

Modelado del Microclima de un Cultivo de Sandía (*Citrullus lanatus*) en la Sub-región Sabana del Departamento de Sucre, Colombia

Carlos S. Cohen-Manrique*, Jhonatan A. Rodríguez-Manrique y Rodrigo D. Salgado-Ordosgoitia
Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura. CECAR, Sincelejo, Colombia
(e-mail: carlos.cohen@cecar.edu.co, jhonatan.rodriguez@cecar.edu.co, rodrigo.salgado@cecar.edu.co)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Ene. 15, 2018; Aceptado Mar. 28, 2018; Versión final Abr. 28, 2018, Publicado Oct. 2018

Resumen

El objetivo del presente estudio fue modelar el microclima en un cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en el departamento de Sucre en Colombia. Se realizó un estudio de simulación como alternativa de control automático para sistemas de riego. Metodológicamente, se utilizaron los modelos de Penman-Monteith y de balance hídrico para analizar el requerimiento hídrico del cultivo. Como estrategia de control se utilizaron controladores de tipo PID y difuso para comparar su comportamiento y establecer la mejor opción frente a las dificultades de recurso hídrico del cultivo bajo las condiciones climáticas de la sabana del departamento de Sucre. Se concluye que, en el modelamiento aplicado el controlador PID arrojó mejor rendimiento (aproximadamente de 3,3 veces) frente al controlador difuso en términos de un ciclo de trabajo de 24 horas. Además, con el controlador PID también se obtuvieron mejores resultados en términos de consumo energético, cantidad de líquido y estabilidad del sistema, frente al controlador difuso.

Palabras clave: modelamiento; microclima; sistemas de riego; controlador automático

Modeling the Microclimate of a Watermelon Crop (*Citrullus lanatus*) in the Sub-region Sabana of the Department of Sucre, Colombia

Abstract

The goal of this study was to model the microclimate in a watermelon crop (*Citrullus lanatus*) in the department of Sucre. For this, a simulation study was done as an alternative to automatic control for irrigation systems. Methodologically, the Penman-Monteith and the water balance models were used to analyze the water requirement of the crop. As a control strategy, PID and diffuse type controllers were used to compare their behavior and to establish the best option in terms of the difficulties for obtaining the necessary water resource for the crop under the climatic conditions of the savannah of the department of Sucre. It is concluded that, in the modeling applied, the PID controller gave better performance (approximately 3.3 times) compared to the fuzzy controller in terms of a 24-hour work cycle. In addition, the PID controller also achieved better results in terms of power consumption, liquid quantity and system stability, compared to the fuzzy controller.

Keywords: modeling; microclimate; irrigation systems; automatic controller

INTRODUCCIÓN

La sandía es una cucurbitácea, herbácea rastrera o trepadora, que produce frutos grandes y jugosos protegidos por una corteza dura (Everts et al., 2014). Es originaria de la zona tropical de África, los pobladores europeos fueron quienes la trajeron a América, donde se extendió por todo el continente donde actualmente cuenta con más de 50 variedades. Físicamente, su color rojo característico se atribuye a un pigmento natural denominado licopeno, este componente oscila entre 3,38 y 11,34 mg/100gr en la fruta, el cual tiene una repercusión apreciable en la salud humana, ya que reduce el riesgo de enfermedad muscular degenerativa, contribuye a la oxidación de lípidos séricos, disminuye el riesgo de cáncer de pulmón y afecciones por enfermedades cardiovasculares (Perkins-Veazie et al., 2006; Soteriou et al., 2014). La sandía es una de las frutas más extendidas por el mundo, siendo los principales países productores Turquía, Grecia, Italia, España, China y Japón. En Colombia, la tendencia de producción indicó un incremento cercano al 86% en la producción entre los años 2010 y 2014, pasando de 51.500 toneladas a 95.000 toneladas. Así mismo, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural menciona que la sandía está incluida en la lista de los diez cultivos de mayor impacto económico y social por el área sembrada, lo que demuestra su frecuente cultivo e importancia en el renglón agrícola del país.

Por otro lado, Colombia al igual que la mayoría de los países de América latina es un país de regiones, por lo que su diversidad de climas es beneficiosa para el crecimiento de este tipo de plantas frutales. Sin embargo, el cambio climático ha ocasionado problemas de sequía por largas temporadas e inestabilidad en las condiciones climáticas, sumado a ello, la erosión causada por la deforestación y la poca tecnificación implementada en las prácticas agrícolas, complican la mayor expansión de este tipo de cultivos (Pardo et al., 2017). Por lo cual, se requieren estrategias para la implementación y posterior optimización de sistemas de riego, con el propósito de suministrar la cantidad de líquido y elementos suplementarios necesarios para el crecimiento y desarrollo óptimo de un cultivo, ya que la sandía dentro de sus prácticas de labranza necesita una prolongada temporada de crecimiento y riego cercana a los 80 días en tierra caliente, para que la semilla pueda germinar y crecer satisfactoriamente (Nabavi-Pelesaraei et al., 2016). Para definir dichos requerimientos, es necesario modelar los elementos del microclima de cada planta, considerando la influencia de las variables climatológicas como la evapotranspiración, la edad fenológica del cultivo, la interacción de la humedad y tipo de suelo, su permeabilidad y velocidad de infiltración, entre otros (Ospina et al., 2017). En ese mismo sentido, para el crecimiento adecuado de la planta, es fundamental alcanzar el balance en la cantidad exacta de agua que se debe proporcionar a la plantación mediante el riego, para esto, resulta fundamental la incorporación de tecnologías de control moderno, el modelamiento matemático y las técnicas de simulación. A razón de lo anterior, el objetivo del presente estudio fue modelar las variables que afectan de manera directa el microclima en un cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en el departamento de Sucre, a través de un estudio de simulación como alternativa de control automático para sistemas de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Metodológicamente, se realizó la simulación del modelamiento del sistema llamado microclima de la planta de sandía (*Citrullus lanatus*) mediante el concepto de balance hídrico, es decir, las iteraciones que resultaron entre el subsistema clima-cultivo-suelo se consideraron como variables previas de estudio el comportamiento de la evapotranspiración, la interacción de la humedad y tipo de suelo, su permeabilidad y el periodo de crecimiento del cultivo (Rahangadale y Choudhary, 2011). Así mismo, se tomó como base de estudio para la evapotranspiración el modelo matemático de Penman-Monteith (1) avalado por la FAO (Allen et al., 2006), que en su estructura hace uso de los principales factores climáticos que afectan directamente el consumo por evaporación metabólica en la planta, tales como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Estos datos fueron suministrados por la estación meteorológica satelital de Puerta Blanca, que pertenece a la Universidad de Sucre, ubicada en municipio de Sincelejo en latitud 09°12' N y longitud 75°23'W. En principio, los datos seleccionados fueron 17.280, utilizándose lecturas horarias y agrupando las diferentes variables en matrices de datos de [24 x 30], es decir, 24 muestras horarias para 30 días de cada mes, durante los meses de marzo, abril, mayo y junio, fechas calendario que concuerdan con las fechas de cultivo de la sandía en la sabana sucreña y sus alrededores.

