

ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN CAFETALES A LIBRE EXPOSICIÓN SOLAR

Víctor Hugo Ramírez-Builes*; Álvaro Jaramillo-Robledo**; Jaime Arcila-Pulgarín*;
Esther Cecilia Montoya-Restrepo***

RESUMEN

RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A.; ARCILA P., J.; MONTOYAR., E.C. Estimación de la humedad del suelo en cafetales a libre exposición solar. Cenicafé 61 (3):252-261. 2010

Con el fin de contar con un modelo que permitiera estimar la humedad del suelo a nivel diario en cultivos de café, producto de la integración de variables edáficas, fisiológicas, hidrológicas y atmosféricas, se propone un modelo micro-meteorológico basado en procesos físicos. Este modelo limita la evapotranspiración del cultivo en función de la humedad del suelo, considera la re-distribución de la lluvia dentro del cultivo y la dinámica de interceptación- evaporación del agua en las hojas. Para evaluarlo, se tomaron datos de humedad de suelo medidos en cultivos de café en producción, en Cenicafé (Chinchiná, Caldas) y el *Campus* Universitario de La Universidad de Santa Rosa de Cabal (Santa Rosa de Cabal, Risaralda). Durante los años 1997-1998, en Cenicafé se tomaron las medidas de humedad, con un equipo de reflectometría de dominio temporal-TDR, y durante el año 2004, en la segunda localidad, se emplearon muestras de suelo disturbadas con barreno. La humedad del suelo estimada siguió el patrón de la humedad medida, con una agregación superior al 85%. En Cenicafé el índice de agregación de Willmott osciló entre 0,85%-0,88% y en el *Campus* fue 0,86%, con una relación lineal 1:1, entre los valores de humedad estimada con el modelo y los medidos en el campo, a 20 cm de profundidad. Se demuestra que para cultivos de cobertura densa los modelos micro-meteorológicos basados en procesos físicos necesitan considerar en su estimación la interceptación de la lluvia en las hojas y se debe ajustar la evapotranspiración del cultivo cuando ésta alcance límites críticos de estrés hídrico.

Palabras claves: Humedad del suelo, modelos, relaciones hídricas, balance hídrico.

ABSTRACT

With the aim to obtain a model to calculate soil moisture on a daily basis in coffee crops as a product of the integrations of soil, physiological, hydrological and atmospheric variables, it is propose a micrometeorological model based on physical processes. This model limits the crop evapotranspiration to favor soil moisture. It also considers the rainfall distribution in the crop and the interception-evaporation dynamic in the leaves. The model was evaluated by taking data of soil humidity measured in two locations in productive coffee plantations at Cenicafé (Chinchiná-Caldas) and in the Campus of Santa Rosa de Cabal University -UNISARC (Santa Rosa de Cabal, Risaralda). During the years 1997-1998, moisture measures were taken at Cenicafé with a time-domain TDR reflectometry equipment, and in 2004 used disturbed drilled soil samples in the second location. The estimated soil moisture followed the pattern of moisture measurement, with an aggregation greater than 85%. Cenicafé, the Willmott aggregation index ranged between 0.85% and 0.88% and in the Campus it was 0.86% with a 1:1 linear relationship between the moisture values estimated with the model and those measured in the field, 20 cm deep. It is demonstrated that for dense cover crops, the micro-meteorological models based on physical processes need to consider rainfall interception on the leaves and crop evapotranspiration should be adjusted when it reaches critical limits for water stress.

Keywords: Soil moisture, models, water relations, water balance.

* Investigador Científico II e Investigador Principal, respectivamente. Fitotecnia. Cenicafé

** Investigador Científico III. Agroclimatología. Cenicafé

*** Investigador Científico III. Biometría. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La caficultura colombiana se distribuye a lo largo de las cadenas montañosas del país, con heterogeneidad en sus suelos y en sus condiciones meteorológicas y climáticas asociadas a factores de macro-meso y micro-escala. La humedad del suelo es uno de los factores de la producción que más influyen en el cultivo de café (2, 3, 5, 12, 16, 40). Por lo tanto, es de interés modelar la humedad del suelo a partir de la integración de variables meteorológicas, edáficas y del cultivo. Es importante conocer la distribución temporal de la humedad del suelo para predecir impactos en la producción por deficiencia o exceso de agua en el suelo, para hacer estudios de zonificación o para definir prácticas de manejo agronómico, entre otras.

