; Hlavet, 1996; USDA-SCS, 1983), se pueden citar los siguientes:

1. La cantidad de trabajos necesarios en la operación de la máquina son significativamente inferiores al de los sistemas de riego por aspersión semiestacionario, lo que permite el uso racional de la fuerza de trabajo con posibilidades de incorporación de mujeres y hombres en igualdad de condiciones.
2. Se obtienen altos valores de uniformidad de aplicación del agua y bajo consumo energético en el bombeo de las

¹ INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN FRUTICULTURA TROPICAL – (IIFT): Programa de Cítricos. Proyección de inversiones para un período de cinco años (2014-2018), La Habana, pp. 40, 2013.

² INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN FRUTICULTURA TROPICAL (IIFT) – GRUPO EMPRESARIAL AGRÍCOLA (GAG): Programa de Cítricos. Proyección de inversiones para un período de cinco años, La Habana, pp. 30, 2016.

³ TILÁN H., L. E.; BLANCO G., A. y GARCÍA P., O. L.: Organización y planificación de los sistemas de riego en la Unidad Empresarial de Base “Jesús Rabí”, pp. 28, En: CD de Monografías 2013, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, (monografía), 2013.

pequeñas cantidades de agua que se manejan a presiones inferiores a 300 kPa, comparables con los que se alcanzan por los sistemas de riego localizado y microaspersión.

3. La sencillez y exactitud con que puede aplicarse determinada dosis de riego, así como las grandes posibilidades de automatización que posee el equipo, permite la aplicación de la agricultura de precisión, lo que implica un ahorro adicional de agua y de recursos energéticos.
4. Puede elegirse la estrategia de humedecimiento que más convenga al cultivo que se riega, a cobertura completa o de forma localizada en franjas de humedecimiento, y la aplicación del agua puede realizarse por encima o por debajo del follaje.
5. Junto con el agua de riego pueden aplicarse en disolución, con una dosificación precisa, diferentes agroquímicos que son empleados en el control fitosanitario y el manejo nutricional del cultivo, en dependencia de la estrategia de humedecimiento seleccionada.
6. Aunque el agua provenga de una fuente superficial con alto contenido de sólidos en suspensión, no se requiere de un sistema de filtrado tan exigente como lo es para los sistemas de riego localizado, dado que los diámetros de boquillas más usuales están comprendidos entre 2 y 9 mm.

No obstante, las máquinas de pivote central presentan algunos inconvenientes que constituyen desafíos para su diseño y operación que se manifiestan con mayor incidencia en el riego de árboles frutales plantados en suelos arcillosos que se caracterizan por la baja velocidad de infiltración. Entre las más importantes se destacan las siguientes:

Se obtiene un bajo coeficiente de aprovechamiento de la tierra, ya que deja sin regar (y por tanto sin cultivar) entre el 20 y el 22% de la superficie de una parcela cuadrada de lados iguales al diámetro del área circular que humedece la máquina.

Hacia el extremo final de la máquina se producen altísimos valores de intensidad de aplicación en intervalos de 10 a 15 minutos que cuando superan la velocidad de infiltración del suelo y su capacidad de almacenamiento superficial, se produce

la escorrentía del agua aplicada y la posibilidad de pérdidas de suelo por erosión.

Aunque la máquina por sí sola se adapta sin grandes dificultades a terrenos con una topografía ondulada, en suelos con baja velocidad de infiltración las pendientes admisibles quedarán limitadas a un máximo de un 5% para conservar la necesaria capacidad de almacenamiento superficial.

El régimen de humedad en el suelo debe manejarse con mayor cuidado que en cualquier otro método o técnica de riego. Si bien en suelos de textura arcillosa es necesario y es posible aplicar pequeñas láminas de riego con alta frecuencia, debe tenerse en cuenta que esto pudiera incrementar las pérdidas de agua por evaporación y arrastre por el viento.

MÉTODOS

Definición del tipo y disposición de los emisores

Desde el punto de vista agronómico lo más conveniente es que el riego de los cítricos se realice por debajo del follaje para minimizar los problemas fitosanitarios y la caída de flores y frutillos. Cuando se proyecta regar una plantación cítrica con máquinas de pivote central, este requisito obliga a sembrar en hileras que describan circunferencias concéntricas con relación al pívot, separadas unas de otras a una distancia que debe conjugar los marcos de plantación establecidos y el espaciamiento de las salidas en la tubería portaemisores.

