



Respuesta productiva del café al manejo del riego. Función agua-rendimiento

Yield response of the coffee to irrigation management. Water-yield function

M.Sc. Enrique Cisneros Zayas, Dr.C. Felicita González Robaina, Dr.C. Roberto Martínez Varona, Dr.C. Teresa López Seijas, Dr.C. Ángel Reynaldo Rey García

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

RESUMEN. La disponibilidad de agua para la agricultura está disminuyendo progresivamente, debido a la competencia entre diferentes usuarios, lo que impone una utilización eficiente de este importante recurso. Para lograr elevar la productividad del agua es imprescindible el estudio de las funciones agua-rendimiento. El presente trabajo tiene como objetivo determinar las distintas formas de expresión de la función agua-rendimiento, así como la productividad del agua (*WP*) para el café. Como resultado se tiene que el modelo lineal fue el de mejor ajuste para las relaciones rendimiento/evapotranspiración y rendimiento/agua aplicada por riego del café, con coeficientes de determinación superiores a 0,70 y una eficiencia del agua evapotranspirada alrededor de 0,75 kg de café oro por cada milímetro adicional de agua. Los resultados del análisis de las funciones usando valores relativos mostraron que si se satisfacen al 100% las necesidades del café durante todo el ciclo del cultivo se puede esperar un rendimiento máximo de 2,78 t·ha⁻¹, y si se logra satisfacer en más del 80% podrían ser superiores a 2,6 t·ha⁻¹. El factor de respuesta del rendimiento *K_y* para el café en las condiciones de este estudio resultó ser de 0,52. Por cada metro cúbico de agua consumida y agua aplicada por riego el café produce como promedio 1,92 y 3,8 kg de café oro, respectivamente. La productividad máxima se obtuvo con 5 399 m³·ha⁻¹ de agua consumida durante todo el año.

Palabras clave: Productividad del agua, déficit hídrico, rendimiento.

ABSTRACT. The water availability for agriculture is diminishing progressively, due to the competition among different users, what imposes an efficient use of this important resource. To be able to increase water productivity it is indispensable the study of the water-yield functions. The present study was aimed at determining the different forms of expression of the water-yield functions, as well as the productivity of the water (*WP*) for coffee. As a result a lineal pattern was obtained for a better adjustment of the relationships yield/evapotranspiration and yield/water irrigation applied during the irrigation of the coffee, with higher coefficients of determination to 0.70 and an efficiency of the water evapotranspiration around 0.75 kg of gold coffee for each additional millimeter of water. The results of the analysis of the functions using relative values showed that if there are satisfied to 100% the needs of the coffee during the whole cycle of the culture can wait a maximum yield of 2,78 t·ha⁻¹, and if it is possible to satisfy in more than 80% the yield could be superior to 2,6 t·ha⁻¹. The factor of response of the coffee yield (*K_y*) under the conditions of this study turned out to be of 0.52. For each cubic meter water consumed and water applied by each irrigation, the coffee produces as average 1.92 and 3.8 kg gold coffee respectively. The maximum productivity was obtained with 5 399 m³·ha⁻¹ of water consumed during all the year.

Keywords: water productivity, hydric deficit, yield.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la agricultura es el mayor consumidor de agua y se estima que utiliza cerca del 70% del agua disponible y de ello más del 95% se consume para el riego de los cultivos agrícolas (Madramootoo y Fyles, 2010).

En la agricultura cubana el riego es un factor potenciador de los

rendimientos ya que la distribución no homogénea de las precipitaciones imponen un periodo poco lluvioso en el año (de noviembre a abril) donde solo ocurre como media el 20% de la precipitación anual y este periodo coincide con el óptimo para el crecimiento y desarrollo de la mayoría de los cultivos agrícolas (Chaterlán, 2012)¹.

¹ CHATERLÁN, Y.: Precisión en la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos. Caso de estudio: cultivos de ajo y cebolla en las condiciones edafoclimáticas del sur de Artemisa, 156pp., Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias), Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, La Habana, Cuba, 2012.

El estudio de las funciones agua rendimiento es una vía estratégica importante para lograr el incremento de la productividad del agua. Según Molden *et al.* (2003) y Dehghanisani *et al.* (2009), en condiciones de déficit hídrico, pueden ser utilizadas en la planificación y distribución del agua disponible entre un grupo de cultivos.

La función agua-rendimiento representa la relación entre el rendimiento y los diversos factores que intervienen en la producción. Teniendo en cuenta el gran número de variables que intervienen en estas relaciones y la complejidad de las mismas, Kiani y Abbasi (2012) proponen expresar el rendimiento exclusivamente en función del agua disponible para el cultivo (W), con tal de que el resto de los factores de producción (meteorológicos, pedológicos, del material vegetal y fitotécnicos) permanezcan fijos.