La humedad del suelo está en función de la distribución de la lluvia dentro del cultivo, de la densidad de siembra y distribución de su área foliar, de la demanda evaporativa de la atmósfera, de la pendiente del terreno y de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo. Actualmente, se dispone de una variedad de técnicas que permiten medir la humedad del suelo directamente en el campo, sin necesidad de tomar muestras de suelo y alterar sus propiedades (26, 36), la desventaja de estos métodos es el costo de los equipos y la dificultad de tener datos continuos en el tiempo y en el espacio, por lo cual los modelos tanto estocásticos como determinísticos son de utilidad en este sentido y ayudan, entre otras, a estimar la distribución espacial y temporal de la humedad del suelo bajo las coberturas vegetales, si existe una apropiada definición de parámetros para sus variables.

La simulación de la humedad del suelo en la zona de raíces se puede hacer empleando modelos empíricos, agrometeorológicos basados en procesos físicos (19, 25), o empleando modelos estadísticos (24, 35). Dentro de los modelos agrometeorológicos se cuenta

con el de balance hídrico, dentro del cual se diferencian esencialmente dos, a saber: los modelos de contabilidad hídrica (19, 31) y los modelos de simulación dinámica, basados en la física del flujo en la zona no saturada (8, 23, 37, 38, 41). Los modelos de balance o contabilidad hídrica son los preferidos debido a su alta aplicabilidad a nivel regional o grandes áreas (32), además porque son muy útiles en la predicción de la demanda de riego, en evaluar el efecto del estrés hídrico en los cultivos, en la zonificación agroclimática y en la predicción de rendimientos, entre otras (4, 6, 14, 22, 33, 39, 43).

En Colombia, para el cultivo del café, se han desarrollado varios modelos agrometeorológicos orientados a conocer el comportamiento del agua en el suelo, entre los que se destaca el modelo de balance hídrico desarrollado por Lhomme *et al.* (20), a partir del cual se puede determinar el almacenamiento de agua en el suelo, el drenaje y el déficit de agua; en este modelo sólo se integran las componentes atmosférica y edáfica, posteriormente, gracias a los estudios de la dinámica de agua dentro de cafetales de Giraldo y Jaramillo (10), Jaramillo y Chaves (18), Ramírez y Jaramillo (28) y Velásquez y Jaramillo (42), fue posible avanzar en modelos más aproximados en la estimación de la humedad del suelo, como los estadísticos desarrollados por Poveda *et al.* (24) y Rueda *et al.* (35).

La exactitud de un modelo micrometeorológico en predecir el comportamiento de la humedad del suelo para un cultivo o una cobertura vegetal determinada, depende de la capacidad de integrar una serie de factores como son: Los factores hidrológicos del suelo, la hidrología dentro del cultivo, las características fisiológicas del cultivo y la demanda evaporativa de la atmosférica. Pereira *et al.* (25), encontraron que es posible

predecir con modelos meteorológicos los cambios de humedad del suelo en el cultivo de café en Brasil, siempre y cuando los parámetros del modelo sean apropiadamente definidos. Por lo tanto, el presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar un modelo agrometeorológico basado en procesos físicos que permita estimar las variaciones de humedad del suelo en cafetales a libre exposición solar y en etapa productiva a nivel diario, a partir de la integración de los factores edáficos, ecofisiológicos, hidrológicos y atmosféricos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Expresión propuesta para estimar la humedad del suelo en cafetales a libre exposición a nivel diario. El punto de partida es el modelo de balance de masas, el cual considera la humedad del suelo del día anterior, la evapotranspiración del cultivo, la escorrentía y la lluvia efectiva (Ecuación <<1>>).

$$\theta_i = \theta_{i-1} - ET_{ci} - Esc_i + Ll_{efectiva,i} \quad \langle\langle 1 \rangle\rangle$$

Donde:

θ_i : Humedad volumétrica del suelo en el día i

θ_{i-1} : Humedad volumétrica del suelo del día anterior

$ET_{c,i}$: Evapotranspiración del cultivo del día i

Esc_i : Escorrentía del día i

$Ll_{efectiva,i}$: Lluvia que llega al suelo luego de pasar por las hojas en el día i

