



CONTRASTE EXPERIMENTAL DE MODELOS EMPÍRICOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DEPENDIENTES DE LA TEMPERATURA Y RADIACIÓN SOLAR. RESULTADOS PRELIMINARES

Javier Ezcequiel Colimba-Limaico^{1,3*}; Ángel del Vigo García²; Lilian Marcela Chuquín-Farinango³; Leonor Rodríguez-Sinobas¹

¹ Grupo de Investigación Hidráulica del Riego. Universidad Politécnica de Madrid. Av. Puerta de Hierro 2. Ciudad Universitaria, 28040. Madrid (España).

javier.colimba.limaico@alumnos.upm.es (*Autor de correspondencia)

² Instituto CAI-Lab. Facultad de Tecnología y Ciencia. Universidad Camilo José Cela. Calle Almagro 5, 28010. Madrid (España).

³ MJ Agroconsultores, Velasco Ibarra y González Suárez, 100217, Natabuela, Ecuador.

Resumen

La evapotranspiración tiene una importancia sustancial en el proceso de filtración de agua en el suelo; así mismo es un factor importante que determina la cantidad de agua disponible para los cultivos. En este artículo, se presentan resultados de evapotranspiración recogidos en un invernadero en el sitio de Natabuela, provincia de Imbabura (Ecuador), a través de un tanque evaporímetro. A partir de estos datos experimentales se ha estudiado la validez de cinco modelos empíricos de referencia para el cálculo de la evapotranspiración que dependen, exclusivamente, de la temperatura y radiación solar. Se concluye que existe una buena correlación entre los datos observados y la predicción teórica de estos cinco modelos, siendo el modelo de Irmak, el que mejor ajusta a los datos observados en esta región.

Palabras claves: Evapotranspiración, cubeta de evaporación, ecuaciones empíricas.



Introducción

En el norte de Ecuador, desde hace algunos años está aumentando en gran medida el cultivo y producción de rosas y planta del tomate en invernadero. En particular, en la provincia de Imbabura el cultivo bajo invernadero se ha convertido en una de las actividades agrarias más importantes. Sin embargo, uno de los principales problemas a los que se enfrentan los agricultores es la baja disponibilidad de agua para el riego en invernadero (Colimba *et al.*, 2022). En Ecuador ya existe una importante falta de agua, y se ha estimado que, para el 2035 este déficit llegará al 46,3% de la demanda (SENAGUA, 2019). Por otro lado, tampoco se está haciendo un buen uso de este escaso recurso ya que los agricultores desconocen el requerimiento hídrico de los cultivos en función de los factores ambientales, lo que impide realizar una programación adecuada del riego (Colimba *et al.*, 2022).

La programación de riego determina la cantidad de agua que hay que aplicar a un cultivo y la frecuencia de aplicación de riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo, y así reducir o evitar los efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo. Una buena programación de riego permite ahorrar agua, energía y recursos en mano de obra, así mismo, reduce el estrés hídrico, aumenta el rendimiento y mejora la calidad de las cosechas, lo que redundará en un incremento en la rentabilidad del productor (Catalán *et al.*, 2007).

En trabajos anteriores, se ha presentado un primer estudio basado en simulaciones de flujo de agua en el suelo a partir de un modelo numérico de base física (del Vigo *et al.*, 2020; del Vigo *et al.* 2022) con objeto de optimizar la programación de riego en plantaciones de tomate bajo invernadero en esta zona.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es un parámetro que afecta de forma sustancial al flujo de agua en el suelo y cantidad de agua disponible para los cultivos, por lo que es de gran interés conocer este dato para realizar una correcta programación del riego. La ET_o puede ser estimada a partir de la evaporación de una superficie libre de agua (tanque clase-A) proporcionando un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad y la velocidad del viento. Por otro lado, existen modelos empíricos de evapotranspiración que en base a estos datos climáticos (Allen *et al.*, 2006; Alexandris *et al.*, 2008; Azua-Barrón *et al.*, 2020) permiten estimar la ET_o en una zona determinada. Una adecuada medida de la ET_o en la región de Imbabura puede mejorar la predicción de los modelos físicos de simulación utilizados para optimizar la programación del riego en esta zona.

La utilización del tanque evaporímetro es una metodología ampliamente usada para estimar la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 2006). Para el estudio experimental que se presenta en este artículo se ha dispuesto de un tanque evaporímetro de elaboración artesanal, el cual fue calibrado y validado en estudios previos (Sivisaca, 2013).



Materiales y Métodos

Área de estudio o sitio experimental.