Para calcular la evapotranspiración, se utilizó el método combinado de Penman-Monteith (P-M) como procedimiento estándar para la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 2006).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

En esta ecuación, ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm/día), R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m^2 día), R_a es la radiación extraterrestre (mm/día), G es el flujo del calor de suelo (MJ/m^2 día), T

es la temperatura media del aire a dos metros de altura ($^{\circ}\text{C}$), U_2 es la velocidad del viento a dos metros de altura (m/s), e_a es la presión real de vapor (kPa), $e_s - e_a$ es el déficit de presión de vapor (kPa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/ $^{\circ}\text{C}$) y finalmente γ es la constante psicrométrica (kPa/ $^{\circ}\text{C}$). Seguidamente, se describen los procedimientos necesarios para calcular la ET_0 en el área de estudio (Walter et al., 2005). Inicialmente, para determinar la constante psicrométrica se utilizó la ecuación (2).

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda} \quad (2)$$

Donde, C_p es el calor específico del aire en el área de medida ($1,013 \times 10^{-3}$ KJ/Kg C), P es la presión atmosférica (Kpa), λ calor latente de evaporización (Kpa/ $^{\circ}\text{C}$), ε es la relación del peso molecular del vapor del agua y el aire seco (0,622 para zonas cálidas) (FAO, 2011). Como λ expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua, su valor varía en función de la temperatura y para calcularla, se utilizó la ecuación 3.

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3})T \quad (3)$$

Experimentalmente, se observó que al determinar cada una de estos parámetros, se están definiendo valores únicos del modelo para cada región geográfica. Por lo cual, para determinar la presión atmosférica se consideró la ecuación 4 (FAO, 2011).

$$P = 101.3 \left(\frac{(273.16 + T) - 0.0065z}{273.16 + T} \right)^{5.26} \quad (4)$$

Donde, z es la elevación del lugar de medida con respecto al nivel del mar (213 metros para la sabana sucreña), T es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$). El valor de Δ , se calculó utilizando la temperatura media diaria del aire.

$$\Delta = \frac{4098 \left(0.6108 \times e^{\left(\frac{17.27 \times T}{T + 237.3} \right)} \right)}{(T + 237.3)^2} \quad (5)$$

Según Allen (2006), la presión de vapor de saturación de la temperatura instantánea del aire, se define como:

$$e_s = 0.6108 \times e^{\left(\frac{17.27 \times T}{T + 237.3} \right)} \quad (6)$$

Donde, e_s se evaluó tanto para T_{Max} como para T_{Min} , de manera que pueda definir la presión de vapor de saturación media horaria. Así mismo, la presión real de vapor e_a dependió de e_s y del porcentaje de humedad relativa.

$$e_a = e_s \times \frac{HR}{100} \quad (7)$$

La radiación neta se calculó mediante la diferencia entre R_{ns} y R_{nl} , como se ilustra en la ecuación 8.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (8)$$

Donde, R_{ns} es la radiación solar neta o de onda corta (MJ/ m^2 día) y se modeló con la ecuación 9.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \times R_s \quad (9)$$

Donde, α es albedo o coeficiente de reflexión del cultivo (0,23 para sandía) (Allen et al., 2006) y R_s es la radiación solar (MJ/ m^2 día). R_{nl} , define la radiación de onda larga (MJ/ m^2 día), que es la radiación solar absorbida por la tierra y se convierte en energía térmica. Por su parte, R_{nl} se modeló como se ilustra en la ecuación 10.