El valor inicial del agua en el suelo (θ_0) se estima a partir de la capacidad de campo, como se describe en la Ecuación <<2>>.

$$\theta_0 = \theta_{C.C} - ET_c - Esc + Ll_{efectiva} \quad \langle\langle 2 \rangle\rangle$$

En donde $\theta_{c.c}$ es la humedad volumétrica del suelo a -33 Kpa, conocida como humedad a capacidad de campo. Luego, la humedad del suelo subsiguiente se puede estimar empleando la Ecuación <<1>>, de tal manera que los límites de la humedad del suelo en el día i son:

$$\theta_r \leq \theta_i \leq \theta_s$$

Donde θ_r es la humedad del suelo residual, y θ_s es la humedad a saturación.

La estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), se obtiene como el producto de la evapotranspiración de referencia ET_0 , el coeficiente del cultivo, K_c (1, 7, 21), y el ajuste a la evapotranspiración ρ en función de la humedad (Ecuación <<4>>).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \times \rho \quad \langle\langle 4 \rangle\rangle$$

Como en la mayoría de las estaciones meteorológicas de la zona cafetera Colombiana se cuenta con información básica de temperatura mínima, máxima, promedio, y de humedad relativa, la ET_0 (Ecuación <<5>>) puede estimarse empleando la expresión propuesta por García y López modificado por Jaramillo (13).

$$ET_0 = 1,22 \times 10^n \left[(1 - 0,01 \times HR) + (0,2 \times T) - 1,80 \right] \quad \langle\langle 5 \rangle\rangle$$

Donde HR es la humedad relativa (%) promedio del día y T es la temperatura (°C) promedio del día, $n = (7,45 \times T / 234,7 + T)$. Este modelo ha sido comparado con lecturas de lisímetro por Ramírez *et al.* (28) y con otros modelos por Giraldo *et al.* (9), en zona cafetera.

En zonas donde sólo se cuenta con información de temperatura media, máxima y

mínima, para estimar ET_o , la FAO recomienda el modelo de Hargreaves, el cual fue modificado por Ramírez *et al.* (30), para la zona cafetera, como se presenta en la Ecuación <<6>>.

$$ET_o = 0,0018(T_{media} + 17,8)(T_{máxima} - T_{mínima})^{0,5} R_a \quad \ll 6 \gg$$

Donde R_a es la radiación astronómica posible de agua evaporable ($mm.día^{-1}$), y se estima en función de la latitud, el día del año, de 365 (22, 27), y la temperatura máxima, mínima y media en grados centígrados.

En los casos en los cuales no se cuenta con información meteorológica, Jaramillo (17) propone funciones para estimar la ET_o en función de la altitud (m).

$$ET_o = 4,37 \exp(-0,0002 \times Altitud)$$

Las expresiones anteriores para estimar ET_o , se aplican en ausencia de lluvia; cuando ocurre un evento de lluvia, entonces se presenta:

Si la lluvia > Evaporación (EV),
 $ET_c = 0$; donde $EV = 1.071 \times ET_o$ (7).

Si la lluvia es $\leq EV$, $ET_c = ET_o \times K_c$

Para el caso donde la lluvia es mayor a la evapotranspiración, parte de la lluvia es retenida en las hojas (interceptación), y ella a su vez, va a regresar a la atmósfera por evaporación, por lo tanto, la energía empleada en la transpiración es baja en un cafetal de alta densidad, lo cual implica que la transpiración tiende a cero.

El K_c se estima a partir de la edad y la densidad de siembra, como lo proponen Ramírez *et al.* (30), y ρ es el ajuste a la evapotranspiración, por humedad del suelo,

de tal manera que se presenta la Ecuación <<7>>.

$$\rho = \frac{\theta_{i-1}}{\theta_s} \quad \ll 7 \gg$$

Donde θ_{i-1} es la humedad del suelo del día anterior, y θ_s es la humedad de saturación. Cuando la estimación de $\rho < 0,35$, la evapotranspiración del cultivo es menor a la demanda atmosférica por falta de agua en el suelo y su valor es el dado por la estimación; en el caso contrario, la estimación de $\rho = 1$.