De ese modo, la mejor de las opciones posibles en las condiciones de Cuba, donde el uso de podadoras mecánicas es limitado, será espaciar las hileras cada 5,76 m y se emplearán emisores de chorro unidireccional a 180°, espaciados a 3,84 m y a 1,92 m de forma alterna y ubicados a unos 0,70 m desde el suelo mediante bajantes, colocados por parejas enfrentadas y fijos a una estructura rígida, como se ilustra a modo de ejemplo en la Figura 1. De aquí se desprende que el riego se efectuará en franjas que siguen las hileras del cultivo y que solamente humedecen aproximadamente a $\frac{2}{3}$ del área total.



FIGURA 1. Disposición de los emisores para el riego de cítricos (Senninger, 2016).

Análisis de los parámetros técnico-operacionales

Caudal a la entrada de la máquina

Las máquinas de pivote central riegan describiendo una superficie de forma circular mientras rotan alrededor de un punto “fijo” por el que se inyecta un caudal de agua, Q_e , definido por la siguiente expresión matemática (Tarjuelo, 2005), modificada para el riego de $\frac{2}{3}$ del área total:

$$Q_o = \frac{ET_{c\max} A}{0.54 E_a T} \quad (1)$$

donde:

Q_o : Caudal a la entrada de la máquina, L/s;

$ET_{c\max}$: Evapotranspiración máxima del cultivo en el período de mayor déficit hídrico, mm/d. Se calcula como:

$ET_{c\max} = K_c ET_{o\max}$, donde la evapotranspiración de referencia, ET_o , se determina por el método de FAO Penman-Monteith, recomendado como el procedimiento estándar (Allen *et al.*, 2006 y Cleves, 2016) y los valores del coeficiente de cultivo, K_c , pueden tomarse del propio Estudio FAO No. 56 (Allen *et al.*, 2006), los adoptados para las condiciones de la Florida (Kisekka *et al.*, 2016) y los determinados para el sur de Texas (Enciso *et al.*, 2008).

A : Área regada por la máquina, ha. $A = \pi \cdot 10^{-4} R^2$;

R : Radio máximo humedecido por la máquina, m;

E_a : Eficiencia de aplicación, adimensional. En Cuba se reportan valores de E_a entre 0,7 y 0,9 con el 73% de los casos entre 0,75 y 0,85 (Camejo *et al.*, 2017; Mujica *et al.*, 2014);

T : Tiempo de riego diario, h/d.

Si se considera un valor de $ET_{c\max} = 7.0$ mm/d y 16 h de riego diario, el valor del hidromódulo “neto” obtenido a partir de la ecuación (1) resulta 0.8 L/s/ha, que es un valor muy próximo al hidromódulo “neto” para el riego localizado. Ello indica que la técnica de riego por máquina de pivote central para cítricos compete con el riego localizado, en cuanto a la racionalidad que hacen del uso del agua.

Parámetros hidráulicos de la máquina

La sumatoria de los caudales entregados por los emisores deberá ser igual al caudal Q_o , y se debe distribuir de forma creciente desde el pivote hasta el extremo final del lateral. Aunque Amaral y Lopes (2017) proponen un modelo de distribución del caudal basada en el enfoque del “flujo discreto”, Tarjuelo (2005) plantea que para los casos de longitudes de máquina, número y espaciamiento entre emisores más empleados, este no supera en exactitud a la perspectiva del “flujo continuo” que tradicionalmente ha sido aplicada. Así, el modelo de distribución del caudal entre los emisores de una máquina de pivote central, modificada para el riego de $2/3$ del área total, está dada por:

$$q_x = X S_e \frac{3Q_o}{R^2} \quad (2)$$

en la que q_x (L/s) es el caudal que debe ser entregado en un punto ubicado a la distancia X (m) del pivote, para una separación, S_e (m), igual al promedio de los espaciamientos entre emisores.