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\text{max,k}}^4 + T_{\text{min,k}}^4}{2} \right] \times (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \times \left[1.35 \frac{R_s}{R_{SO}} - 0.35 \right] \quad (10)$$

Donde, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9}$ MJ/K m² día), T_{Max} es la temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas, T_{Min} es la temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas, e_a es la presión de vapor real (Kpa), R_s/R_{s0} es la radiación relativa de onda corta (valores $\leq 1,0$) (adimensional), R_s es la radiación solar medida o calculada (MJ/K m² día) y la R_{s0} es la radiación en un día despejado (MJ/K m² día) (Allen et al., 2006). La FAO define R_{s0} como se plasma en la ecuación 11.

$$R_{s0} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z) \times R_a \quad (11)$$

La radiación extraterrestre absorbida (R_a) según Valipour, M. (2015) se modeló por la ecuación 12.

$$R_a = \frac{R_s}{K_{RS} \sqrt{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}} \quad (12)$$

K_{RS} es 0,19 debido a que la zona de estudio es costera (Allen et al., 2006). R_s , fue tomada de los valores horarios entregados por la estación meteorológica (W/m²), y el modelo de evapotranspiración de Penman-Monteith utiliza la radiación neta (MJ/m² día). Para ello, el factor de conversión utilizado fue 0,0864 (Roepstorff, y Nansen, 1998). Una vez definidos los diferentes modelos matemáticos y la utilización de las variables climatológicas medidas en la estación meteorológica, se alcanzó el valor de la evapotranspiración de referencia (ET_o). Sin embargo, debe recalarse que para cultivos distintos los valores de la evapotranspiración son diferentes y se definen a través de una constante de proporcionalidad del coeficiente de cultivo (K_c), quien depende del crecimiento de la planta y que ha sido calculado de acuerdo al método de Pereira et al., (2015). Utilizando éste parámetro se pudo calcular la evapotranspiración del cultivo (ET_c) con la ecuación 13, que se definió como la suma de la cantidad de agua utilizada en un cultivo específico y en la transpiración para construcción de tejidos, más el agua que se evapora del suelo donde se desarrolla la planta.

$$ET_c = K_c ET_o \quad (13)$$

Dónde, ET_c es la evapotranspiración del cultivo, ET_o es la evapotranspiración de Referencia, K_c es el coeficiente de desarrollo del cultivo que varía según su etapa fenológica. Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo de la sandía (figura 1), se requirieron tres valores de K_c correspondientes a la etapa inicial ($K_{c\text{ini}}$), la etapa de mediados de temporada ($K_{c\text{med}}$) y la etapa final del cultivo ($K_{c\text{fin}}$). Estos valores se obtuvieron analíticamente según la metodología propuesta por Allen et al., (2006), posteriormente fueron validados por la experiencia de agricultores y profesionales del área agrícola en la región de las sabanas del departamento de Sucre.

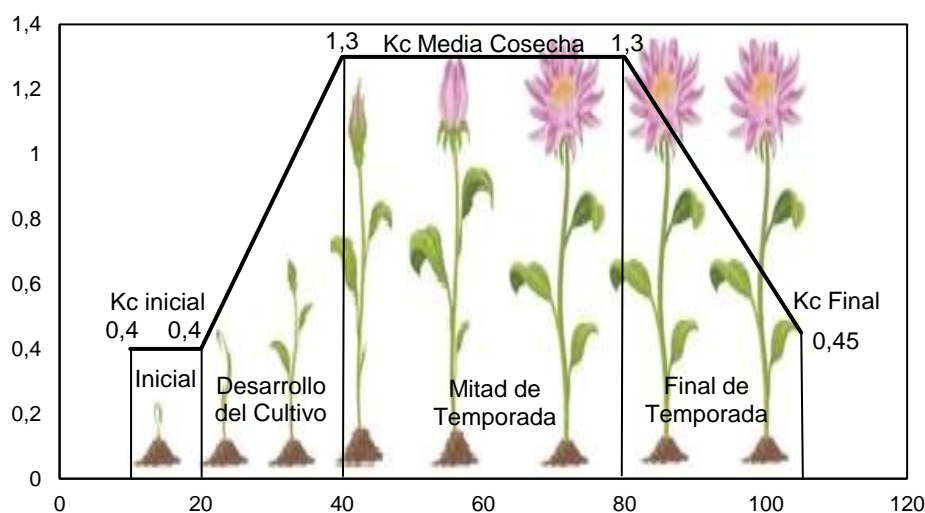


Fig. 1: Adaptación de la curva generalizada del coeficiente del cultivo de la Sandía (K_c) (FAO 2011).

Adicional al modelamiento de la pérdida de líquido mediante el proceso de evapotranspiración, se calculó el balance hídrico siguiendo la metodología de Laio (2001) y de Rodríguez-Iturbe y Porporato (2007), considerándose el medio poroso como una estructura de pequeños conductos interconectados de diámetro n y teniendo en cuenta el flujo laminar expresado por la Ley de Darcy de modo que se siguiera la ecuación 14.

$$nZ_r \frac{ds(t)}{dt} = \varphi[s(t); t] - \chi[s(t)] \quad (14)$$

Dónde, n es la porosidad del suelo, Z_r es la profundidad activa de la zona radicular de la planta, $s(t)$ es el contenido relativo de humedad del suelo en términos porcentuales ($0 \leq s(t) \leq 1$), $\phi[s(t);t]$ es la tasa de infiltración, $\chi[s(t)]$ es la tasa de pérdida de humedad desde la zona radicular. Para considerar el efecto sobre la vegetación, la profundidad del suelo que se estimó en el volumen de control consistió en la profundidad de las raíces para un cultivo determinado (Z_r), debido a que es la capa en la cual el agua está disponible (agua fácilmente aprovechada, AFA) para ser absorbida por la planta.