Para predecir la producción a partir del consumo de agua diversos investigadores utilizaron ecuaciones lineales del tipo $R = a ET \pm b$, relaciones que permiten calcular la eficiencia del agua evapotranspirada así como los requerimientos mínimos de evapotranspiración total antes de que se alcance rendimiento alguno (Ferreira y Gonçalves, 2007; Dehghanisani *et al.*, 2009). Por otra parte, las funciones producción del cultivo contra agua aplicada como riego producen trazados muy diferentes en dependencia de las cantidades de agua aplicadas en los experimentos.

Mientras que el empleo de valores relativos en las funciones de producción permite una cierta transferibilidad en términos de respuesta del cultivo al clima, ya que la ET potencial es una función de ciertas variables climáticas. Esta relación permite estimar el potencial de producción de cada cultivo y resulta al menos un paso más hacia la generalización de esta función. Cada una de las formas de expresión de las funciones de producción nos brinda información útil a cerca de la respuesta del cultivo al agua (González *et al.*, 2011).

El cultivo del café se considera de gran importancia en Cuba, no solo por su influencia en el producto interno bruto, sino por su relevancia social al constituir fuente de sustento de un amplio segmento de la población en las zonas montañosas (Vázquez-Moreno, 2005).

En diferentes trabajos de investigación desarrollados en los últimos 30 años en Cuba, se hace referencia a rendimientos elevados de café por hectárea, pudiéndose destacar los obtenidos por Cortés *et al.* (1996), Ochoa *et al.* (1999) y Cisneros *et al.* (2006), quienes obtuvieron desde 1 hasta 3,6 t·ha⁻¹ de café oro en experimentos ejecutados en las principales zonas cafetaleras del país.

Pocos trabajos en Cuba han estudiado la respuesta del café al riego y no se han publicado expresiones de la función agua-rendimiento para las condiciones de suelo y clima de las diferentes zonas cafetaleras del país.

El objetivo de este trabajo es determinar las distintas formas de expresión de la función agua-rendimiento así como la productividad del agua (WP) del café para las condiciones edafoclimáticas de la región de San Andrés, provincia de Pinar del Río.

MÉTODOS

Para la determinación de la función agua-rendimiento se utilizaron los resultados obtenidos por Cisneros *et al.* (2006), de un experimento sobre manejo del riego en el cultivo del café

durante cuatro años, en áreas de la Empresa Forestal Integral (E.F.I) “La Palma”, en el municipio con el mismo nombre, provincia de Pinar del Río. Ubicada en las coordenadas conforme LAMBERT Cuba Norte de latitud 22°46' N y longitud 82°52' E, a unos 10 km del poblado de San Andrés, formando parte del grupo montañoso cordilleras de Guaniguanico. La altura sobre el nivel medio del mar es de 180 m y la topografía en el área de trabajo es llana con pendiente que van hasta el orden del 1%.

El suelo en que se efectuaron las investigaciones se clasifica como Ferralítico Cuarcítico Amarillo Rojizo Lixiviado según la segunda clasificación genética de los suelos de Cuba (Instituto de Suelo, 1999) que se corresponde con un Alítico Amarillento de Alta Actividad Arcillosa Típico según Hernández *et al.* (2003, citado por Cid *et al.*, 2012).

Los tratamientos fueron sometidos a diferentes manejos de riego y el diseño experimental empleado fue el de bloques al azar con seis (6) tratamientos y (4) cuatro repeticiones, los que consistieron en:

- Riego todo el año a 85% del Limite Superior de Agua disponible en el suelo (LSAD).
- Riego a 85% (LSAD) con suspensión en diciembre.
- Riego a 85% (LSAD) con suspensión en diciembre y enero.
- Riego a 85% (LSAD) con suspensión desde diciembre hasta febrero.
- Riego a 85% (LSAD) con suspensión desde diciembre hasta marzo.
- Sin riego

El momento de riego y el volumen de aplicación fueron controlados por el método gravimétrico mediante la toma de muestra de suelo por capas de 10 cm hasta la profundidad de 60 cm. Para la cuantificación de los balances hídricos por el método de Balance de Masas, se utilizó la ecuación general de balance definida originalmente por Hillel (1972) según la presenta López *et al.* (2001): (ecuación 1):

$$\Delta A = P + I - (DI + DS + Et) \quad (1)$$

donde:

ΔA .- Variación en la lámina almacenada hasta la profundidad considerada para el balance;

P.- Precipitación en mm;

I.- Agua aplicada durante el riego (mm), correspondiente a la dosis de riego aplicada de acuerdo a la frecuencia empleada;

DS.-Escurrimiento superficial, que fue despreciado por ser un área pequeña y relativamente plana, además los ingresos (P+I) no sobrepasaron en ningún momento la lámina correspondiente a la saturación del suelo;

Et - Evapotranspiración del cultivo (mm día⁻¹);

DI- Drenaje interno, determinado como la integral del flujo de drenaje a la profundidad de la zona considerada para el balance (q_z), en un intervalo de tiempo determinado ($\Delta t = t_2 - t_1$).

La **ETc** se obtuvo despejando de la ecuación general de balance hídrico (ecuación 1).

$$ETc = P + I - (DI+DS) - DA \quad (2)$$

Las atenciones culturales se efectuaron según las Instrucciones Técnicas para el cultivo del Café y Cacao.