Por otro lado, la distribución de la presión a lo largo de la tubería portaemisores sin considerar la presencia del cañón final, se calcula por medio de la siguiente ecuación simplificada presentada por Tarjuelo (2005):

$$\frac{P_x}{\gamma} = \frac{P_o}{\gamma} - h_{ro} \left[\frac{X}{R} - \frac{2}{3} \left(\frac{X}{R} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{X}{R} \right)^5 \right] - \Delta Z_{o-x} \quad (3)$$

donde:

P_x / γ : Carga de presión en el punto de salida de cada emisor ubicado a la distancia X del pivote, m;

P_o / γ : Carga de presión en el codo superior del pivote, m;

$P_o / \gamma = P_L / \gamma + 0,555 h_{ro} + \Delta Z_{o-L}$;

P_L / γ : Carga de presión en el punto de salida del último emisor, m;

h_{ro} : Pérdida de carga en el lateral con caudal Q_o en extremidad, m.

$$h_{ro} = 1,209 \cdot 10^{10} \left(\frac{Q_o}{C} \right)^{1.852} \left(L_1 D_1^{-4.87} + L_2 D_2^{-4.87} \right)$$

C : Coeficiente de fricción, adimensional. $C = 110$ para incluir las pérdidas de carga locales;

L : Longitud de los tramos 1 y 2 del lateral de diámetros diferentes, m;

D : Diámetro interior de los tramos 1 y 2 del lateral, mm;

ΔZ_{o-x} : Diferencia de cotas entre el origen y la ubicación de cada punto a la distancia X , m;

ΔZ_{o-L} : Diferencia de cotas entre el origen y el extremo final del lateral de longitud L , m;

De este modo, para cada conjunto de valores D , S_e y L predefinidos (y por tanto R y Q_o), además del valor de P_o / γ se obtienen los pares (q_x ; P_x / γ) en cada salida donde se ubica un emisor, a los que les corresponde un determinado diámetro d_x (mm) que puede calcularse mediante la expresión siguiente, propuesta por Kincaid (2005), obtenida para las boquillas de los emisores *Senninger* y *Nelson*:

$$d_x = 30.22 \frac{q_x^{0.495}}{P_x^{0.240}} \quad (4)$$

Donde:

P_x es la presión en la base del emisor expresada en kPa.

Los diámetros así calculados deberán aproximarse al valor más cercano de diámetro nominal disponible. Tarjuelo (2005) también comparó las presiones a lo largo de un lateral calculadas “tramo a tramo” por Scaloppi y Allen (1993) con las que se obtienen de la ecuación (3), y con ello demostró que ambos métodos proporcionaban soluciones similares. Sin embargo, no está claro si con dicha ecuación, e incluso con el modelo de distribución de los caudales (Ecuación 2), se obtienen resultados precisos para el esquema de colocación de emisores y bajantes que se proponen en este trabajo, para el riego de cítricos.

Intensidad de aplicación del agua

La intensidad media de aplicación del agua al suelo, I_a (mm/h), a una distancia X (m), según Tarjuelo (2005), modificada también para el riego de $2/3$ del área total, se calcula como:

$$I_a = \frac{10\,800 X Q}{R^2 W} \quad (5)$$

y si se considera que el patrón de distribución del agua adopta una forma elíptica, la intensidad de aplicación máxima, $I_{a\max}$ (mm/h), es:

$$I_{a\max} = \frac{4\,10\,800 X Q}{\pi R^2 W} \quad (6)$$

donde:

W (m) es el ancho mojado de dicho modelo de distribución; Q (L/s), el caudal que efectivamente llega al suelo después de ser descontadas de Q_o (Ecuación 1) las pérdidas por evaporación y arrastre debido al viento.

Como se dijo, el valor de $I_{a\text{ máx}}$ se calcula por la fórmula (6) suponiendo que el patrón de distribución del agua tiene una forma elíptica, pero no siempre así. Kincaid (2005) obtuvo valores de $I_{a\text{ máx}}/I_a$ que se mantuvieron entre 1,1 y 1,9 lo cual indica que el patrón de distribución de agua puede adoptar formas desde aproximadamente uniformes ($I_{a\text{ máx}}/I_a = 1$) hasta casi triangulares ($I_{a\text{ máx}}/I_a = 2$), y no necesariamente elíptica ($I_{a\text{ máx}}/I_a = 4/\pi = 1,27$). Esto fue corroborado por Jian *et al.* (2017) que obtuvieron un patrón casi trapecial para emisores con deflectores rotatorios, y en forma de rosquilla para deflectores fijos; lo que indica la necesidad de precisar la forma del patrón de distribución de agua para la configuración de emisores propuesta aquí para regar cítricos con máquinas de pivote central.

