

Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvora promedio en invernadero

Reference evapotranspiration, actual
evapotranspiration and crop coefficient for onion
(*Allium cepa*) c.v. Alvara average in greenhouse

Adrián Enrique Chavarría-Vidal¹, Mario Morales-
Sánchez², Freddy Soto-Bravo³

Fecha de recepción: 6 de junio, 2022
Fecha de aprobación: 3 de octubre, 2022

Chavarría-Vidal, A.E; Morales-Sánchez, M; Soto-Bravo, F.
Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real
y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*allium*
cepa) c.V. *Álvora* promedio en invernadero. *Tecnología en*
Marcha. Vol. 36, N° 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 65-77.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6240>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica – Universidad Nacional – Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. Correo electrónico: adchavarría@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1647-8212>
- 2 Profesor jubilado. Costa Rica. Correo electrónico: mario.morales@ucr.ac.cr
- 3 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental. Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Costa Rica. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1959-9597>

Palabras clave

Evapotranspiración de referencia; consumo de agua; evapotranspiración real; cebolla; invernadero; recurso hídrico; coeficiente del cultivo.

Resumen

La necesidad de conocer el consumo de agua que un cultivo tiene en el transcurso de su periodo vegetativo sea este anual o perenne, es fundamental debido al cambio climático en desarrollo el cual manifiesta tanto una baja en la cantidad de agua precipitada en diferentes zonas de nuestro país como una concentración de estas precipitaciones. Además, es necesario ser eficiente y eficaz en el uso del recurso hídrico para riego en la agricultura tanto en ambientes abiertos como protegidos y por medio de ello, procurar el desarrollo sostenible. Para lograr esto, es menester conocer los valores de evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente del cultivo con el fin de estimar y proyectar aplicaciones de agua por medio de sistemas de riego lo más ajustadas a la realidad posible.

Por generaciones se ha utilizado valores del coeficiente del cultivo independientemente del método matemático de estimación de la evapotranspiración de referencia sin conocer si existen diferencias o no en los resultados obtenidos en los consumos de agua estimados. No obstante, por medio de métodos matemáticos de estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando datos de la humedad relativa, temperatura y radiación solar dentro de un invernadero, se encontró diferencia significativa en los valores del coeficiente del cultivo. En las metodologías de Ivanov y Camargo no se encontró diferencia significativa entre ellos pero si se encontró diferencias significativas (0,05) con respecto a las metodologías de Benavidez, Linacre, Hargreaves y Turc; las metodologías de Benavidez y Linacre presentaron diferencias significativa (0,05) tanto entre ellos y como con respecto a las metodologías de Ivanov, Camargo, Hargreaves y Turc; y Hargreaves y Turc no presentaron diferencia significativa entre ellos pero si se encontró diferencias significativas (0,05) con respecto a las metodologías de Ivanov, Camargo, Benavidez y Linacre.

Keywords

Reference evapotranspiration; water consumption; actual evapotranspiration; onion; greenhouse; hidric resource; crop coefficient.

Abstract

The need to know the water consumption of a crop during its vegetative period, be it annual or perennial, is fundamental due to the climate change underway, which manifests both a decrease in the amount of precipitation in different areas of our country and a concentration of this precipitation. In addition, it is necessary to be efficient and effective in the use of water resources for irrigation in agriculture, both in open and protected environments, and thus to strive for sustainable development. To achieve this, it is necessary to know the values of reference evapotranspiration, actual evapotranspiration and crop coefficient in order to estimate and project water applications through irrigation systems as close to reality as possible.

For generations, crop coefficient values of a crop have been used independently of the mathematical method of estimating reference evapotranspiration without knowing whether or not there are differences in the results obtained in the estimated water consumptions. However, by means of mathematical methods for estimating reference evapotranspiration using data on relative humidity, temperature and solar radiation inside a greenhouse, a significant difference

in crop coefficient values was found. The methodologies of Ivanov and Camargo did not show significant differences (0,05) with respect to the methodologies of Benavidez, Linacre, Hargreaves and Turc; the methodologies of Benavidez and Linacre presented significant differences (0,05) both among them and with respect to the methodologies of Ivanov, Camargo, Hargreaves and Turc; and Hargreaves and Turc did not present significant differences among them but significant differences (0,05) were found with respect to the methodologies of Ivanov, Camargo, Benavidez and Linacre.