(DNCC, 1987)². La relación café cereza/café oro para las condiciones de San Andrés es de por cada 28 libras de café cereza se tienen 4,2 libras de café oro. (Factor de conversión igual a 0,15).

Determinación de la función agua rendimiento

Se determinaron las posibles relaciones con ayuda del análisis de correlación y regresión de los valores absolutos del rendimiento con las variables independientes: evapotranspiración (ETc) y agua aplicada por riego (I) y la relación de los valores relativos de evapotranspiración (ETr) con rendimiento (R).

Para la selección del modelo de mejor ajuste se tuvo en cuenta un nivel de confianza del 95% y el grado de dispersión de los valores observados se comprobó a través del estadígrafo error estándar de estimación (ES). La bondad de ajuste se verificó con el coeficiente de determinación, R^2 , que describe la proporción de la varianza que es explicada por el modelo, varía entre 0 y 1, indicando mejores ajustes cuanto más próximo a 1 sea su valor. Se comprobó gráficamente para cada modelo el comportamiento aleatorio de los residuos. Se utilizó la relación entre la disminución relativa del rendimiento ($1-R/R_{max}$) y el déficit relativo de evapotranspiración ($1-ET/ET_{max}$) como función agua rendimiento (Dooroombos y Kassam, 1986, Steduto *et al.*, 2012):

$$\left(1 - \frac{R}{R_{max}}\right) = Ky \left(1 - \frac{ET}{ET_{max}}\right) \quad (3)$$

donde:

R-rendimiento real del cultivo, t ha⁻¹;

ET-evapotranspiración real, mm;

ET_{max} - evapotranspiración máxima obtenida en el mejor tratamiento, mm;

R_{max}-rendimiento máximo obtenido en el mejor tratamiento de un cultivo bien adaptado en excelentes condiciones, cuando $ET=ET_{max}$, t ha⁻¹; **Ky** –factor de sensibilidad del cultivo al déficit hídrico, adimensional.

Según Kipkorir *et al.* (2002) esta función será lineal siempre que se cumpla que la función calculada en base a la evapotranspiración sea lineal. Un factor de sensibilidad superior a 1, indica que el cultivo tendrá grandes pérdidas en el rendimiento cuando no se satisfacen sus requerimientos hídricos, mientras que los valores de Ky inferiores a 1 muestran menor sensibilidad al

déficit. En este estudio la magnitud del déficit hídrico se refiere al déficit acumulado durante todo el ciclo biológico del cultivo.

Para el cálculo de la productividad agronómica del agua (WP) en este trabajo el numerador se expresó en términos de rendimiento del cultivo (kg), mientras que en el denominador se usó la evapotranspiración y el agua utilizada por riego (m³), ambos referidos a una hectárea, según muestran las siguientes ecuaciones (Molden *et al.*, 2003):

$$WP_{ET} \left(\frac{kg}{m^3}\right) = \frac{R(kg)}{ET(m^3)} \quad (a)$$

$$WP_I \left(\frac{kg}{m^3}\right) = \frac{R(kg)}{I(m^3)} \quad (b) \quad (4a \text{ y } b)$$

donde:

WP_{ET} – productividad agronómica del agua evapotranspirada;

WP_I – productividad agronómica del agua utilizada por riego (I).

La organización y clasificación de los datos primarios de productividad del agua del café en las diferentes clases se realizó a través de una tabla de frecuencia. Para eliminar valores extremos, el rango de productividad fue determinado tomando el 5 y el 95 percentil de la distribución de frecuencias de la totalidad de los datos. Se calcularon además los estadígrafos: mínimo, máximo, media, desviación estándar y coeficiente de variación en cada una de las formas de expresión de la productividad del agua en el café.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la mayoría de los cultivos, el riego ha mostrado ser un potenciador de los rendimientos, estudios llevados a cabo en diferentes regiones cafetaleras del mundo, autores como Or (1999), ha destacado los resultados obtenidos en experimentos con riego donde demuestra el incremento del rendimiento al compararlo con áreas sin riego.

En general los rendimientos del cafeto oscilaron entre 2,094 y 2,691 t·ha⁻¹ de café oro a los que les correspondieron valores de agua consumida entre 525,82 y 1157,6 m³, las normas totales de agua aplicada por riego fueron de 3482,7 y 7386,5 m³, todos referidos a una hectárea. El máximo rendimiento se obtuvo con el tratamiento de regar todo el año al 85% del LSAD (Tabla 1).