En otro sentido, Tarjuelo (2005) también abordó ampliamente varios métodos para estimar el valor de Q , y para el caso particular del riego con máquinas de pivote central, aunque no es exclusivo de esta técnica, recomienda el propuesto por Fisher y Allen (1988), que también es adoptado por el USDA-NRCS (1997). Incluso, López *et al.* (2011) también obtuvieron un método muy similar para calcular la porción efectiva del agua aplicada que alcanza el suelo, quienes lo proponen también para máquinas de pivote central. Habría que evaluar entonces las condiciones particulares de protección al viento que ofrecen las hileras de árboles cítricos y develar otros factores relacionados con la intercepción del agua por la parte más baja del follaje y la cubierta vegetal del suelo si existiera.

Dosis bruta de riego aplicada al suelo

La dosis bruta de riego aplicada a $2/3$ del área total, Db (mm), para determinada velocidad de desplazamiento lineal de la última torre, V_T (m/min), ubicada a una distancia, L_T (m), desde el pivot, se calcula como:

$$Db = \frac{0.06Q_oL_T}{AV_T} \quad (7)$$

En esta ecuación el valor de Db está acotada entre un valor mínimo, Db_{min} , que corresponde a la velocidad máxima de desplazamiento de la última torre, $V_{T\text{máx}}$, y un valor máximo, $Db_{\text{máx}}$, que es función de la velocidad mínima, $V_{T\text{min}}$. El valor de la velocidad máxima de algunas de las máquinas adquiridas en Cuba está entre 2,2 y 5,0 m/min (Placeres *et al.*, 2013) y la velocidad mínima es aquella que garantiza que no se produzca escurrimiento del agua, a partir de la relación entre la intensidad de aplicación máxima, $I_{a\text{ máx}}$, y las características de infiltración del agua en el suelo, como se tratará en el próximo epígrafe.

Al mismo tiempo, Db no deberá superar el valor del contenido de humedad fácilmente utilizable por las plantas, HFU , retenido en el estrato que corresponde a la profundi-

dad efectiva de las raíces, Z_r . Más bien, lo que generalmente ocurre en suelos arcillosos, y más cuando se riega un cultivo con un sistema radicular profundo como los cítricos, es que $Db_{\text{máx}} < HFU$, lo que obliga a riegos ligeros y frecuentes, con lo que se dificulta así la aplicación de una dosis adicional para el lavado de sales cuando existen condiciones que lo requieren.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del posible escurrimiento superficial

Varios han sido los enfoques para explicar este fenómeno. Dillon *et al.* (1972), citado por Tarjuelo (2005), proponen un gráfico mediante el cual se determina el tiempo de aplicación que garantiza que no exista escurrimiento para determinada intensidad de aplicación máxima del sistema, capacidad de almacenamiento superficial y tipo de suelo. El método es muy sencillo pero es sólo aplicable a sistemas de alta presión con aspersores que tengan un modelo de distribución elíptico y, como se sabe, las boquillas difusoras son generalmente de baja presión y con modelos de distribución que también pueden ser de forma diferente a la limitada por una semiélpse.

Allen (1990) propone, también citado por Tarjuelo (2005), un método analítico que primero calcula por aproximaciones sucesivas la intensidad de aplicación máxima y la lámina de agua aplicada al suelo en un tiempo dado, mediante dos ecuaciones implícitas, y luego obtiene los valores de W y V buscados. Con posterioridad, Pérez y Martínez (2005) obtuvieron dos ecuaciones explícitas para calcular la intensidad de aplicación máxima y la lámina de agua aplicada al suelo para evitar así el proceso iterativo.

En este método su autor propone muy acertadamente una forma modificada de la ecuación de infiltración de Kostiaikov para el riego por aspersión, donde incluye además la capacidad de almacenamiento superficial del suelo, pero tiene el inconveniente que sus coeficientes deben obtenerse empíricamente mediante pruebas de campo, que serían representativas solamente de las condiciones locales ensayadas. Esta dificultad puede solventarse empleando convenientemente los mismos coeficientes empíricos de la familia de infiltración revisada que propone el USDA-NRCS (2006) para mantas y terrazas, determinada para después del primer riego, que simula la alta frecuencia de humedecimiento.