Según Hernández-Torres (2010), la tasa de infiltración $\phi[S(t); t]$ es el componente estocástico del balance y representa la parte de la precipitación que cae directamente sobre la columna de suelo, que en el modelo de balance puntual se expresó mediante la ecuación 15.

$$\phi[s(t);t] = R(t) - I(t) - Q[s(t);t] \quad (15)$$

Donde $R(t)$ es la tasa de precipitación, $I(t)$ es la cantidad de precipitación interceptada por la cobertura vegetal y $Q[S(t);t]$ es la tasa de escorrentía superficial, $S(t)$ denota la ocurrencia de lluvia para el caso de la escorrentía. Los otros componentes solo dependen del instante de tiempo t considerado. La tasa de pérdida de humedad desde la columna del suelo se calculó con la ecuación 16.

$$\chi[s(t)] = E[s(t)] + L[s(t)] \quad (16)$$

Dónde, $E[s(t)]$ es la tasa de evapotranspiración, medida con periodicidad horaria por la estación meteorológica (mm/día) (1) y $L[s(t)]$ es la tasa de percolación profunda. Las ecuaciones 15 y 16 son simplificaciones matemáticas para la agilización del modelamiento, que a pesar de ser simplificaciones han brindado orientaciones fundamentales en cuanto a la relación entre la dinámica y las propiedades interdependientes del sistema clima-suelo-vegetación.

Estrategia de control

Para el diseño de la estrategia de control, inicialmente se consideró que los factores que determinan los requerimientos totales de agua de un cultivo son la evapotranspiración, tipo de suelo, permeabilidad del suelo y periodo de crecimiento del cultivo (Rahangadale y Choudhary, 2011).

Se ha definido que para una sesión de riego algunos de estos parámetros son fijos (el tipo de planta, tipo de suelo y la etapa de crecimiento). Sin embargo, existen otros que varían con las características propias de la región de estudio, como la evapotranspiración, el perfil hídrico del cultivo y los niveles de absorción de agua por el suelo.

En este estudio se consideró, un ciclo completo de riego para el crecimiento y desarrollo de la plantación de sandía. Así mismo, se estimó que normalmente para los sistemas de control en distritos de riego, además de considerar el perfil del suelo como homogéneo, es común definir el período de irrigación tomando como base el agua disponible total del suelo, esto es el agua útil o disponible para las plantas (AUP) (17) (Ortiz, 2006). Por lo tanto, el controlador debe funcionar de tal manera que pueda mantener estable el porcentaje de humedad en el suelo, cuyo rango se conoce como modelo de estimación para el agua útil en plantas. Entre ambos parámetros se estableció la zona de trabajo (figura 2), llamada agua útil o disponible.

$$AUP = CC - PMP \quad (17)$$

Donde, AUP es el agua disponible para las plantas, CC es la capacidad de campo y el PMP es el punto de marchitez permanente. La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se determinaron en el laboratorio sometiendo muestras disturbadas o indisturbadas a equilibrio con presiones correspondientes a 0,3 bares para la CC y 15 bares para la PMP (Jódar et al., 2018).

Así mismo, para el modelamiento de la infiltración se contempló que los suelos no absorben linealmente el agua que les proveen las lluvias y/o los sistemas de riego, por lo cual para la obtención de la velocidad de infiltración del agua en el suelo, se contempló el modelo de Kostiakov-Lewis descrito en la ecuación 18 con $n=0,48$ y ajustada en el parámetro k dependiendo del tipo de suelo del cultivo (Kirkham M. B., 2014).

$$I = k \times t^{-n} \quad (18)$$

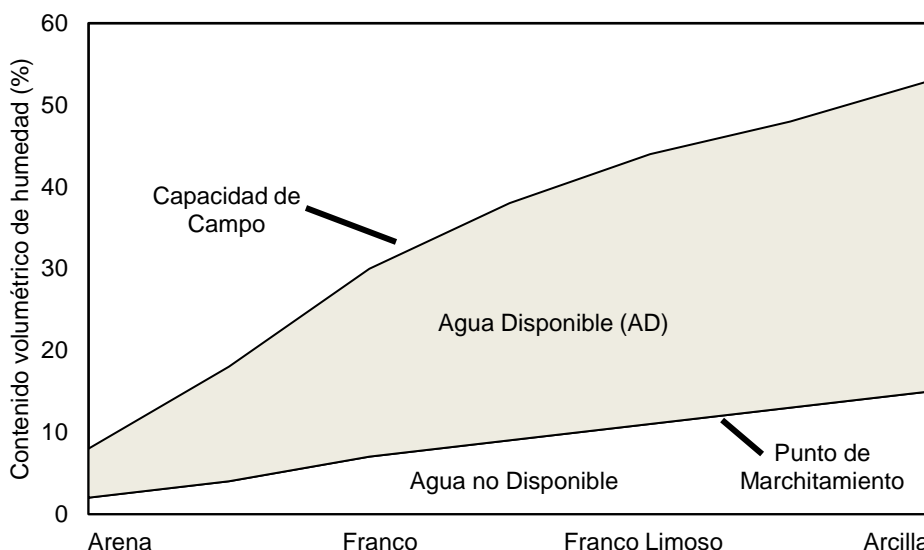


Fig. 2: Relación entre el contenido volumétrico de humedad y los tipos de suelo tomada de Osuna y Ramírez (2013).

En la tabla 1, se ilustran los modelos propuestos por Moreno y Osorno (1999) para determinar la capacidad de campo del suelo y la densidad aparente en términos del porcentaje de humedad (%H) in situ, según el tipo de suelo.

Tabla 1: Modelos para los suelos en la región de estudio: capacidad de suelo y densidad aparente (DA).