Introducción

Ante el cambio climático que manifiesta para nuestro país disminución de las precipitaciones anuales en algunas áreas juntamente con concentración de dichas precipitaciones de lo cual, se esperan impactos económicos; se hace menester en la producción agrícola un manejo de recurso hídrico de manera eficiente, eficaz, racional y en armonía con el ambiente. No obstante, el sector agrícola es el segundo mayor consumidor de agua principalmente para la producción de alimentos [1]. Lo anterior nos conlleva a la necesidad de aplicar el agua que realmente necesitan los cultivos sin desperdicio ni falta de dicho recurso y para lograr este objetivo se necesita medir el consumo.

Usualmente para la estimación de los consumos de agua de los siembras se utiliza la evapotranspiración del cultivo (Etc) en los diseños y operación de sistemas de riego, y aplicaciones de la estimación del recurso hídrico en general. Ésta se calcula mediante el producto de la evapotranspiración de referencia (Eto) la cual se estima a través de diferentes ecuaciones o modelos matemáticos y variables ambientales que se multiplica por un coeficiente del cultivo (Kc) normalmente tomado de informaciones teóricas provenientes de diferentes latitudes, suelos, climas, regiones y otros, con respecto a nuestra localidad [2]. Ante esta situación, no se sabe si los resultados obtenidos son correctos. Como tal, se necesita conocer si existe diferencia en los resultados de estimación de los consumos de agua y en el caso de ser positivo, nos indicaría que el procedimiento realizado para dichas estimaciones debe ser corregido.

La evapotranspiración de referencia consiste en una extensa superficie de grama en crecimiento activo, cubriendo totalmente el suelo, con una altura de entre 8 y 15 cm de altura, con índice de área foliar de alrededor de 3, sin restricciones hídricas y con un amplio borde para evitar la advección de calor sensible de áreas adyacentes. La evapotranspiración en estas condiciones depende principalmente de las variables meteorológicas por lo que la Eto es una variable meteorológica que expresa el potencial de evapotranspiración para las condiciones meteorológicas vigentes [3]. Por ello para la estimación de la evapotranspiración potencial se usan principalmente variables ambientales como radiación solar, temperaturas máximas, mínimas, medias y amplitud de estas, humedad del aire, viento, presión atmosférica y otros.

Evapotranspiración del cultivo (Etc) es la que se presenta en el crecimiento y desarrollo de este sin restricciones hídricas, en condiciones óptimas de crecimiento con un borde ampliado para evitar una advección de calor sensible proveniente de áreas adyacentes. Como es el resultado del producto de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente del cultivo, es una estimación de un consumo de agua la cual no necesariamente es ajustada a la realidad del consumo de agua [4].

Evapotranspiración real (Etr) es la que se presenta en las mismas condiciones que la evapotranspiración potencial en un cultivo específico, pero con o sin restricciones hídricas la cual, viene a ser lo que realmente se consume de agua por parte de éste debido a la suma de los dos efectos que son la evaporación y la transpiración [5]. Esta no se estima, sino que se mide por algún método directo o indirecto y en términos de riego eficiente para la producción,

se procede a regresar únicamente lo que se consumió de agua. Para lograr una medida de manera correcta se parte de un suelo que se encuentra a capacidad de campo real donde las plantas se encontrarán siempre en el rango de agua fácilmente disponible [6].

El coeficiente del cultivo depende del tipo, la fase de crecimiento, el estado de crecimiento y las condiciones climáticas predominantes. Representa la evapotranspiración para condiciones de cultivo óptimas de forma de que estos logren su potencial productivo y que estén sometidos a un manejo agronómico apropiado a las condiciones del medio a un manejo del agua que evite el estrés [7]. Además, el K_c debe ser determinado para las condiciones locales en las cuales será utilizado [8].