Los experimentos se han realizado en un invernadero metálico con cubierta de plástico, ubicado en el sitio de Natabuela, cantón Antonio Ante y provincia de Imbabura (Ecuador). El invernadero, que es de tipo capilla con cubierta curva, tiene 24,50m de largo, 14,50m de ancho y una superficie total de 355m². Su altura bajo canal es de 3,6m y su zenit de 4,9m. El invernadero cuenta con dos cortinas laterales que sirven para su ventilación y la gestión de temperatura.

El invernadero se encuentra ubicado a una latitud de 0°20'16.67"N, una longitud de 78°12'0.65"O y una altitud de 2445msnm. La zona tiene una precipitación media anual aproximada entre 630 y 1000 mm/año. La temperatura promedio es 8°C (mínima) y 16°C (máxima). En general, la parroquia (sitio) de Natabuela tiene seis meses secos (GAD Natabuela, 2016).

La ETo experimental se ha determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$ET_o = K_p \cdot E_v \quad (1)$$

siendo ET_o la evapotranspiración de referencia (mm/día), K_p un parámetro dependiente del tanque evaporímetro (adimensional) y E_v la evaporación medida en el tanque (mm/día).

La medición de E_v se realizó con una cubeta de evaporación plástica de 20L de capacidad, que fue calibrada con un tanque de evaporación Clase-A (Sivisaca, 2013). La cubeta, que se encuentra en la parte central del invernadero, tiene 0,31m de diámetro y 0,31m de profundidad. La medida de E_v se realizó diariamente a las 7:00 a.m. (hora local). El coeficiente del tanque evaporímetro se consideró igual a la unidad ($K_p = 1$), siguiendo el criterio de Blanco y Folegatti (2003) y Macías (2009). Por lo que la ecuación (1) se puede simplificar del siguiente modo: $ET_o = E_v$

Las ecuaciones empíricas requieren de datos de temperatura y radiación solar. Para medir la temperatura dentro del invernadero se utilizó un higró-termómetro digital (Boeco, BOE 327, Alemania), y para medir la radiación solar se utilizó un medidor de radiación portátil (SM206-SOLAR, China). En total se tomaron mediciones correspondientes a 269 días. La temperatura y la radiación solar se midieron cada hora, desde las 6:00 a.m. hasta las 6:00 p.m. (hora local).

Ecuaciones empíricas contrastadas.

La irradiancia o radiación solar (R_s) se mide en W/m². En el uso de ecuaciones empíricas que describen la evapotranspiración en función de la radiación solar es frecuente

convertir esta magnitud en unidades de evapotranspiración equivalente (mm/día), a través de un factor de conversión que combina el calor latente de vaporización del agua a 20°C ($L_v = 2.45 \text{ MJ/kg}$) y su densidad a esta misma temperatura ($\rho_{agua} = 998 \text{ kg/m}^3$). En este contexto, la constante solar (irradiancia media anual sobre la esfera terrestre fuera de la atmósfera) $I = 1361 \text{ W/m}^2$, se transforma del siguiente modo:

$$\frac{I}{L_v \rho_v} = 5.55 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} = 47.95 \text{ mm/día} \quad (2)$$

Lo que supone una evaporación máxima en condiciones de irradiancia (I) para un trozo de terreno que estuviera sometido a estas condiciones de radiación durante 24 horas. En la práctica, la evaporación es muy inferior ya que la radiación solar está fuertemente atenuada por la atmosfera, en función de las condiciones climatológicas, y también, dependiendo del ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre la atmosfera; esto último, depende de la latitud y hora del día en función de la rotación terrestre. Teniendo en cuenta, además, que una gran parte de las horas del día no hay radiación ya que es de noche. Por lo tanto, se puede considerar el siguiente factor de conversión entre unidades de radiación solar y radiación equivalente a evapotranspiración: $1 \text{ W/m}^2 \approx 0.0352 \text{ mm/día}^*$.

El cuadro 1 resume los modelos empíricos que se han comparado con los valores de evapotranspiración obtenidos experimentalmente. Los valores de temperatura media, mínima y máxima, respectivamente (T_m, T_{min}, T_{max}), están expresados en las siguientes ecuaciones en °C, mientras que la evapotranspiración, así como, la radiación solar equivalente (ET_o, R_s) se han dado en mm/día para todos estos modelos:

Cuadro 1. Modelos empíricos contrastados en este artículo. En la segunda columna se cita la referencia en la que se ha consultado el modelo.