Suelo	Modelo para Capacidad de Campo	DA (gr/cc)
Arcilloso	CC=120,67-0,067(%Arena)-0,048(%Limo)-6,53(%Mat. Orgánica)-53,57DA	DA=1.577-0,0103x%H
Franco	CC=120,12+0,149(%Arena)+0,075(%Limo)+0,56(%Mat. Orgánica)-80,11DA	DA=1.4696-0.008x%H
Franco Arcilloso	CC=162,43+ 0,022(%Arena)+0,014(%Limo)+1,696(%Mat. Orgánica)-103,17DA	DA=1.472-0.0086x%H

Como valores de referencia, se consideró que para el suelo arcilloso, la arena varía entre 43-51%, el limo entre 30-37% y la materia orgánica entre 2,03-2,5%. Para el suelo franco, la arena varía entre el 19-22%, limo entre el 34-40% y la materia orgánica 1,29-2,33%. Por último, para el suelo franco arcilloso, la arena está entre 29-39%, limo entre 31-46% y materia orgánica varía entre 1,14-2,07% (Moreno y Osorno, 1999). Con la Tabla 1, se modelaron las características del suelo en cuanto a la absorción y capacidad de retención, incluyendo variables como la capacidad de campo (CC), definida como el volumen de agua que un suelo puede retener después de saturarlo y dejarlo drenar libremente durante 48 horas (Keller y Hakansson, 2010). Para la validación en el controlador, se consideró la metodología de Moreno-Osorno (1999) y Peralta (2010), para calcular el valor específico del punto de marchitez permanente (PMP) en la zona de estudio, donde se utilizó la ecuación 19.

$$PMP = 0,56 \times CC \tag{19}$$

Así mismo, el modelo de humedad deseada de la ecuación 20 fue definido por Flórez y Ruíz (1998), donde H es la máxima capacidad de almacenamiento de agua dentro del área radical en el día i expresada en milímetros (para el modelo de control, Humedad Deseada), P_{ri} es el crecimiento radicular para el día i (cm) y D_a es la densidad aparente del suelo.

$$H_{DESEADA} = \frac{CC - PMP}{100} \times P_{ri} \times D_a \tag{20}$$

Para la estimación del crecimiento radicular, se utilizó la ecuación 21, que es la función indicada por Castellanos et al., (2006), que define la profundidad típica de enraizamiento sin impedimento físico para cualquier tipo de suelo en centímetros.

$$P_{ri} = 1.8 \times \left(\frac{t_i}{t_{final}} \right) \times \left(1.5 - \frac{t_i}{t_{final}} \right) \times z \tag{21}$$

En la ecuación 21, t_i es el tiempo que transcurre en el desarrollo del cultivo (horas), t_{final} es el tiempo que demora el desarrollo del cultivo (horas) y z es la profundidad máxima que alcanzan las raíces del cultivo (cm). La dinámica del proceso de riego fue descrita mediante el modelo de balance hídrico descrito en la ecuación 14. Este modelo establece que cualquier cambio en el almacenamiento de agua durante un tiempo dado y en una localidad específica, es el resultado de la resta del flujo de entrada de agua (riego, lluvia, ascenso capilar) menos el flujo de salida de agua (evaporización, transpiración de la planta, escurrimiento de agua, percolación profunda), esto hace referencia a las ecuaciones 15 y 16 de manera que, utilizando las ecuaciones 17, 19 y 20 como referencia, se obtendría el modelo de humedad actual definido por Flórez y Ruíz, (1997) que se ilustra en la ecuación 22.

$$H_{\text{REAL}} = (q_i + H_i) - (I + ET_c + D) \quad (22)$$

Donde el agua drenada D , está expresada en términos de la tasa de infiltración I , la humedad del suelo una hora antes de la medición (H_i) y la humedad máxima permitida del suelo H_{MAX} , para dar origen a la ecuación 23.

$$D = (I + H_i) - H_{\text{MAX}} \quad (23)$$

Para un controlador, el objetivo fundamental es que H_{REAL} sea lo más parecido posible a H_{DESEADA} , de modo que el error tienda a ser cero, para ello, el sistema de riego debe estar activo y disponible para proveer proporcionalmente el líquido, de modo que pueda garantizar las exigencias del cultivo en todas sus etapas fenológicas y/o de producción. En la figura 3, se ilustra el esquema general del sistema de control utilizado.

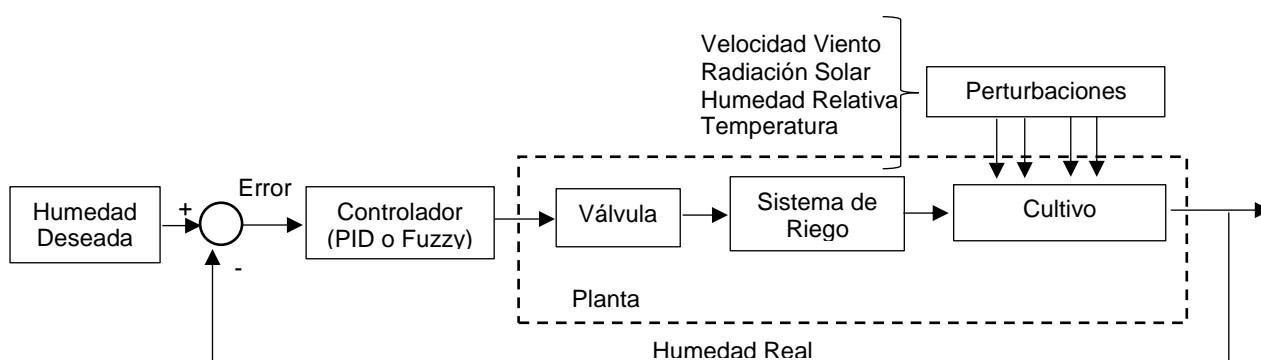


Fig. 3: Diagrama de bloques del controlador.