La estimación de la escorrentía, (Esc). A partir de lo propuesto por Jaramillo y Cháves (18) se presenta en la Ecuación <<8>>.

$$\text{Si lluvia} > 6,0 \text{ mm}; Esc = \frac{5,16}{1 + 16,25 \exp(-0,072 \times LL)} \quad \ll 8 \gg$$

Si lluvia es $\leq 6,0$ mm; $Esc = 0$

La lluvia efectiva, (LL_{efec}). Se obtiene de las expresiones reportadas por Ramírez y Jaramillo (28) y Jaramillo y Cháves (18), Ecuación <<9>>, es decir: .

$$\text{Si lluvia} > 6,0 \text{ mm}; Lle = \frac{69,13}{1 + 12,45 \exp(-0,040 \times LL)} \quad \ll 9 \gg$$

Si lluvia $\leq 6,0$ mm; $Lle = 0$;

Si lluvia > 44 mm; $Lle = \text{Lluvia}$

Validación de la estimación de la humedad del suelo. Durante tres años, se midió la humedad del suelo, en dos localidades, y en cada una de ellas en un lote sembrado con café variedad Colombia, con densidades superiores a 6.000 plantas/ha y a libre exposición solar.

En la localidad 1 (Cenicafé), el lote tenía, en el primer año de medición, cuatro años de edad; la medición de humedad del suelo (valor observado), se realizó con un equipo de dominancia de tiempo real (TDR), a 20 cm de profundidad, semanalmente, durante los años 1997 y 1998 (18).

En la localidad 2 (El Jazmín), el lote tenía seis años de edad y la medición de humedad (valor observado), se hizo a partir de muestras disturbadas de suelo a 20 cm (28), semanalmente, durante enero a agosto del 2004.

Para la estimación de la humedad, de acuerdo con las expresiones descritas anteriormente (valor estimado), en cada una de las localidades, se tomó la información meteorológica registrada a nivel diario, de las estaciones más cercanas.

Con los valores observados y estimados:

1. Se estimó el índice de agregación de Willmott o índice-D empleado por Ritchie *et al.* (34), descrito a continuación, el cual considera la relación entre la suma al cuadrado de la diferencia entre los valores observados (Y_i) y estimados (X_i), con respecto a la suma de las desviaciones de los valores observados y estimados con respecto al promedio de los valores observados.

$$\text{índice} - D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|X_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2}$$

El valor de este índice está entre 0 y 1,0, donde 0 implica que los valores estimados no se acercan a los valores observados, mientras que un valor de 1, indica una relación uno a uno entre valores estimados y observados.

2. Se estimó el error absoluto y relativo medio, con su intervalo, para un coeficiente de confianza del 95%.

3. Se estimó el coeficiente de regresión lineal simple, entre valores observados y valores estimados, con el fin de verificar si la expresión para estimar la humedad del suelo, sobrestima, subestima o es una estimación uno a uno.

Una vez validada la expresión para estimar la humedad del suelo en café a libre exposición, se evaluó el comportamiento de secado y humedecimiento del suelo, con un tipo de suelo determinado y diferentes valores de lluvia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores del índice de Willmott, en las diferentes localidades, e independientemente de ellos, fluctuaron entre 0,85 y 0,89 y el promedio para todos los datos fue de 0,84.

En las Figuras 1, 2 y 3 se ilustra el comportamiento de los valores observados y estimados, en cada una de las localidades. Para la localidad 1 (año 1997), la diferencia absoluta fue de 3,2% de humedad, con un intervalo entre 2,2% y 4,3% de humedad; en esta misma localidad, para el año 1998, fue de 4,4% con un intervalo entre 3,0% y 5,7% de humedad; y para la localidad 2, fue de 6,4% con un intervalo entre 4,0% y 8,8%. En general, la diferencia absoluta fue de 4,1%, con un coeficiente de confianza del 95%, con el parámetro entre 3,3% y 4,8% de humedad (Tabla 1).

Las diferencias relativas, en promedio, fueron del 15,6%, 27,5% y 11,2%, para la localidad 1, años 1997-1998, y localidad 2, respectivamente, con límites superiores para el intervalo de 4,2%, 5,7% y 8,8%, respectivamente.