Metodología

Para el desarrollo de la investigación de la existencia o no de diferencias significativas entre los diferentes k_c provenientes de métodos de estimación de la E_{to} según las variables meteorológicas que se usen, se escogió el cultivo de cebolla. Éste cultivo, es de ciclo corto y alta densidad de siembra que presenta un grosor de suelo como mínimo de 20 cm de profundidad donde las raíces son tiernas, finas, poco ramificadas y bien provistas de pelos absorbentes en tercio medio inferior donde: Usualmente, 15 días antes de la bulbificación la cantidad de raíces se duplica y hasta se triplica en los primeros 20 cm de profundidad, lo cual indica; que es un periodo crítico para el suministro de agua para procurar una buena producción de bulbos. [9]. También se reporta que el cultivo de cebolla tiene su profundidad de raíces efectivas de los 10 cm a los 20 cm [10].

La investigación se llevó a cabo en el cantón de Alvarado, distrito Pacayas, de la provincia de Cartago; específicamente en un invernadero ubicado Patalillo (Barrio Fátima) con una altura de 1600 msnm, precipitación de 2299,8 mm al año en promedio, temperatura promedio de 16,5 °C, brillo solar promedio de 4,3 horas al día y humedad relativa promedio del 88 % [11].

No se sembró en el suelo del invernadero de manera directa debido a que se encontraba protegido con “cover” de color negro y por ello se utilizaron canastas de 35,0 cm de ancho; 55,0 cm de largo y 20,0 cm de alto llenas con suelo franco de origen volcánico (andisol) mezclado con graba fina y arena con origen calcáreo (un tipo de sustrato). En las canastas se logró una altura de suelo total de 20,00 – 23,00 cm para un total máximo de 44,00 l de suelo. El riego se realizó con un sistema por goteo el cual dotó de 7,80 l h⁻¹ a cada canasta que contó con 12 plantas sembradas. Estos 7,80 l h⁻¹ se aplicó por medio de 6 goteros donde cada una de ella corresponde a un gotero de 1,30 l h⁻¹ distribuidas uniformemente en cada una de las canastas. Se sembró el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara para establecer el experimento entre 4,50 y 5,00 meses de periodo del cultivo, para los cuales se contó con 4 tratamientos, a saber 4 diferentes rangos de succión de humedad del suelo (partiendo al inicio cuando se realiza el trasplante del cultivo de cebolla) del punto de capacidad de campo de la siguiente manera:

1. Tratamiento 1, Testigo con 4 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de 5 a 15 centibares
2. Tratamiento 2 con 3 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de 15 a 25 centibares
3. Tratamiento 3 con 4 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de 25 a 35 centibares
4. Tratamiento 4 con 3 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de 35 a 45 centibares

El invernadero tiene 30,00 m de largo y 11, 50 m de ancho para un área total de 345 m². Se establecieron camas por medio de la unión de canastas en la disposición espacial de 4 canastas a lo ancho y 16 canastas a lo largo de cada cama, para un total de 64 canastas por cama. A lo largo del invernadero se establecieron 14 camas donde se presentó un gran total de 896 canastas dentro del invernadero. El número total de plantas fue de 10752 como máximo.

Cada canasta tiene rendijas grandes en las paredes y en el fondo por lo que se necesitó “cover” perforado para no perder el suelo, pero con orificios para el drenaje y la aireación de esta. No obstante, el suelo estuvo en succión según los tratamientos y en estas condiciones no existió drenaje.

Se colocó un tensiómetro mecánico por tratamiento para tener el control del riego bajo succión juntamente con tensiómetros eléctricos en todas las repeticiones de los tratamientos. Se tomaron datos temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa (PAR) con el objetivo de estimar la evapotranspiración potencial por diferentes métodos conforme los datos obtenidos lo permitan.

Existen varias unidades de radiación las cuales se relacionan entre sí y se pueden proporcionar constantes de conversión y fórmulas. La conversión de unidades es relativamente simple el cual es un proceso matemático, sin embargo, cuando se usan estos factores de conversión, contiene error tanto de conversión como de medición donde la incertidumbre asociada con la conversión de unidades de radiación de fuentes de tipo genérico utilizando los factores de conversión es menos del 10%. La conversión de PAR a radiación solar (Rs) utiliza los fotones a diferentes longitudes de onda que tienen diferentes energías, por lo que se debe saber tanto el número de fotones por unidad de longitud de onda en cada longitud de onda y la energía por fotón en cada longitud de onda para calcular la energía total. Este es un proceso complejo que se ha simplificado a la división por una constante conocida. [12].