TABLA 1. Valores máximos observados para el cafeto en la región de San Andrés, Pinar del Río. Variables: rendimiento (café oro), evapotranspiración total, norma de riego total y agua total (riego más lluvia). Promedio de los 4 años estudiados

Tratamientos	(Ciclo anual)			
	Rend. (t·ha ⁻¹)	ET (m ³ ·ha ⁻¹)	Norma Total (m ³ ·ha ⁻¹)	Ingresos Lluvias (m ³ ·ha ⁻¹)
Riego todo el año 85% LSAD	2,691	1157,63	7386,5	5496
Riego a 85% (LSAD) con suspensión en dic.	2,477	1014,50	6589,3	4917
Riego a 85% (LSAD) con suspensión en dic y ene.	2,391	905,63	5766,3	4274
Riego a 85% (LSAD) con suspensión desde dic. hasta feb.	2,342	781,78	4968,5	3677
Riego a 85% (LSAD) con suspensión desde dic. hasta mar.	2,287	550,70	3482,7	2576
Sin riego	2,094	525,82	0	2486

² Dirección nacional de Café y Cacao. *Instrucciones Técnicas para el cultivo del Café y Cacao*. 208pp. Febrero. 1987.

De este modo el café, tradicionalmente cultivado sin riego, obtiene incrementos de rendimiento desde el 8,4 hasta 22,2% cuando se aplica el agua necesaria para satisfacer su demanda hídrica. Durante todo el ciclo la ET total fue mayor que el agua aplicada como riego, y el aporte de la lluvia al

consumo varió entre 38 y 44% en dependencia del año, lo que enfatiza el papel suplementario del riego en las condiciones edafoclimáticas de la región de San Andrés, Pinar del Río. El menor valor de rendimiento coincide con el tratamiento sin riego durante todo el ciclo.

Resultados obtenidos de las funciones agua rendimiento

En la Tabla 2 aparecen resumidas las funciones de producción encontradas para el café, donde se relacionan tanto los valores absolutos del rendimiento (R) con las variables independientes: evapotranspiración (ET) y agua aplicada (I), así como los valores relativos de evapotranspiración (ETr).

Como se observa en la Tabla 2 los modelos lineales son capaces de explicar en más del 70% la variabilidad total del rendimiento del café representado en la misma. En todos los casos, el análisis de varianza mostró que los coeficientes de regresión y el modelo resultaron significativos ($p < 0,05$) y se comprobó gráficamente para cada modelo propuesto el comportamiento aleatorio de los residuos.

TABLA 2. Resumen de las funciones agua rendimiento encontradas para el café

Relación	Ecuación	R ²	Error estándar	significación
R y ET	$R = 0,00075 ET + 1,92$	0,73	0,13	**
R y I	$R = 0,0011 I + 2,1$	0,71	0,11	***
R y ETr	$R = 0,855 ETr + 1,93$	0,82	0,084	***
Pérdida y Déficit	$(1-R/R_{max}) = 0,522 (1-ET/ET_{max})$	0,84	0,024	***

Análisis de las relaciones obtenidas entre rendimiento y evapotranspiración

El estudio de las relaciones entre rendimiento y evapotranspiración se realizó con los años uno, dos y cuatro por presentar mayor similitud en las producciones. La respuesta del café no fue similar en los 4 años de estudio, esto se debe fundamentalmente a las características de alternancia del café unido a una poda de saneamiento en el tercer año que provocó la caída de los rendimientos.

El valor del coeficiente de correlación lineal entre el rendimiento del café y la ET fue alto ($r=0,85$) y el modelo lineal fue el de mejor ajuste para esta relación con un coeficiente de determinación de 0,72 (Figura 1), con un máximo de 1200 mm de agua consumida, donde se obtuvieron alrededor de 2,70 t ha⁻¹ de café oro cuando se regó al 85% de la LSAD. Del modelo lineal propuesto se puede inferir que la eficiencia del agua fue de alrededor de 0,75 kg de café oro por cada milímetro de incremento de agua consumida.

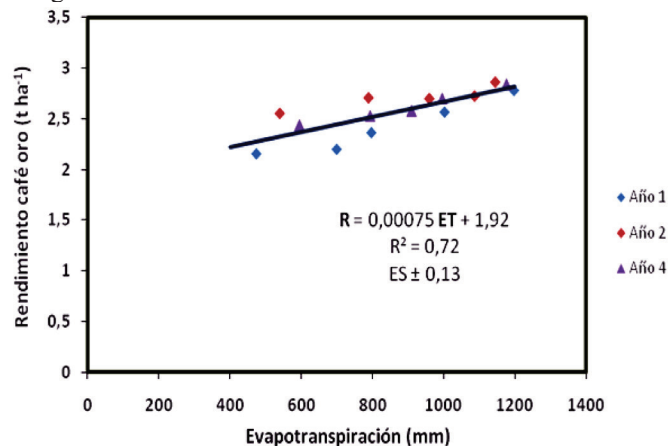


FIGURA 1. Relación entre rendimiento (R) y consumo (ET) para el café. Experimento 1.

La mayor parte de las investigaciones consultadas consideran la relación entre la ET y el rendimiento como una relación lineal, coincidiendo con Stewart y Hagan (1973) en que esto se cumple siempre y cuando la disponibilidad de agua en el suelo sea suficiente para mantener durante la mayor parte del ciclo del cultivo el consumo de agua equivalente a la ET_{max} .

Esta expresión ha sido corroborada por los resultados obtenidos en numerosos experimentos de campo y mediante lisímetros con cultivos anuales muy diversos (Fabeiro *et al.*, 2001; Darwish *et al.*, 2006; Ferreira y Gonçalves, 2007; Dehghanisani *et al.*, 2009).