Para la implementación de los controladores, se utilizó un controlador PID basado en su forma clásica, utilizando la ganancia respectiva (K_p) y sintonizando las variables propias del diseño, relacionadas con el controlador proporcional, integral y derivativo K_p , K_i y K_d . El método heurístico utilizado para optimizar el controlador fue la sintonización de Ziegler–Nichols. Además, se utilizó un controlador difuso previamente configurado en base a reglas que estudiaron sus rendimientos (Ramírez, 2017; Rahangadale y Choudhary, 2011). Los modelos mencionados fueron trabajados y simulados en el software Matlab® y su herramienta Simulink®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4, se ilustra el resultado del modelo paramétrico de evapotranspiración ajustado a las condiciones climatológicas de la región, lo cual es congruente a los resultados obtenidos en distintas partes del mundo (Adeboye y Osunbitan, 2010; Howell, 2010; Nghi, 2008; Nandagiri y Kovoov, 2006). Lo anterior, demuestra la correcta aplicación del modelo de Penman–Monteith basado en los parámetros climatológicos circunscritos a la región Sabanas del departamento de Sucre. Por otro lado, la salida de los controladores está definida por la diferencia entre la humedad real del sistema y la humedad deseada. Por ello, en la figura 5 se ilustra el comportamiento del controlador difuso y del controlador PID, de la cual se infiere la relación entre la humedad deseada y real del sistema para ambos controladores, presentándose un margen del error tendiente a cero en el controlador PID (1,8% como máxima amplitud), mientras que para el controlador difuso el error aunque bajo, se muestra en el orden del 1,5%, pero oscilante y sostenido, valores que según Rahangadale y Choudhary (2011) y Mishra (2017) son válidos para el desempeño del regulador, sobre todo para aplicaciones agrícolas donde los tiempos de respuesta de las variables que interactúan con el sistema, no requieren altas velocidades y/o extremada precisión.

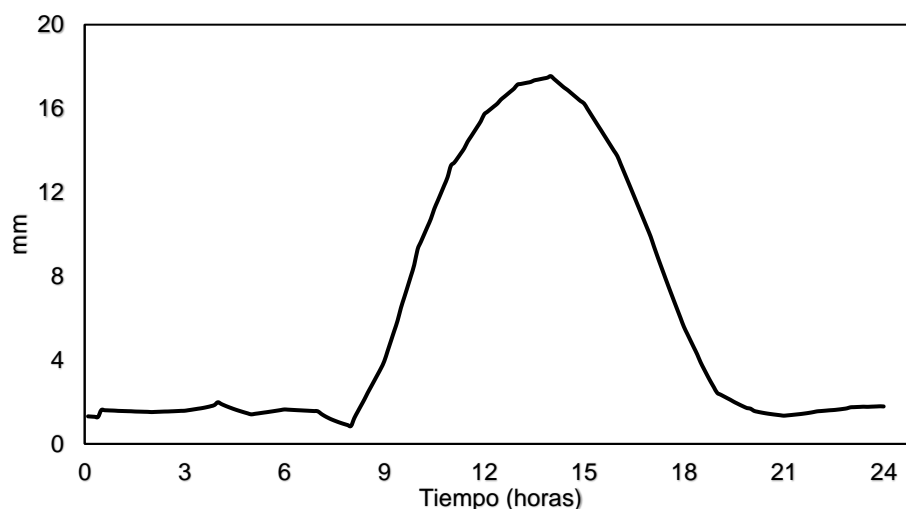


Fig. 4: Comportamiento de la Evapotranspiración en la zona de estudio

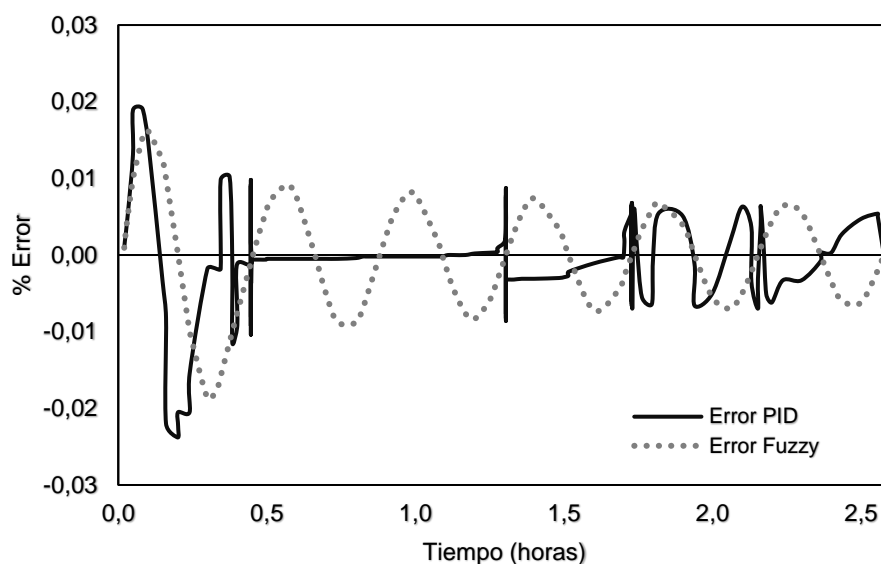


Fig. 5: Comparación entre el error en el controlador PID y Difuso.

Además, en la figura 5 se observa que el error promedio del modelo de irrigación basado en el controlador PID es mucho menor que el difuso. El valor promedio de la señal de error en el PID durante las veinticuatro horas del día es de $1,047 \times 10^{-5}$, es decir del orden del 0,001% aproximadamente. Mientras que para el difuso, el valor promedio del error durante este mismo período de tiempo es del orden del $3,4379 \times 10^{-5}$, es decir 0,0034% aproximadamente. Es evidente que ambas magnitudes del error, son suficientemente bajas, pero aun así el error en el controlador difuso es aproximadamente 3,3 veces mayor que el error transitorio en el controlador PID durante un día de trabajo de 24 horas.