$$Rs \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{PAR \left(\frac{\mu mol}{m^2 * s} \right)}{4,98} \dots \dots \dots ec 1$$

$$Rs \left(\frac{mm}{d} \right) = 0,0353 * Rs \left(\frac{W}{m^2} \right) \dots \dots \dots ec 2$$

$$PAR \left(\frac{Mj}{m^2 * d} \right) = \frac{PAR \left(\frac{\mu mol}{m^2 * s} \right) * t \left(\frac{s}{d} \right)}{1000000} \dots \dots \dots ec 3$$

[13]

La radiación solar en el tope de la atmósfera por unidad de área y tiempo tiene un valor promedio de 1367 W (m²)⁻¹ la cual se define como la constante solar y tiene una variación alrededor del 1,5% a través del año [14].

La evapotranspiración potencial se estimó por diferentes métodos como se muestran a continuación:

El método de Hargreaves y Samani [15] requiere de menor cantidad de parámetros de entrada para estimar la evapotranspiración potencial permitiendo obtener la evapotranspiración potencial de una manera más simple.

$$Eto = 0,408 * \left[0,0023 * Ra * (Tmed + 17,8) * \sqrt{(Tmax - Tmin)} \right] \dots \dots \dots ec 4$$

donde:

Eto = Evapotranspiración potencial (mm d⁻¹)

Tmax = temperatura máxima diaria del aire (°C)

Tmin = temperatura a mínima diaria del aire (°C)

Tmed = temperatura media diaria del aire (°C)

Ra = radiación en el tope de la atmósfera (MJ (m²*d)⁻¹)

También puede utilizarse la siguiente expresión variando las unidades de Ra [16]:

$$Eto = 0,0023 * Ra * (Tmed + 17,8) * \sqrt{(Tmax - Tmin)} \dots \dots \dots ec 5$$

donde:

Ra = radiación en el tope de la atmósfera (mm d⁻¹)

Cuadro 1. Radiación solar extraterrestre en latitudes de ubicación de Costa Rica en diferentes unidades.

Radiación extraterrestre (Ra) de latitud norte en milímetros equivalentes por día (mm/d)												
Latitud	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
12	12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5
10	13.2	14.2	15.3	15.7	15.3	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9
8	13.6	14.5	15.3	15.6	15.0	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3
6	13.9	14.8	15.4	15.4	14.7	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7

Radiación solar extraterrestre (Ra) de latitud norte en MJ/(m ² *d)												
Latitud	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
12	30.9	33.8	36.5	38	38	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30
10	31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31
8	32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32
6	33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9

Tomado de [17].

Equivalencias de conversión de unidades

$$\# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right) = 0,408 * \# \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * d} \right) \quad \circ \quad \# \left(\frac{\text{mm}}{h} \right) = 0,001469 * \# \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right) \quad \circ \quad \# \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * d} \right) = 2,45 * \# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right)$$

$$\# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right) = 8,64 * \# \left(\frac{l}{s * ha} \right) \quad \circ \quad \# \left(\frac{l}{s * ha} \right) = 0,1157 * \# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right)$$

$$\# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right) = 0,1 * \# \left(\frac{\text{m}^3}{ha * d} \right) \quad \circ \quad \# \left(\frac{\text{m}^3}{ha * d} \right) = 10 * \# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right)$$

$$\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * d} = 0,0864 * \# \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right) \quad \circ \quad \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * h} = 0,0036 * \# \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right)$$

$$\frac{W}{\text{m}^2} = 11,5741 * \# \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * d} \right) \quad \circ \quad \frac{W}{\text{m}^2} = 27,7778 * \# \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * h} \right)$$

$$1 \frac{J}{s} = 1 W$$

El método de Benavidez y López relaciona la evapotranspiración de referencia con la humedad relativa y la temperatura con la siguiente ecuación [18]:

$$E_{to} = 1,21 * 10^{\left(\frac{7,45 * t}{234,7 + t} \right)} * (1 - 0,01 * HR) + 0,21 * t - 2,30 \dots \dots \dots ec 6$$

Donde:

T = temperatura (°C)

HR = Humedad relativa (%)