Análisis de las relaciones rendimiento y agua aplicada

La correlación encontrada entre el rendimiento y el agua aplicada (I) fue de 0,84, y el modelo lineal resultó el de mejor ajuste con un $R^2 = 0,71$ (Figura 2), con un máximo de 700 mm de agua aplicada, donde se obtuvieron alrededor de 2,70 t ha⁻¹ de café oro cuando se regó al 85% del LSAD.

Según Farré y Faci (2006) y Geerts y Raes (2009) esta representación puede ser lineal si los aportes de riego cubren de modo óptimo las necesidades de agua del cultivo, pero en este caso no hay seguridad de que se haya arribado a los valores óptimos de riego.

Otros autores proponen una relación sigmoideal entre el rendimiento y el agua aplicada mediante el riego (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2004; González *et al.*, 2011); lo que para este estudio fue imposible determinar porque los rangos de agua aplicada no llegaron a ser aportes excesivos, condición necesaria para obtener la curva completa.

Silva *et al.* (2008), en un estudio realizado durante 4 años en Brasil con riego por goteo, proponen al polinomios de segundo orden como el modelo de mejor ajuste para la relación entre la producción del café, variedad Rubí, y la lámina de agua aplicada.

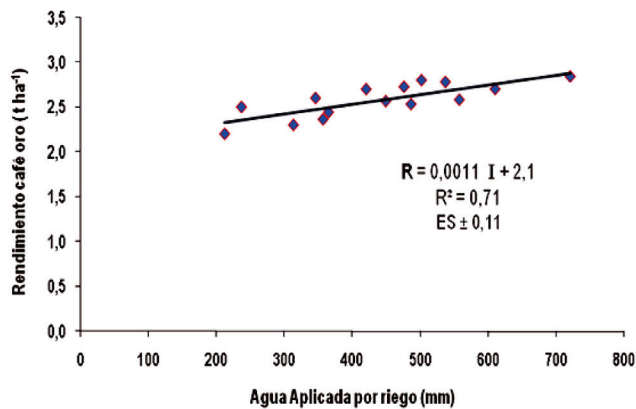


FIGURA 2. Relación rendimiento y Agua Aplicada por riego (I) para el café. Experimento 1.

Análisis de las relaciones rendimiento y evapotranspiración relativa

Cuando la evapotranspiración relativa (ET/ET_{max}) es utilizada como variable independiente en la función agua-rendimiento para el café se obtiene también una relación lineal (Tabla 2) con un coeficiente de determinación de 0,82 (Figura 3).

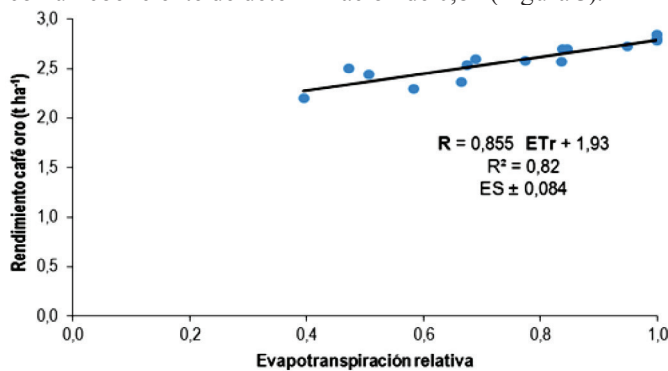


FIGURA 3. Relación obtenida entre el rendimiento del café y la evapotranspiración relativa (ETr) como expresión de la tasa de satisfacción de las necesidades hídricas.

A partir de esta relación se puede inferir que para las condiciones edafoclimáticas estudiadas si se satisfacen al 100% las necesidades del café durante todo el ciclo del cultivo se puede esperar un rendimiento máximo de 2,691 t·ha⁻¹ (café oro). Si se logra satisfacer en más del 80% las necesidades hídricas de este cultivo los rendimientos esperados podrían ser superiores a 2,477 t·ha⁻¹.

Análisis de la relación pérdida relativa de rendimiento y déficit relativo de evapotranspiración

Para estudiar la respuesta del cultivo al déficit hídrico se calculó la relación lineal entre la disminución relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración. La pendiente K_y en esta función de producción fue de 0,52 (Figura 4) con un coeficiente de determinación superior al 80%. Para este estudio K_y resultó inferior a 1, mostrando que el cultivo es más tolerante al déficit hídrico y se recupera parcialmente del estrés, con una

disminución del rendimiento proporcionalmente menor que la disminución del uso del agua debido al estrés; el déficit de agua varió entre 0-0,61.

Este valor de K_y sugiere que para un déficit hídrico planificado de un 25%, se puede esperar una pérdida relativa de rendimiento de un 13%, lo que equivale a un rendimiento máximo esperado de 2,47 t·ha⁻¹. Si el déficit se planifica de un 30% la pérdida relativa de rendimiento podría llegar a ser de un 15,6% y el rendimiento máximo esperado sería de 2,2 t·ha⁻¹.