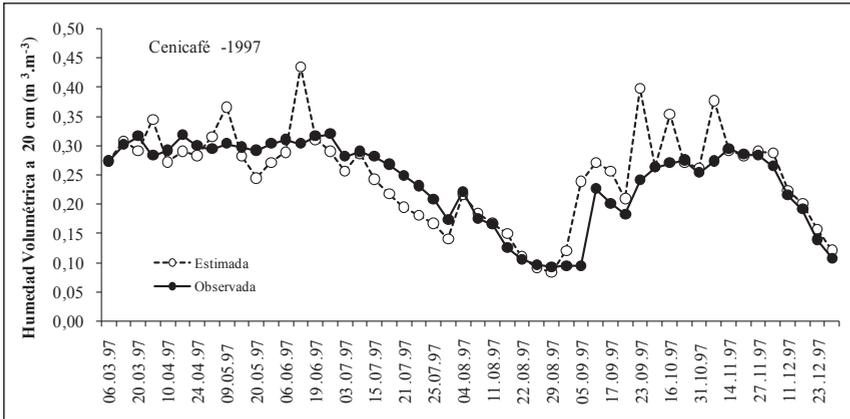


Figura 1. Comparación entre la humedad volumétrica medida y estimada en un cafetal en producción a libre exposición para el año 1997 en Cenicafé.

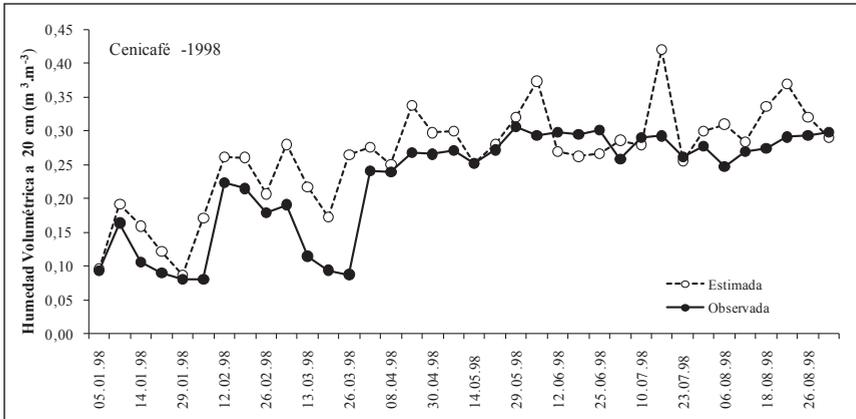


Figura 2. Comparación entre la humedad volumétrica medida y estimada en un cafetal en producción a libre exposición para el año 1998 en Cenicafé.

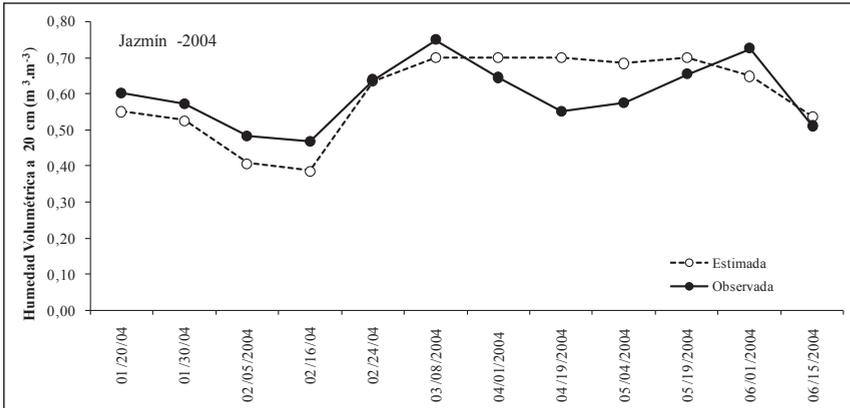


Figura 3. Comparación entre la humedad volumétrica medida y estimada en un cafetal en producción a libre exposición para el año 2004 en El Jazmín.

Tabla 1. Promedios (Media), límites inferior (LI) y superior (LS), para la diferencia absoluta y relativa entre el valor de humedad del suelo observado y el estimado con un coeficiente de confiabilidad del 95%.