El método de Camargo fue desarrollada analizando los resultados de la ecuación de Thornthwaite proponiendo una fórmula más simple, pero con la misma eficiencia en la evapotranspiración de referencia en periodos de 10 a 30 días. Este método utiliza la siguiente ecuación para estimar la E_{to} [19]:

$$E_{to} = 0,01 * Q_o * T \dots \dots \dots ec 7$$

donde:

Q_o = radiación solar global extraterrestre según el mes (mm evaporación equivalente día⁻¹)

T = Temperatura media del aire (°C)

ND = Número de días del período considerado

El método de Linacre utiliza la temperatura promedio del día, el porcentaje de humedad relativa, la elevación de la ubicación del estudio y la latitud en grados [20]

$$T_o = \frac{237,7 \left(\frac{17,27 * T_{med}}{237,7 + T_{med}} + \ln \left(\frac{\%HR}{100} \right) \right)}{17,27 - \left(\frac{17,27 * T_{med}}{237,7 + T_{med}} + \ln \left(\frac{\%HR}{100} \right) \right)} \dots \dots \dots ec 8$$

$$E_{to} = \frac{700 * \frac{(T_{med} + 0,006 * Z)}{(100 - L)} + 15 * (T_{med} - T_o)}{80 - T_{med}} \dots \dots \dots ec 9$$

donde:

E_{to} = evapotranspiración (mm d⁻¹)

T_{med} = temperatura promedio (°C)

T_o = temperatura punto de rocío (°C)

Z = altura (msnm)

L = latitud (°)

$\%HR$ = porcentaje de la humedad relativa

El método de Turc para humedad relativa menores al 50% se utiliza la siguiente ecuación [21]:

$$E_{to} = 0,013 * \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) * (R_s * 23,8846 + 50) * \left(1 + \frac{50 - \%HR}{70} \right) \dots \dots \dots ec 10$$

Para humedad relativa mayores al 50% se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{to} = 0,013 * \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) * (R_s * 23,8846 + 50) \dots \dots \dots ec 11$$

donde:

E_{to} = evapotranspiración (mm d⁻¹)

T_{med} = temperatura promedio (°C)

R_s = radiación solar ($\frac{MJ}{m^2 * d}$)

El método de Ivanov utiliza la temperatura media y el porcentaje de humedad relativa para estimar la evapotranspiración potencial [20]:

$$E_{to} = 0,006 * (25 + T_{med})^2 * \left(1 - \frac{\%HR}{100} \right) \dots \dots \dots ec 12$$

donde:

E_{to} = evapotranspiración (mm d⁻¹)

T_{med} = temperatura promedio (°C)

$\%HR$ = porcentaje de humedad relativa

La evapotranspiración real se mide con base en la ecuación del balance hídrico se tiene [22]:

$$Etr = \text{Agua entra} - \text{agua sale} \pm \text{agua en el suelo} \dots \dots \dots \text{ec 13}$$

donde:

Agua que entra: es el agua de lluvia o de riego o de capas superiores que llegan al área de estudio sea de manera superficial o subsuperficial (mm de agua) en un periodo de tiempo.

Agua que sale: es la que se pierde del suelo por percolación o por drenaje natural o por drenaje artificial y también la que sale por evapotranspiración (mm de agua) en un periodo de tiempo.

Agua en el suelo: es la variación del agua que queda en el suelo (mm de agua) en un periodo de tiempo.

Como el sistema experimental se encuentra en un ambiente protegido, el cual tiene un manejo del contenido de agua en el suelo que se suministra por el sistema de riego por goteo bajo un régimen de succión donde no se presentó drenaje y si se presentó la variación del contenido de agua en el suelo donde la ecuación del balance hídrico queda de la siguiente manera:

$$Etr = \text{Agua entra} \pm \text{agua en el suelo} \dots \dots \dots \text{ec 14}$$

$$Etr = I - \Delta S \dots \dots \dots \text{ec 15}$$

donde:

$Etr = T(\text{transpiración}) + E(\text{evaporación})$, es la evapotranspiración real del cultivo (mm) en un periodo de tiempo

I = dosis de riego (mm) en un periodo de tiempo

ΔS = cambio de humedad del suelo (mm) en un periodo de tiempo

Por lo anterior, no se medió diariamente el agua que drena y como tal no se tomó en cuenta en la ecuación del balance hídrico en el suelo de la canasta debido a que no existió porque la humedad del suelo estuvo en succión