En el boletín FAO 33 (Doorenbos y Kassam, 1986; Steduto *et al.*, 2012) no se publican valores del factor de sensibilidad para el café, por lo que estos resultados constituyen un aporte y valor de referencia para otros estudios en las condiciones edafoclimáticas de Cuba.

Este valor de K_y ubica al café en el grupo I de cultivos (sorgo, tomate, cebolla, ajo, pimienta, piña, yuca) con menor factor de sensibilidad al déficit hídrico según lo obtenido por González *et al.* (2011a) para las condiciones de suelo y clima de Cuba.

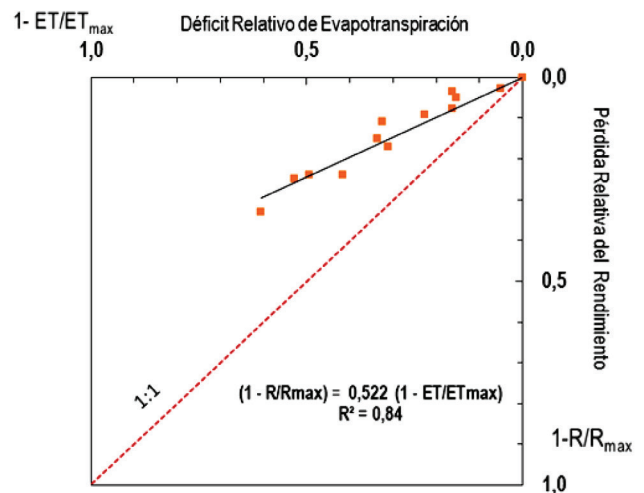


FIGURA 4. Relación entre la pérdida relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración para el café.

Resultados de la productividad del agua consumida (WP_{ET})

Al realizar un análisis de la distribución de frecuencias de los valores de WP_{ET} para el café oro a partir de los datos experimentales de los cuatro años estudiados (ecuación 4a), los resultados obtenidos indican que por cada metro cúbico de agua consumida el café oro produce como promedio 0,29 kg (Tabla 3). El rango de WP_{ET} osciló entre 0,2 y 0,33 kg·m⁻³. El valor máximo de WP_{ET} fue de 0,47 kg·m⁻³ para un consumo de 5399 m³·ha⁻¹. La mayor frecuencia de los datos se encontró entre 0,23 – 0,33 kg·m⁻³.

Resultados de la productividad del agua utilizada por riego (WP_I)

Analizando la distribución de frecuencias de los valores de WP_I para el café a partir de los datos experimentales del rendimiento (café oro) de los cuatro años investigados y utili-

zando la ecuación 4b, se encontró que el intervalo varió entre 0,32 – 1,05 kg·m⁻³ (Tabla 3). La mayor frecuencia de los datos se encontró entre 0,38 – 0,43 kg·m⁻³, por lo que se puede estimar que por cada metro cúbico de agua aplicada el café produce como promedio 0,57 kg de café oro.

TABLA 3. Rango de valores y estadígrafos de la productividad del agua consumida y productividad del agua aplicada por riego para el café

Rango de valores	Frecuencia de los datos de productividad	
	WP _{ET} (kg·m ⁻³)	WP _I (kg·m ⁻³)
0 – 0,18	0	0
0,18 – 0,23	4	0
0,23 – 0,28	6	0
0,28 – 0,33	6	4
0,33 – 0,38	1	4
0,38 – 0,43	1	5
0,43 – 0,48	2	3
0,48 – 0,58	0	3
0,58 – 0,68	0	2
0,68 – 0,78	0	2
0,78 – 0,88	0	0
0,88 – 0,98	0	0
0,98 – 1,08	0	2
Rango de WP^a	0,2 – 0,33	0,32 – 1,05
N	20	20
Mínimo	0,2	0,32
Máximo	0,47	1,08
Media	0,29	0,57
SD	0,08	0,21
CV (%)	27,5	37,2

^a Definido como el 5 y 95 percentiles del rango completo

El máximo valor de productividad calculada en base al agua utilizada (1,08 kg·m⁻³) corresponde al tratamiento con suspensión del riego en diciembre, enero, febrero y marzo y se obtuvo con 2365 m³ ha⁻¹ de agua aplicada mediante el riego (Figura 5); con una productividad del agua superior en un 47% al tratamiento donde se regó todo el año al 85% del LSAD en el suelo. El coeficiente de variación fue el más elevado de los mostrados en la Tabla 3, indicando con ello la mayor variabilidad de la productividad calculada en base al agua aplicada por riego (WP_I), lo que puede ser una consecuencia de la oscilación en cantidad y distribución de las lluvias; elemento este que en años en que se sobrepasa el 75% de la probabilidad puede aportar hasta el 50% del agua requerida por el cultivo para satisfacer sus necesidades.