Localidad	Diferencia absoluta			Diferencia relativa		
	Med.	LI	LS	Med.	LI	LS
Cenicafé-1997	3,2	2,2	4,3	15,6	8,8	22,5
Cenicafé-1998	4,4	3,0	5,7	27,5	14,3	40,8
Jazmín-2004	6,4	4,0	8,8	11,1	6,6	15,7
Med. general	4,1	3,3	4,8	19,5	13,5	25,4

El coeficiente de regresión, para la relación lineal simple, entre valores observados y estimados, con un estimación de 0,95, es

estadísticamente igual a 1, según prueba de t al 5% (Figura 4), lo cual implica una relación uno a uno entre valores observados y

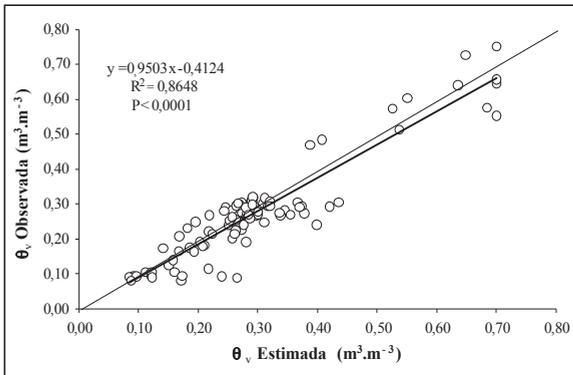


Figura 4. Relación entre la humedad del suelo estimada y la observada en Cenicafé 1997, 1998 y el Jazmín 2004.

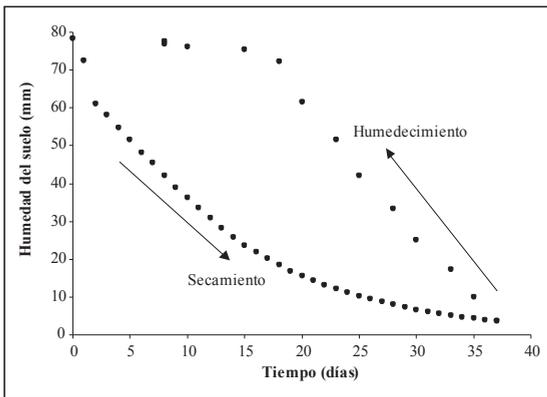


Figura 5. Curva de secado y humedecimiento del suelo para un cafetal en producción estimada con el modelo propuesto.

estimados, es decir, la expresión utilizada para estimar la humedad del suelo en cafetales a libre exposición, ni sobrestima ni subestima la humedad del suelo observada.

Con estos resultados, se considera que la expresión para estimar la humedad del suelo es confiable y puede ser utilizada en la valoración de la disponibilidad hídrica en cafetales, construcción de mapas de riesgo y análisis regionales de disponibilidad hídrica para el cultivo del café.

Con respecto al secado y humedecimiento del suelo, los resultados evidenciaron un comportamiento no lineal (Figura 5), de tal manera que la pérdida de agua en el suelo es un proceso más lento que la ganancia a través del tiempo, es decir, se confirmó el patrón histéresis, lo cual indica la aproximación al fenómeno real.

Se hace necesario desarrollar más investigaciones de campo, con el fin de estimar los parámetros empleados en este modelo en cafetales entre 0 y 4 años, en cafetales de porte alto y en cafetales bajo cobertura arbórea, con el objetivo de tener un modelo que sea aplicable a toda la caficultura de país, además de formular trabajos en donde se puedan desarrollar modelos de escorrentía para zona cafetera, en función de la pendiente del terreno, edad del cultivo, tipo de cobertura vegetal y longitud de la pendiente, al igual que acoplar al modelo funciones para estimar el drenaje.

AGRADECIMIENTOS

A los evaluadores anónimos que contribuyeron con sus sugerencias a mejorar el artículo.