La evapotranspiración real se midió en las parcelas del T1 donde se tuvieron las mejoras condiciones de humedad presentes para el cultivo que fue donde se mantuvo una succión de agua en el suelo en el rango de 5 - 15 centibares

Coeficiente del cultivo

Este está definido por la relación matemática que existe entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real:

$$Kc = \frac{Etr}{Eto} \dots \dots \dots \text{ec 16}$$

Etr = evapotranspiración real (mm d⁻¹)

Eto = Evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹)

Kc = coeficiente del cultivo (adimensional)

Resultados

La estimación de la evapotranspiración potencial muestra (cuadro 2) una variabilidad en el consumo del recurso hídrico total del periodo del cultivo. Muestra los métodos de Turc y Hargreaves con los valores más altos y los métodos de Ivanov y de Camargo muestra los valores más bajos.

Cuadro 2. Evapotranspiración potencial del período total del cultivo de cebolla dentro del invernadero para los métodos que utilizan la humedad relativa, temperatura y radiación solar

Metodología	Consumo agua estimado en todo el periodo del cultivo (mm)
Hargreaves y Samani	1007,53
Benavidez y López	539,67
Camargo	504,89
Linacre	822,30
Turc	1097,14
Ivanov	487,33

Del cuadro 3 se puede observar que la evapotranspiración real que se presentó en todo el periodo del cultivo de cebolla es menor a todos los métodos utilizados en la estimación de la evapotranspiración potencial. No obstante, el método que más se acerca es el de Linacre.

Cuadro 3. Evapotranspiración real del período total del cultivo de cebolla sembrado en invernadero mantenido en un rango de presión de succión de 5 a 15 centibares (cb)

Etr = EvapoTranspiración Real	
	EtrT1(mmTot)
R1	451,5610
R2	432,7515
R3	471,7507
R4	453,9293

La evapotranspiración real como se muestra en el cuadro 3 presenta un promedio de 452,5 mm, varianza de 254,51 y un coeficiente de variación del 3,53 % los cuales presentan un comportamiento normal. En contraste con los datos estimados de la evapotranspiración potencial como se muestra en el cuadro 2, presenta un promedio de 743 mm, varianza de 73017 y un coeficiente de variación del 36,36 %. Podemos observar que a pesar de que los métodos utilizan variables meteorológicas semejantes, los resultados presentan variaciones importantes, posiblemente a que cada método fue establecido y calibrado en zonas diferentes en términos físico-atmosférico.

El coeficiente de cultivo promedio de toda la fase productiva de la cebolla (Fig. 1) sembrada en invernadero para los diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración de referencia mostró diferencia altamente significativa (P-value<0,01).