Puede aplicarse además la ecuación de Green-Ampt que considera el contenido de humedad antes del riego que también tiene una forma modificada para el riego por aspersión de intensidad variable (Martin *et al.*, 2012; Muñoz y Gowdish, 2005) e incluso, los valores de sus parámetros empíricos han sido recomendados para cada clase textural del suelo (Rawls *et al.*, 1983; Regalado *et al.*, 2005). Adicionalmente es posible contar con un software que, para valores de intensidades de aplicación variables en el tiempo, analiza las posibilidades de escurrimiento por la ecuación de Green-Ampt modificada (Parsons y Muñoz, 2009).

Finalmente, un método que pudiera resultar muy práctico y conservador es el que se obtiene de integrar conve-

nientemente un grupo de criterios dispersos presentados por el USDA-NRCS (1997). Para una máquina estándar de ¼ de milla (400 m) se presenta las dosis netas máximas para cinco de las familias de infiltración del agua en el suelo, cinco tipos diferentes de emisores con sus intensidades de aplicación máximas típicas y cuatro capacidades de almacenamiento superficial del suelo en función de la pendiente del mismo. Después que la dosis neta así determinada sea corregida para otras longitudes de máquina con determinada capacidad, Q_o , es posible entonces calcular el valor de la velocidad mínima con la que se evita el escurrimiento. Si fuera preciso incrementar la dosis aplicada, entonces deberá crearse artificialmente mayor capacidad de almacenamiento, para lo cual en la propia referencia anterior se presentan también los criterios correspondientes.