El valor máximo de productividad no coincide con la máxima producción, lo cual indica que un uso más eficiente del agua en términos de consumo por la planta puede estar en contradicción con los intereses de la producción, donde se persigue el máximo rendimiento por unidad de superficie y el máximo beneficio económico. El riego deficitario usualmente tiene valores más altos de productividad agrícola que los tratamientos bajo riego durante todo el período de desarrollo del cultivo (Zwart *et al.*, 2004).

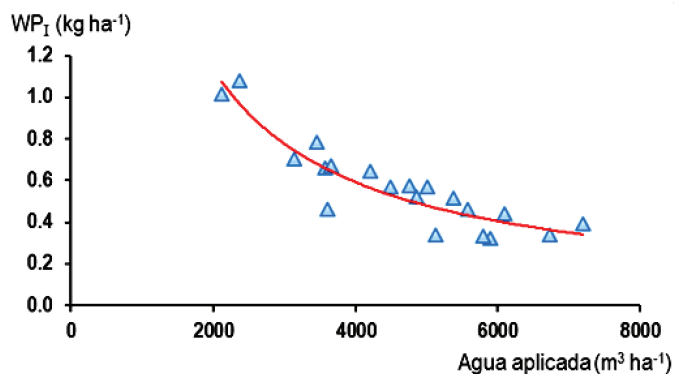


FIGURA 5. Relación entre la productividad del agua total (WP_T) y la cantidad de agua aplicada para el café.

La Figura 5 enfatiza el efecto enmascarador de la lluvia cuando se calcula la productividad del agua aplicada como riego basada en experimentos a campo abierto, así puede observarse en ella las mayores productividades (1,02–1,08 kg m⁻³) con valores de riego que no alcanzarían a satisfacer el 30% de la evapotranspiración del cultivo. Estos valores de productividad en base al agua utilizada como riego no son un buen indicador del uso eficiente del agua por las plantas para las condiciones de la zona de estudio, donde se informan para los años analizados, porcentaje de lluvia aprovechable de hasta el 41,7% como promedio, supliendo ésta una parte importante de las necesidades de los cultivos agrícolas.

Estos resultados sugieren utilizar en el cálculo de este indicador a la productividad del agua consumida o a la productividad del agua total, donde sí está incluida la lluvia aprovechable.