En este mismo sentido, debe reforzarse que para observar con mayor detalle el comportamiento de la variable de interés (% error) en ambos controladores, se muestran solo 2,5 horas de trabajo en la figura 5, de manera que se pueda detallar su funcionamiento. Por su parte, al observar el comportamiento oscilante del porcentaje de error del controlador difuso, es posible inferir que a pesar de que dicho valor es en gran medida pequeño, es posible mejorar el sistema haciendo que estas oscilaciones sean menores en amplitud (Kharola et al., 2016).

Por otro lado, en la figura 6 se ilustra la comparación del consumo de energía en base a los comportamientos de los controladores relacionando al trabajo realizado por el controlador PID y controlador difuso para mantener estable el sistema. El controlador difuso posee un trabajo mayor, donde se destaca mayor predominio de este en la fase inicial, donde se debe romper la inercia. Luego, ambos controladores trabajan de manera oscilante manteniendo el error en valores menores del 2%, lo que asegura la estabilidad del sistema.

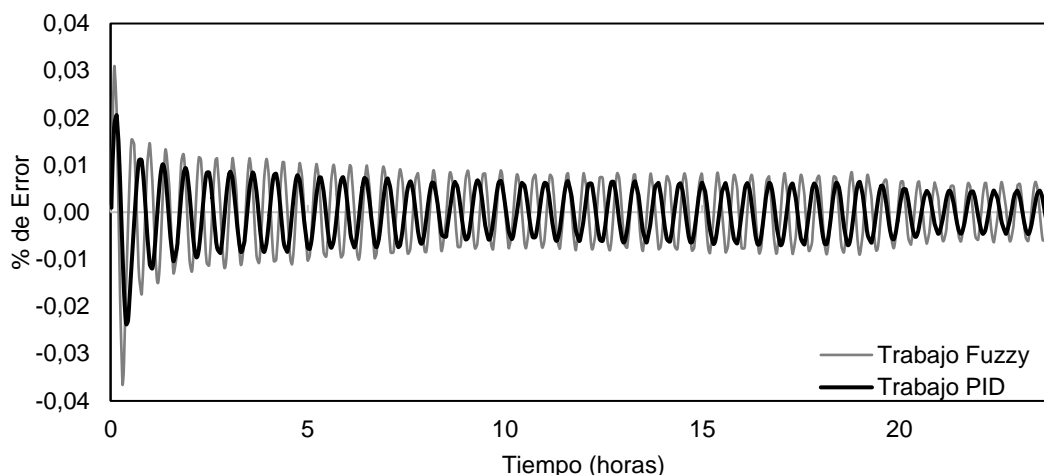


Fig. 6: Trabajo del Controlador PID y Difuso

Así mismo, puede observarse que en términos de apertura de la válvula para determinar el riego (acción del controlador), ambos controladores en un inicio entregan el mayor esfuerzo referentes al 3,07% de apertura para el difuso y al 2,95% de apertura para el PID. Aunque el sistema de irrigación basado en el controlador difuso indica un valor de apertura inicial similar al empleado por el controlador PID, durante el resto del día mantiene un comportamiento oscilante alrededor de cero con una amplitud de $\pm 1,08\%$ y período de oscilación aproximada de 2,4 ciclos/hora, y con una media cercana al 0,11% de trabajo. Mientras que el controlador PID, luego del pico inicial cercano al 2% se estabiliza de tal manera que durante el resto del riego su accionar es cercano a cero, de modo que su valor medio de trabajo en cuanto a la señal de control para la apertura de la válvula es del orden de 0,0062%, lo que muestra largos períodos de inactividad. Es decir, que el trabajo del controlador difuso es 17,7 veces mayor con respecto al controlador PID, esto se podría explicar porque la estabilidad del controlador difuso no está asegurada en las mismas proporciones del controlador difuso, por lo que sería recomendable ampliar la base de reglas en dicho controlador (Ulpiani et al., 2016).

CONCLUSIONES

Los modelos utilizados para estimar la evapotranspiración de las plantas, los volúmenes de agua para riego, el proceso de balance de flujo, el estudio de suelos y la velocidad de infiltración del agua en el suelo referentes al microclima del cultivo de sandía en la sabana de Sincelejo, pueden ser adaptados para recrear los requerimientos hídricos globales de las plantas de la manera más aproximada posible a la realidad y demostrando que éste es un proceso totalmente controlable en el tiempo y utilizable para estudios orientados a la producción agrícola a pequeña, mediana y gran escala. Además, dichos modelos son totalmente ajustable a los diferentes tipos de suelos existentes en la región de cobertura del estudio y en cualquier otra. Por su parte, desde el punto de vista del control este método puede considerarse como flexible y/o adaptativo para ser utilizado en cualquier tipo de cultivo hortofrutícola. En cuanto a los controladores, el PID arrojó un mejor rendimiento, de aproximadamente 3,3 veces frente al controlador difuso en términos de un ciclo de trabajo de 24 horas. Además, con el controlador PID también se obtuvieron mejores resultados en término de consumo energético, cantidad de líquido y estabilidad del sistema frente al controlador difuso.