CONCLUSIONES

- Como resultado del análisis de los parámetros técnico-operacionales de la máquina de pivote central para el riego de cítricos en suelos arcillosos, se propone una forma modificada de sus expresiones matemáticas, que toma en consideración el efecto que produce sobre el patrón de humedecimiento del suelo la disposición recomendada para los emisores.
- Se requiere investigar con mayor profundidad los aspectos relacionados con el análisis del posible escurrimiento de agua, específicamente la relación entre la intensidad de aplicación según el patrón de distribución que genera la nueva disposición de los emisores y los métodos para valorar la capacidad de infiltración y almacenamiento superficial de los suelos, fundamentalmente los de textura arcillosa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBAN I, L. and PALENTINI, L.: *Country Case Study. Working to Zero Hunger: Zimbabwe, CESVI*, pp. 16, Bergamo, Italy [en línea] 2016, Disponible en: <https://www.cesvi.eu/wp.../Country-Case-Study-Zimbabwe.pdf> [Consulta: julio 22 2017].
- ALFRED, R.: *Genuine Crop-Circle July 22, 1952, Maker Patented* [en línea], 2008, Disponible en: <http://www.wired.com> [Consulta: 24 de julio de 2017].
- ALLEN, R.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.: *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, edit. Estudio FAO Riego y Drenaje 56, Ed. FAO, Roma, 2006. ISBN-92-5-304219-2.
- AMARAL DE S., P. & LOPES DE M., E.: "Discreet Flow Distribution in Central Pivot", *Hydraulics. Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics and Mechatronics*, Vol. (1): 21-25, 2017. ISSN-1453-7303.
- BERGAMÍN F., A y BEOZZO B., R.: "Contribución de la epidemiología al manejo de las enfermedades de las plantas: El caso del Huanlombing de los Cítricos", *Cítricos en las Américas*, Vol. 1(1): 67-79, 2016. ISSN: 1677-. 0420.
- CAMEJO B., L. E.; DUARTE N., L. y GUERRA H., G.: "Diseño agronómico en máquinas de pivote central, rendimientos, ahorro de agua y energía", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXXVIII(2): 3-16, 2017. ISSN-1815-591X.
- CLEVES L., J. A.; TORO C., J. y MARTÍNEZ B., L. F.: "Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica", ISSN-2011-2173, *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, Vol. 10(1): 149-163, 2016. ISSN impreso: 2011-2173. ISSN electrónico: 2422-3719.
- ENCISO M., J.; J. W. SAULS; R.P. WIEDENFELD Y S.D. NELSON: *Los impactos del riego de cítricos en el Valle del Río Grande, 14 pp., The Texas A&M University System. AgriLife Extension Service* [en línea] 2008, Disponible en: <https://www.tamuk.edu/agro/...cv/Nelson%20CV%202016.pdf> [Consulta: julio 22 2017].
- HLAVET, R.: *Guía para la elección de sistemas de riego*, CEDEX, pp. 139, Madrid, 1996. ISBN-84-7790-238-0.
- JIAN J.; YADONG W.; LILIANG H. and DERONG S.: "Comparison of Water Distribution Characteristics for Two Kinds of Sprinklers Used for Center Pivot Irrigation Systems", *Applied Sciences*, Vol. 7(421): 1-17, 2017. ISSN-2076-3417.
- KINCAID, D. C.: "Application Rates from Center Pivot Irrigation with Current Sprinkler Types", ISSN-0883-8542, *Applied Engineering in Agriculture, ASAE*, Vol. 21(4): 605-610, 2005. ISSN: 1682-1130.
- KISEKKA, I; K. W. MIGLIACCIO; M. D. DUKES; J. H. CRANE and B. SCHAFFER: *Evapotranspiration-Based Irrigation for Agriculture: Crop Coefficient of Some Commercial Crops in Florida*, [en línea], UF/IFAS Extension Service, AE456, 4 pp., 2016. Disponible en: <http://edis.ifas.ufl.edu/ae456>. [Consulta: 24 de julio de 2017].
- LÓPEZ B., E.; MARTÍNEZ A., D.; ALCÍVAR R., S. F.; González C., O.; Herrera S., M.: "Factores que incrementan el consumo energético en las máquinas de riego de pivote central", *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol. 7(4): 41-46, 2017. ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761.
- LÓPEZ S., M.; MUJICA C., A. y DUARTE N., L.: "Criterio sobre la formulación matemática para el cálculo de las pérdidas por evaporación y arrastre en emisores de baja presión", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 20 (2): 65-69, 2011. ISSN-1010-2770.
- MADER, SH.: *Center pivot irrigation revolutionizes agriculture* [en línea], 2010, Disponible en: <http://www.thefencepost.com> [Consulta: 24 de julio de 2017].
- MARTIN, D. L.; KRANZ, W. L.; THOMPSON, A. L. and LILIANG H.: "Selecting sprinkler packages for center pivots", *Transactions of the ASABE*, Vol. 55(2): 513-523, 2012. ISSN-2151-0032.
- MUJICA C., A.; LÓPEZ S., M.; CARMENATES H., D.; MUJICA L., C. y RIVERÓN L., A. R.: "Evaluación de los indicadores hidráulicos de las máquinas de pivote central eléctricas", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1): 53-55, 2014. ISSN-1010-2760.
- MUÑOZ C., R. y GOWDISH, L.: "Aplicación del método de infiltración de Green-Ampt con redistribución de humedad del suelo entre encharcamientos", En: Samper F., J. C. y Paz G., A., *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, Vol. VII: 205-213, Universidade da Coruña. La Coruña, 2005. ISBN 84-9749-171-8.
- MUNRO O., D. (Coord.): *Paquete Tecnológico del Cultivo del Limón Mexicano en Colima, Gobierno del Estado de Colima, Secretaría de Desarrollo Rural*, pp. 188, México [en línea], 2005, Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/65311749/Paquete-Tecnologico-LIMON-Colima> [Consulta: 24 de julio de 2017].