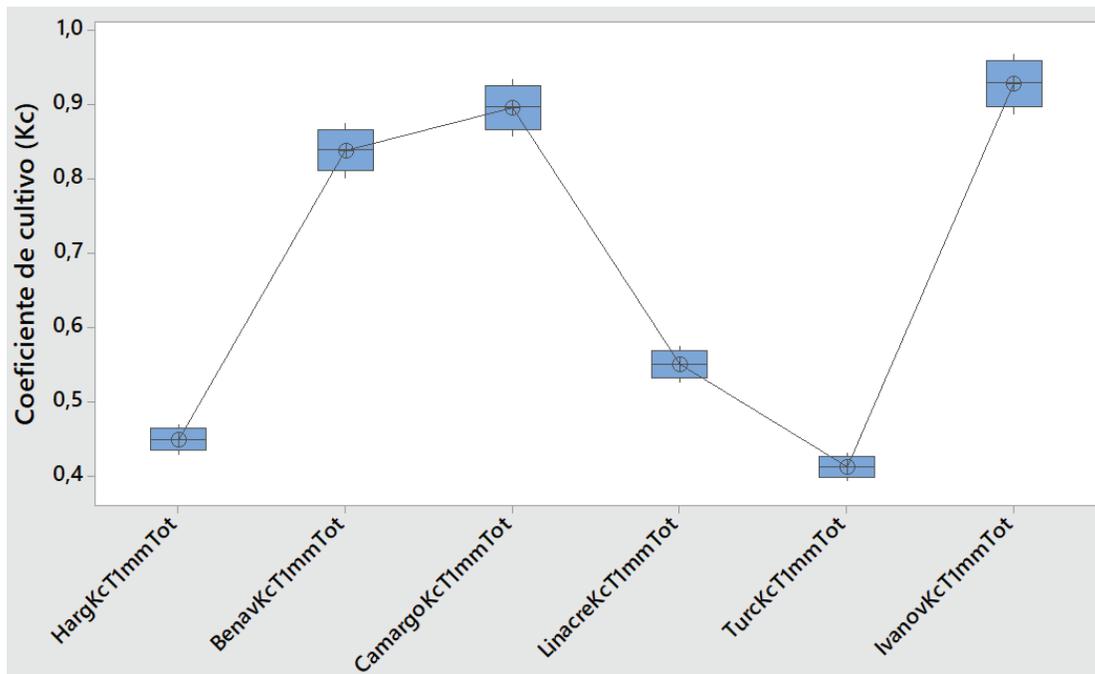


Figura 1. Variación de los diferentes Kc calculados para el cultivo de cebolla en invernadero

Como se muestra en el cuadro 4 con respecto a los valores de Kc y las diferentes ecuaciones para estimar la Eto, los métodos de Ivanov y Camargo no mostraron diferencia significativa entre ellos, pero si mostraron diferencia significativa (P-value <0,05) con respecto a Benavides, Linacre, Hargreaves y Turc. Los métodos de Hargreaves y Turc no mostraron diferencia significativa entre ellos, pero si mostraron diferencia significativa (P-value <0,05) respecto a Ivanov, Camargo, Benavides y Linacre. Los métodos de Benavides y Linacre mostraron diferencia significativa (P-value <0,05) entre ellos y también con los métodos Ivanov, Camargo Hargreaves y Turc.

Cuadro 4. Agrupación de los Kc promedio para el cultivo de cebolla sembrado en invernadero utilizando el método de Tukey al 95% de confianza

Factor	N	Media	95% CI	Grupo
IvanovKcT1mmTot	4	0,9285	(0,9022 - 0,9549)	A
CamargoKcT1mmTot	4	0,8962	(0,8699 - 0,9226)	A
BenavKcT1mmTot	4	0,8385	(0,8121 - 0,8648)	B
LinacreKcT1mmTot	4	0,55028	(0,52391 - 0,57666)	C
HargKcT1mmTot	4	0,44912	(0,42274 - 0,47549)	D
TurcKcT1mmTot	4	0,41244	(0,38606 - 0,43881)	D

Medias con diferentes letras presentan diferencias significativas.

Conclusiones

Existe diferencia significativa en los valores del Kc para el cultivo de cebolla sembrado en invernadero según el método que se utilice para estimar la evapotranspiración de referencia. Esto nos indica que los valores de Kc se deben de medir según el cultivo, las metodologías utilizadas para estimar la evapotranspiración de referencia y de las condiciones ambientales del sistema productivo. No obstante, estas diferencias se presentan a pesar de que las metodologías utilizadas emplean semejantes variables meteorológicas. Sin embargo, existen metodologías que muestran que el valor de la Eto es semejante a la Etc y son aquellas donde el Kc se acerca al valor de uno.

Lo anterior nos muestra que no existe método mejor o peor en la estimación del consumo del recurso hídrico por parte de un cultivo específico, sino que se deben de utilizar los Kc debidamente medidos para los ajustes correctos a la metodología utilizada para estimar la Etc y lograr un uso del recurso hídrico eficiente, eficaz y en términos de desarrollo sostenible con respecto al cambio climático.