LITERATURA CITADA

- 1.ALLEN, G. R.; PEREIRA. S.L; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). Publication No. 56. Rome. 300p.
- 2.ARCILAP.J.; FARFÁN V.F.; MORENO B.A.; SALAZAR G., L. F.; HINCAPIÉ G. E. Sistemas de producción de café en Colombia. Cenicafé. 309p. 2007
- 3.ARCILA P.J.; JARAMILLO R. A. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del café. Avances Técnicos Cenicafé. N° 311. 2003. 8p.
- 4.BUCHLEITER G. W. Improved irrigation management under center pivots with SCHED. En: Crop-Water-Simulation Models in Practice Edt. L.S.Pereira, B.J.van den Broek, P. Kabat and R.G. Allen:27-48. 1995.
- 5.CAMAYO V., G. C.; ARCILA P., J. Desarrollo floral del café en condiciones de la zona cafetera colombiana (Chinchiná-Caldas). Avances Técnicos Cenicafé. N° 245. 1997. 8p.
- 6.DANUSO F.; GANI F.; GIOVANARDI R. Field water balance: BidriCo 2. En: Crop-Water-Simulation Models in Practice Edt. L.S.Pereira, B.J.van den Broek, P. Kabat and R.G. Allen:49-74. 1995.
- 7.Da SILVA, A.L. 2005. Variabilidade dos componentes do balanço hídrico: um estado de caso em uma cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no Brasil. Tesis de Doctor (Ph.D) en Agronomía/Universidad de Sao Pablo-Escuela Superior de Agricultura Luiz do Queiroz.Brasil.73p.
- 8.FEDDES, R. A.; KABAT, P. J. T.; VAN BAKEL, J. J. B.; BRONSWIJK, Y J. HALBERTSMA. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone - State of the art, Journal of Hydrology. 100, 69-111.1988
- 9.GIRALDO, J.A.; LINCE, L.A.; CUARTAS, A.F.; GONZÁLEZ, H. Evaluación de fórmulas empíricas para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Fitotecnia-Universidad de Caldas. No 141.2p. 2008.
- 10.GIRALDOJ.,J.F.;JARAMILLOR.,A. Ciclo hidrológico y transporte de nutrimentos en cafetales bajo

- diferentes densidades de sombrero de guamo. *Cenicafé* 55(1):52-68.2004.
11. GÓMEZ, M.O. Efecto del estrés hídrico sobre la fotosíntesis en la planta de café (*Coffea arabica* L. c.v. Colombia). Tesis de grado de Ing. Agrónomo. Universidad del Caldas. *Cenicafé* 68p 2000.
 12. GUZMÁN M, O, ; BALDIÓN R., J. V. El clima de la sede principal de centro nacional de investigaciones de café, Chinchina, Caldas. *Cenicafé* 54(2):110-133. 2003.
 13. JARAMILLO, R. A. 1977. Comparación entre la evapotranspiración registrada en tanque y la calculada por diferentes fórmulas. *Cenicafé* 28(2):67-72.
 14. JARAMILLO R. A. Balance hídrico de la zona cafetera Colombiana. *Cenicafé* 33(1):15-28. 1982
 15. JARAMILLO, R. A. 1999. distribución de la lluvia dentro de los cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé* No 262.4p.
 16. JARAMILLO R. A. Clima andino y café en Colombia. Chinchina. *Cenicafé*. 192p. 2005.
 17. JARAMILLO, R. A. 2006. Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé* 57(4):288-298.
 18. JARAMILLO, R. A.; CHAVES, C.B. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé* (Colombia): 50(2):97-105.1999.
 19. KUMAR M.U.; SUNDARA S.K.S.; VICTOR U.S.; RAO N.H. Profile water balance model under irrigated and rainfed systems. *Agronomy Journal* 94(5):1204-1211. 2002
 20. LHOMMÉ J.P.; GÓMEZ L.; JARAMILLO R.A. Modelo matemático del balance hídrico. *Turrialba* 34(4):503-507. 1984.
 21. MARÍN, F.R., ANGELOCCI, L.R., RIGHI, E.Z., SENTELHAS, P.C. 2005. Evapotranspiration and irrigation of a coffee plantation in southern Brazil. *Experimental Agriculture*. 41(2):187-197.
 22. MONTOYA, R. E.C.; ARCILA, P.J.; JARAMILLO, R.A.; RIAÑO, H. N.M.; QUIROGA, Z.F. Modelo para simular la producción potencial del cultivo de café en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafé*. No 33.52p. 2009.
 23. PARKERS M.; BAILEY R.; WILLIAMS, D y LI, Y. An Irrigation scheduling model combining slow mobile water change. En. *Crop-Water-Simulation Models in Practice* Edt. L.S.Pereira, B.J.van den Broek, P. Kabat and R.G. Allen:75-104. 1995.
 24. POVEDA J.G.; RAMÍREZ J.M., JARAMILLO R.A. Un modelo estocástico para la humedad del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en la región cafetera de Colombia. *Avances en recursos hidráulicos* 9:47-56.2002
 25. PEREIRA B.I.; da SILVA A.L.; REICHARD K.; DOURADO-NETO D.; OLIVEIRASANTOS B.O.; VOLPE C.A. Comparison between climatological and field water balances for coffee crop. *Scientia Agricola* (Piracicaba, Braz).64(3):215-220.2007.
 26. RAMÍREZ B. V.H. Avances en la medición de la humedad del suelo *in situ*. *Investigaciones de Unisarc.Bol.* 4(1):27-34. 2006.
 27. RAMÍREZ, B.V.H.; GOYAL, R.M. 2008. Elementos de Agroclimatología. Edit. Por UNISARC (Colombia). 263p.
 28. RAMÍREZ B.V.H.; JARAMILLO, R.A. Distribución de la lluvia en cuatro coberturas vegetales de la zona andina. *Inves.Unisarc.Bol.* 5(1):19-33. 2007.
 29. RAMÍREZ B.V.H.; JARAMILLO R.A.; ARCILA P.J. Rangos adecuados de lluvia para el cultivo de café en Colombia. *Cenicafé*, 2010. *Avances Técnicos Cenicafé* N° 395. 8p.
 30. RAMÍREZ B.V.H.; JARAMILLO R.A.; ARCILA P.J. Índices para evaluar la disponibilidad hídrica en cafetales. *Cenicafé* 61(1): 55-66. 2010.
 31. RAO N. H. Field test of a simple soil water balance model for irrigated areas. *Journal of Hidrology* 91:179-186. 1987.
 32. RAO N. H. Grouping water storage properties of Indian soils for soil water balance model for irrigated areas. *Journal of Hidrology* 91:179-186. 1998.
 33. RAO N. H.; SARMA, P.B.S.; CHANDER, S. Optimal multi crop allocation of seasonal and intra seasonal irrigation. *Water Resources Research*. 26:551-559. 1990.
 34. RITCHIE, J.T.; PORTER, Ch.H.; JONES, J.W.; SULEIMAN, A.A. 2009. Extension of an existing