- PARSONS, J. E. & MUÑOZ C., R.: *WinGAmp: A Windows based teaching tool for Green-Ampt infiltration for unsteady rainfall model*, 38pp., Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida [en línea], 2009, Disponible en: <https://www.mathworks.com/.../49585-green-ampt-infiltration-for> [Consulta: 24 de julio de 2017].
- PCC (PARTIDO COMUNISTA DE CUBA): “Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución”, [en línea], En: *VI Congreso del Partido Comunista de Cuba*, La Habana, Cuba, p. 48, mayo de 2011, Disponible en: http://www.cubadebate.cu/wp-content/uploads/2011/05/tabloide_debate_lineamientos.pdf. [Consulta: 28 de febrero de 2016].
- PÉREZ L., R. y MARTÍNEZ G., Y.: “Diseño hidráulico de los pivotes a partir de criterios agronómicos y operacionales del riego” *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXVI(1): 27-36, 2005. ISSN-0253-0678.
- PÉREZ L., R. y SABATIER C., Y.: “El cambio del módulo de aspersión en pivotes según criterios económicos: aplicación a dos cultivos”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 24(4): 25-30, 2015. ISSN -1010-2760.
- PHOCAIDES, A.: *Handbook on Pressurized Irrigation Techniques*, Second Edition, FAO, pp. 282, Rome, 2007. ISBN-978-92-5-105817-6.
- PLACERES M., Z.; JIMÉNEZ, E.; DOMÍNGUEZ, M.; GUZMÁN, J. y SÁNCHEZ, Y.: “Determinación de los parámetros de explotación de las máquinas de pivote central, en las provincias Artemisa y Mayabeque, para satisfacer la dosis necesaria de los cultivos”, *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol. 3(1): 3-7, 2013. ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L. and MILLER, N.: “Green-Ampt infiltration parameters from soils data”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109(1): 62-70, 1983. ISSN-0733-9439.
- REDAGRÍCOLA: *Pivotes: La Revolución Circular del Riego* [en línea], 2017, Disponible en: <http://www.redagricola.com> [Consulta: 24 de julio de 2017].
- REGALADO, C. M.; RITTER, A.; ÁLVAREZ B., J. & MUÑOZ C., R.: “Simplified method to estimate the Green-Ampt wetting front suction and soil sorptivity with the Phillip-Dunne falling-head permeameter”, *Vadose Zone Journal*, 4: 291-299, 2005. ISSN-1539-1663.
- SANTOS P., L.; JUAN V., J. A.; PICORNELL B., M. R. y TARJUELO M. B., J. M.: *El Riego y sus Tecnologías*, CREA-UCLM, pp. 296, Albacete, España, 2010. ISBN-13:978-84-692-9979-1.
- SCALOPPI, E. J. and ALLEN, R. G.: “Hydraulics of center-pivot laterals”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 119(3): 554-567, 1993. ISSN-0733-9437.
- SENNINGER: *Senninger's Interactive Pivot Sprinkler Catalog* [en línea], 2016, Disponible en: www.senninger.com [Consulta: 12 de julio de 2016].
- TARJUELO M. B., J. M.: *El Riego por Aspersión y su Tecnología*, 3ra. Edición, Ed. Mundi-Prensa, pp. 581 Madrid-Barcelona-México, 2005., ISBN-84-8476-225-4.
- USDA-NRCS: *National Engineering Handbook, Part 623: Irrigation, Chapter 4: Surface Irrigation*, pp. 113, [en línea], 2006, Disponible en: www.conservationwebinars.net/.../usda-nrcs-neh-part-623 [Consulta: 12 de julio de 2016].
- USDA-NRCS: *National Engineering Handbook, Part 652: Irrigation Guide*, pp. 820, Washington DC, 1997.
- USDA-SCS: *National Engineering Handbook, Section 15: Irrigation, Chapter 11: Sprinkle Irrigation*, pp. 125 [en línea], 1983, Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/.../nrcs/.../employees/?cid=nrcs142> [Consulta: 12 de julio de 2016].
- VALMONT IRRIGATION: *Tall Crop Irrigation* [en línea], 2011, Nebraska, USA, Disponible en: www.valleyirrigation.com [Consulta: 12 de julio de 2016].
- VALMONT IRRIGATION: *Circles of Life* [en línea], 2003, Nebraska, USA, Disponible en: www.valmont.com [Consulta: 12 de julio de 2016].

Recibido: 23/09/2017.

Aprobado: 28/02/2018.

Kaddiel Fernández Hung, Investigador, Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. Grupo de Difusión de Tecnologías de Contramaestre (GDITEC). Calle 24 No.6, Rpto. Frank País, Contramaestre, Santiago de Cuba, Cuba. E-mail: opp1@gditec.co.cu

Ismael Fuentes Elías, E-mail: opp1@gditec.co.cu

Damir Fajardo Núñez, E-mail: opp1@gditec.co.cu

Jorge R. Cueto Rodríguez, E-mail: jdpropagacion@gag.cu

Pedro J. González Heredia, E-mail: tecnologia134@iift.cu

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.