REFERENCIAS

- Adeboye, O. y J. Osunbitan, Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and temperature based models in estimating reference evapotranspiration using complete and limited data, application to Nigeria, Ile-Ife, Nigeria, Department of Agricultural Engineering (2010)
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes y M. Smith, Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Roma, Italia, FAO (2006)
- Castellaro, G. y F. Squella, Modelo simple de simulación para la estimación del crecimiento, fenología y balance hídrico de praderas anuales de clima Mediterráneo, doi: 10.4067/S0365-28072006000300006, Agricultura Técnica, 66(3), 271-282 (2006)
- Everts, K.L., D. S. Egel, D. Langston y X. G. Zhou, Chemical management of Fusarium wilt of watermelon, Crop Protection, 66, 114-119 (2014)
- FAO, Estado de los Recursos de Tierras y Aguas del Mundo para la Alimentación y la Agricultura, Roma, FAO, Fiat Panis (2011)
- Hernández-Torres, G., Modelamiento eco-hidrológico de la humedad del suelo en el valle del río cauca, Bogotá, Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia (2010)

- Howell, T., *The Penman - Monteith Method*, Bushland, USA, USDA - Agricultural Research Service (2010)
- Jódar, J., E. Carpintero y otros cinco autores, Combination of lumped hydrological and remote-sensing models to evaluate water resources in a semi-arid high altitude ungauged watershed of Sierra Nevada (Southern Spain), doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.300, *Science of the total environment*, 625, 285-300 (2018)
- Keller, T. e I. Håkansson, Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content, *Geoderma*, 154(3), 398-406 (2010)
- Kharola, A., P. Patil, S. Raiwani y D. A. Rajput, Comparison study for control and stabilisation of inverted pendulum on inclined surface (IPIS) using PID and fuzzy controllers, doi: 10.1016/j.pisc.2016.03.016, *Perspectives in Science*, 8, 187-190 (2016)
- Kirkham, M. B., *Principles of soil and plant water relations*, 2ª edición, New York, USA, Academic Press (2014)
- Laio, F., *Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress*, New York, USA, Adv. Water Resour (2001)
- Mishra, E. y S. Tiwari, Comparative analysis of fuzzy logic and pi controller based electronic load controller for self-excited induction generator, doi: 10.1155/2017/5620830, *Advances in Electrical Engineering* (2017)
- Moreno, F. y J. Osorno, Estudio comparativo de los métodos de laboratorio para la determinación de capacidad de campo y obtención de ecuaciones, *Sincelejo, Sucre, Universidad de Sucre* (1999)
- Nabavi-Pelesaraei, A., R. Abdi y S. Rafiee, Neural network modeling of energy use and greenhouse gas emissions of watermelon production systems, doi: 10.1016/j.jssas.2014.05.001, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15(1), 38-47 (2016)
- Nandagiri, L. y G. M. Kovoov, Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:3(238), *Journal of irrigation and drainage engineering*, 132(3), 238-249 (2006)
- Nghi, V., Potencial evapotranspiration estimation and its effect on hydrological model response at the nong son basin, *VNU Journal of Science*, 213 – 223 (2008)
- Ospina-Noreña, J. E., C. A. Domínguez-Ramírez y otros 3 autores, Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia, doi: 10.20937/ATM.2017.30.01.06, *Atmósfera*, 30(1), 63-76 (2017)
- Osuna, F. D. y S. Ramírez, *Manual para cultivar cebolla con fertirriego y riego por gravedad en el estado de Morelos* (2013)
- Pardo-Martínez, C. I. y P. W. H., Alfonso Climate change in Colombia: A study to evaluate trends and perspectives for achieving sustainable development from society, doi: doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2017-0087, *International Journal of Climate Change Strategies and Management* (2017)
- Peralta Buelvas, E. R., *Determinación de ecuaciones de capacidad de campo y punto de marchitez permanente en suelos del municipio de Corozal, Sucre* (2010)
- Pereira, L.S., R.G. Allen, M. Smith y D. Raes, Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future, doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.031, *Agricultural Water Management*, 147, 4-20 (2015)
- Perkins-Veazie, P., J.K. Collins, A.R. Davis y W. Roberts, Carotenoid content of 50 watermelon cultivars, doi: 10.1021/jf052066p, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 2593–2597 (2006)
- Rahangadale, V. y D. Choudhary, *On Fuzzy Logic Based Model for Irrigation Controller Using Penman - Monteith Equation*, Gondia, India, MIET (2011)
- Ramírez, J. A., H.O. Sarmiento y J. M. López-Lezama, Diseño de un Clasificador Difuso para el Establecimiento de los Estados Funcionales de un Sistema de Producción de Aire Medicinal, *Información Tecnológica*, 28(6), 147-160 (2017)
- Roepstorff, A., y P. Nansen, *Food and Agriculture Organization of the United Nations; Rome, 1998, Epidemiology, diagnosis and control of helminth parasites of swine*, *FAO Animal Health Manual* (1998)
- Rodríguez-Iturbe, I. y A. Porporato, *Ecohydrology of water-controlled ecosystems: Soil moisture and plant dynamics*, Cambridge University Press (2007)
- Soteriou, G. A., M. C. Kyriacou, A. S. Siomos y D. Gerasopoulos, Evolution of watermelon fruit physicochemical and phytochemical composition during ripening as affected by grafting, doi: 10.1016/j.foodchem.2014.04.120, *Food Chemistry*, 165, 282–289 (2014)
- Ulpiani, G., M. Borgognoni, A. Romagnoli, y C. Di Perna, Comparing the performance of on/off, PID and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building, doi: 10.1016/j.enbuild.2105.12.027, *Energy and Buildings*, 116, 1-17 (2016)
- Valipour, M., Evaluation of radiation methods to study potential evapotranspiration of 31 provinces, doi: 10.1007/s00703-014-0351-3, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 127(3), 289-303 (2015)