- model for soil water evaporation and redistribution under high water content conditions. *Soil Science Society of American Journal*. 73(3):792-801.
35. RUEDA F. O. A.; POVEDA J. G.; JARAMILLO, R. A. Modelación probabilística de la humedad del suelo y del estrés hídrico bajo diferentes coberturas vegetales en la región cafetera: Variabilidad estacional y los efectos del ENSO. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. En impresión. 31p. 2009.
36. SAITO T.; FUJIMAKI, H.; YADA H.; INOUE M. Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water. *Soil Science Society of American Journal* 73(6):1931-1937. 2009
37. SHARDA V.N.; SINGH S.R. A finite element model for simulation of soil moisture balance during plant growth. En. *Crop-Water-Simulation Models in Practice* Edt. L.S.Pereira, B.J.van den Broek, P. Kabat and R.G. Allen:199-214. 1995.
38. SMITH R.E. Simulation of crop water balance with *Opus*. En. *Crop-Water-Simulation Models in Practice* Edt. L.S.Pereira, B.J.van den Broek, P. Kabat and R.G. Allen:215-230. 1995.
39. TEIXEIRA J.L.; FERNANDO R.M.; PEREIRA L.S. RELREG: A model for irrigation scheduling. En. *Crop-Water-Simulation Models in Practice* Edt. L.S.Pereira, B.J.van den Broek, P. Kabat and R.G. Allen:3-16. 1995.
40. TROJER, H. El Ambiente climatológico y el cultivo de café en Colombia. *Boletín Informativo del Centro Nacional de Investigaciones de Café* 5(57):22-37. 1954.
41. Van GENUCHTEN, M. Th. A Closed-form equation for predicting the Hydraulic conductivity of Unsaturated Soils. *Soil. Science. Society of American Journal*. 44:892-898. 1980
42. VELÁSQUEZ F. S.; JARAMILLO R. A. Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 60(2):148-160. 2009
43. WALKER W.R.; PRAJAMWONG S.; ALLEN R.G.; MARKLEY G.P. *USU* command area decision support model-CADS. En. *Crop-Water-Simulation Models in Practice* Edt. L.S.Pereira, B.J.van den Broek, P. Kabat and R.G. Allen:231-272. 1995.