Además, también nos indica que no se debiera utilizar indiscriminadamente cualquier valor de Kc encontrado en cuadros de diferente procedencia tanto a nivel geográfico como de condiciones del sistema productivo para estimar los consumos del recurso hídrico por parte de los cultivos en la operación y diseño de sistemas de riego, sino que se deben de utilizar los valores de Kc correspondientes para cada una de las metodologías de estimación de la Eto según sea el caso.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente , Energía y Telecomunicaciones Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*, San José, 2012, p. 1060.
- [2] H. P. Gomes, *Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética*, João Pessoa, Paraíba, 2013, p. 281.
- [3] L. R. Angelocci y P. C. Sentelhas, *Meteorologia Agrícola: Evapotranspiração Definições e Conceitos (Aula # 8)*, Piracicaba, São Paulo, 2012, p. 47.
- [4] Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Engenharia e Biosistemas, *Micrometeorologia de Sistemas Agrícolas: Evapotranspiração*, Piracicaba, São Paulo, S.f., p. 32.
- [5] A. . L. Profeta, *Estimativa da evapotranspiração real em área de relevo acidentado utilizando o SEBAL(Dissertação Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais)*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017, p. 80.
- [6] Universidad Autónoma de San Luis de Potosi. Centro de investigación y estudios de posgrad y área agrogeodésica., *Apuntes de la materia de riego y drenaje*, San Luis de Potosí, 2003, p. 164.
- [7] L. Santos Pereira, *Necessidades de água e de rega das culturas: uso de modelos*, Lisboa, Sf., p. 18.
- [8] O. D. Lopes, M. K. Kobayashi, F. G. Oliveira, I. C. A. Alvarenga, E. R. Martins y C. E. Corsato, «Determinação do coeficiente de cultura (Kc) e eficiência do uso de água do alecrim-pimenta irrigado,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, nº 6, p. 6, 15 marzo 2011.
- [9] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), *Agrometeorología dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola*, Brasília - DF, 2009, p. 530.
- [10] R. Testezlaf, *Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola.*, São Paulo, Sf..
- [11] E. d. J. Montenegro-Hernández, *Cartago*, Cartago, 2018, p. 507.
- [12] R. W. Thimijan y R. D. Heins , «Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion,» *American Society for Horticultural Science: HortScienc*, vol. 18, nº 6, pp. 818 - 820, 12 1983.
- [13] A. Rio, R. N. R. Sibaldelli, L. G. T. Crusiol, J. F. C. Carvalho, L. C. Ferreira, W. Neiverth, S. Procopio, A. Almeida, N. Neumaier, A. Nepomuceno y J. R. B. Farias, *VIII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja: Resumos expandidos*, P. Saiz-Melo, Ed., São Paulo, São Paulo: Embrapa, 2013, p. 217.

- [14] E. Dias de Freitas, *Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, Departamento de Ciências Atmosféricas, Agrometeorologia*, São Paulo: Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP, 2005, p. 153.
- [15] M. G. da Silva, I. d. S. Oliveira, F. F. do Carmo, E. R. F. Lêdo y J. A. da Silva Filho, «ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELA EQUAÇÃO DE HARGREAVES-SAMANI NO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL,» *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, vol. 9, nº 2, pp. 132 -141, 8 6 2015.
- [16] G. Arcanjo Reis y M. Moreira de Souza, *UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS: Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Grande Dourados*, Dourados, Mato Grosso do Sul, 2019, p. 35.
- [17] A. E. Chavarría Vidal, *Apuntes de clases de Relación Suelo Agua Planta*, Cartago, Cartago, 2012, p. 203.
- [18] W. de Oliveira Santos, B. D. de Oliveira Batista, J. pinheiro de Assis, W. Martins Rodrigues y J. Espínola Sobrinho, «Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ETO) para a Região de Mossoró-RN,» *Revista Verde (Mossoró – RN – Brasil)*, vol. 5, nº 5, pp. 210 - 221, 12 2010.
- [19] A. R. Pereira, L. R. Angelocci y P. C. Sentelhas, *Meteorología Agrícola*, 3era ed., Piracicaba, São Paulo, 2000, p. 180.
- [20] P. A. L. de Castro, G. O. Santos y R. G. Diniz, «Models for Estimating Reference Evapotranspiration in Different Periods in Rio Verde, Goiás, Brazil,» *Journal of Agricultural Science*, vol. 11, nº 18, pp. 63 - 75, 2019.
- [21] L. da Costa Santos, G. H. Terra Cruz, F. Freire Capuchinho, J. Vieira José y E. F. dos Reis, «Assessment of empirical methods for estimation of reference evapotranspiration in the Brazilian Savannah,» *Australian Journal of Crop Science*, vol. 13, nº 07, pp. 1094 - 1104, 24 07 2019.
- [22] . S. Martínez y M. Garbi, *Climatología y Fenología Agrícola; Evapotranspiración y balance hidrológico del suelo*, La Plata, 2020, p. 18.