CONCLUSIONES

- La función agua-rendimiento para el café en las condiciones edafoclimáticas estudiadas resultó ser lineal para las relaciones rendimiento-evapotranspiración y rendimiento-agua aplicada por riego.
- Los resultados del análisis de las funciones usando valores relativos mostraron que si se satisfacen al 80% las necesidades hídricas de este cultivo los rendimientos esperados podrían ser superiores a 2,6 t ha⁻¹. Por su parte el factor de respuesta del rendimiento Ky obtenido para este cultivo en las condiciones de estudio fue de 0,52, el cual resulta menos que proporcional al déficit hídrico, factor no publicado en la literatura por lo que constituye un aporte y un valor de referencia para otros estudios en las condiciones edafoclimáticas de Cuba.
- El análisis de la productividad del agua en este cultivo bajo las condiciones de estudio muestra que por cada metro cúbico de agua consumida el café produce como promedio 1,92 kg de café oro y por cada metro cúbico de agua total aplicada por riego el café produce como promedio 0,57 kg de café oro. Se sugiere utilizar en el cálculo de este indicador a la productividad del agua consumida o a la productividad del agua total, donde está incluida los aportes por lluvia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CID, G. L.; LÓPEZ, T. S.; GONZÁLEZ, F. R.; HERRERA, J. P.; RUIZ, M.E.: “Características físicas que definen el comportamiento hidráulico de algunos suelos de Cuba”, *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761, 2 (2): 26-33, 2012.
- CISNEROS, E.; REY, R.; ZAMORA, E.; GONZÁLEZ, F.: “Influencia del manejo del riego en el rendimiento del café”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 15 (2): 42-46, 2006.
- CORTÉS, S.: “Las altas densidades de plantación en el café (*Coffea arabica* L.) variedad Caturra, su influencia sobre el rendimiento y sus componentes”, *Cultivos Tropicales*. ISSN 0258-5936, 17 (2):49-54. 1996.
- DEHGHANISANI, H.; NAKHJAVANI, M.; TAHIRI, A. Z.; ANYOJI, H.: “Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions”, *Irrigation and Drainage*, ISSN 1531-0353, 58: 105-115, 2009.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H.: *Yield response to water*, 193pp., Irrigation and Drainage, Paper 33, Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN 92-5-300744-3. Rome, 1986.
- FARRÉ, I.; FACI, J.M.: “Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment”, *Agricultural Water Management*, ISSN 0378-3774, 83: 135-143, 2006.
- FERREIRA, T.C.; GONÇALVES, D.A.: “Crop-yield/water-use production functions of potatoes (*Solanum tuberosum*, L.) grown under differential nitrogen and irrigation treatments in a hot, dry climate”, *Agricultural Water Management*, ISSN 0378-3774, 90: 45-55, 2007.
- GEERTS, S.; RAES, D.: “Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas”, *Agricultural Water Management*, ISSN 0378-3774, Vol. 96: 1275-1284, 2009.
- GONZÁLEZ, R. F.; HERRERA, P. J.; LÓPEZ, S. T.; CID, L. G.: “Funciones agua rendimiento para 14 cultivos agrícolas en condiciones del sur de La Habana”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 22 (3): 5-11, 2013.
- GONZÁLEZ, R. F.; HERRERA, P. J.; LÓPEZ, S. T.; CID, L. G.: “Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra. Función agua rendimiento”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 20 (1): 40-46, 2011.
- GONZÁLEZ, R. F.; HERRERA, P. J.; LÓPEZ, S. T.; CID, L. G.: “Respuesta de los cultivos al déficit hídrico”, *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761, 1 (1): 19-23, 2011a.
- INSTITUTO DE SUELOS, Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba, AGRINFOR (Ed.), ISBN 959-246-022-1, Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba, 64 pp., 1999.
- KIANI, A. R.; ABBASI, F.: *Optimizing water consumption using crop water production functions*. Crop Production Technologies, Dr. Peeyush Sharma (Ed.), ISBN: 978-953-307-787-1, InTech, 22pp., 2012.
- KIPKORIR, E.C.; RAES, D.; MASSAWA, B.: “Seasonal water production function and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya”, *Agricultural Water Management*, ISSN 0378-3774, 56 (3): 229-240, 2002.
- LÓPEZ, T.; CID, G.; ZAMORA, E.; GONZÁLEZ, F.; MARTÍNEZ, R.: “Caracterización del proceso de redistribución de la humedad del suelo para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos agrícolas”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 10 (2): 81-85, 2001.
- MADRAMOOTOO, CH. A.; FYLES, H.: “Irrigation in the context of today’s global food crisis”, *Irrigation and Drainage*, ISSN 1531-0353, 59: 40–52, 2010.
- MARTIN DE SANTA OLALLA, F.; DOMÍNGUEZ P. A.; LÓPEZ, R.: “Production and quality of the onion crop (*Allium cepa* L.) cultivated under controlled deficit irrigation conditions in a semi-arid climate”, *Agricultural Water Management*, ISSN 0378-3774, 68: 77–89, 2004.
- MARTÍN, D. L.; WATTS, D.G.; GILLEY, J.R.: “Model and production function for irrigation management”, *Journal of Irrigation And Drainage Engineering-ASCE*, ISSN 0733-9437, 110: 149-164, 1984.
- MOLDEN, D.; MURRAY-RUST, H.; SAKTHIVADIVEL, R.; MAKIN, I.: *A water productivity framework for understanding and action*. In: J.W. Kijne, R. Barker, and D. Molden (eds.) *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 1–18, 2003.
- OCHOA, M.: “La fertilización fosfórica del *coffea arabica* L. en suelo ferralítico ojo oscuro. Parte I. Fertilización mineral”. *Cultivos Tropicales*, ISSN 0258-5936, 3 (2): 25-36. 1999.
- OR, U.: “Riego y fertilización de cafetales por goteo: Un cambio conceptual”, *Revista Internacional de Agua y Riego*, ISSN 0334-5807, 19 (2): 1999.
- SILVA, C. A. da; FRANCO, R. E.T; MELO, B.: *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, ISSN 0100-204X, 43 (3): 387-394, 2008.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D.: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*, 510pp., Estudio FAO Riego y Drenaje 66, ISBN 978-92-5-308564-4, ISSN 0254-5284, Rome, 2012.
- STEWART, J. I.; HAGAN, R. M.: “Functions to predict optimal irrigation programs”, *Proc. Am. Soc. Civ. Eng., Journal Irrigation and Drainage Div.*, ISBN 0733-943799: 241-439, 1973.
- VAUX, H.J.; PRUITT, W.O. Crop water production functions. In: *Advances In Irrigation*, 61-79. D. Hillel (ed.) Vol. 2. Academic Press, New York, 1983.
- VÁZQUEZ-MORENO, L.: Experiencia cubana en el manejo agroecológico de plagas en café y avances en la broca del café. Simposio sobre Situación Actual y Perspectivas de la Investigación y Manejo de la Broca del Café en Costa Rica, Cuba, Guatemala y México. J.F. Barrera (ed.). Sociedad Mexicana de Entomología y El Colegio de la Frontera Sur Tapachula Chiapas, México, pp. 46-57, ISBN 970-9712-17-9, 2005.
- ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W.G.M.: “Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize”, *Agricultural Water Management*, ISSN 0378-3774, 69 (2): 115-133, 2004.

Recibido: 19/05/2014.

Aprobado: 23/07/2015.

Publicado: 05/09/2015.

Enrique Cisneros Zayas, Investigador Auxiliar, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba, Correo electrónico: dptoriegol@iagric.cu

Felicita González Robaina, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Correo electrónico: dptoambiente4@iagric.cu

Roberto Martínez Varona, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Correo electrónico: dptoambiente2@iagric.cu

Teresa López Seijas, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Correo electrónico: directoradjunta@iagric.cu

Ángel Reynaldo Rey García, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Correo electrónico: dptoriegol@iagric.cu