	Ecuación empírica	Referencia
Jensen-Haise (1963)	$ET_o = R_s(0.0252T_m + 0.078)$	Jensen y Haise, 1963
Stephens (1965)	$ET_o = R_s(0.0158T_m + 0.09)$	Azua-Barron <i>et al</i> , 2020
Hargreaves y Samani (1985)	$ET_o = R_s \cdot 0.0023 \cdot (T_{max} - T_{min})^{1/2} \cdot (T_m + 17.8)$	Alexandris <i>et al</i> , 2008
Abtew (1996)	$ET_o = 0.01786 \cdot R_s \cdot T_{max}$	Azua-Barron <i>et al</i> , 2020
Irmak (2003)	$ET_o = -0.611 + 0.149 \cdot (2.451) \cdot R_s + 0.079 \cdot \frac{T_{max} - T_{min}}{2}$	Irmak <i>et al</i> , 2003

Resultados y Discusión

La figura 1 representa el ajuste obtenido entre los datos experimentales ($n = 268$) y cada uno de los cinco modelos empíricos contrastados siguiendo el esquema:

$$Y = mX \quad (3)$$

*Se debe recalcar que esta relación es de equivalencia, y no de igualdad, ya que se trata de dos magnitudes de distinta dimensión.

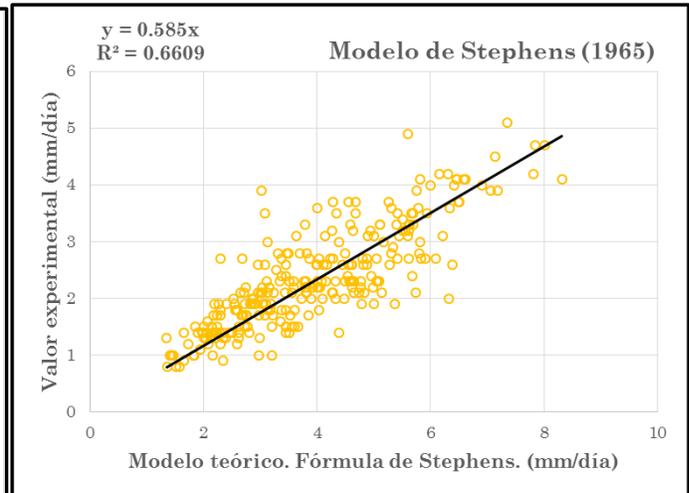
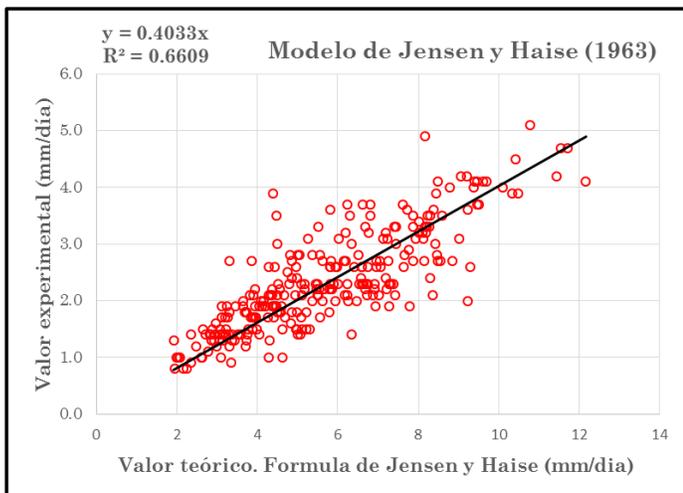
Tal que, Y es el valor experimental obtenido en tanque evaporímetro para la ET_o (mm/día), y siendo X la predicción que arrojan cada uno de los cinco modelos para la ET_o (mm/día) en función de las variables (temperatura y radiación) medidas en cada caso.

El cuadro 2 resume los resultados obtenidos y la bondad del ajuste en función del coeficiente de correlación de Pearson. Se observa un ajuste aceptable en cada uno de los cinco casos con un coeficiente de correlación en torno a $r \cong 0.80$ para todos ellos.

Cuadro 2. Resumen de los resultados. Coeficiente de correlación entre los modelos empíricos y los datos experimentales.

	Jensen y Haise (1963)	Stephens (1965)	Hargreaves y Samani (1985)	Abtew (1996)	Irmak (2003)
Línea de tendencia	$y = 0.40x$	$y = 0.58x$	$y = 0.62x$	$y = 0.46x$	$y = 0.65x$
Coef. Correlación (r)	0.8130	0.8130	0.7911	0.8063	0.8084

Los valores más altos del coeficiente de correlación se han obtenido para los dos modelos más antiguos, que son el de Jensen y Haise (1963) y el de Stephens (1965), tal que $r \cong 0.81$ en ambos casos. Sin embargo, la diferencia de este parámetro respecto al calculado para los otros tres modelos es tan pequeña que, no se puede concluir que las ecuaciones de Jensen-Haise y Stephens puedan realizar predicciones significativamente mejores que la de cualquiera de los otros tres modelos empíricos.



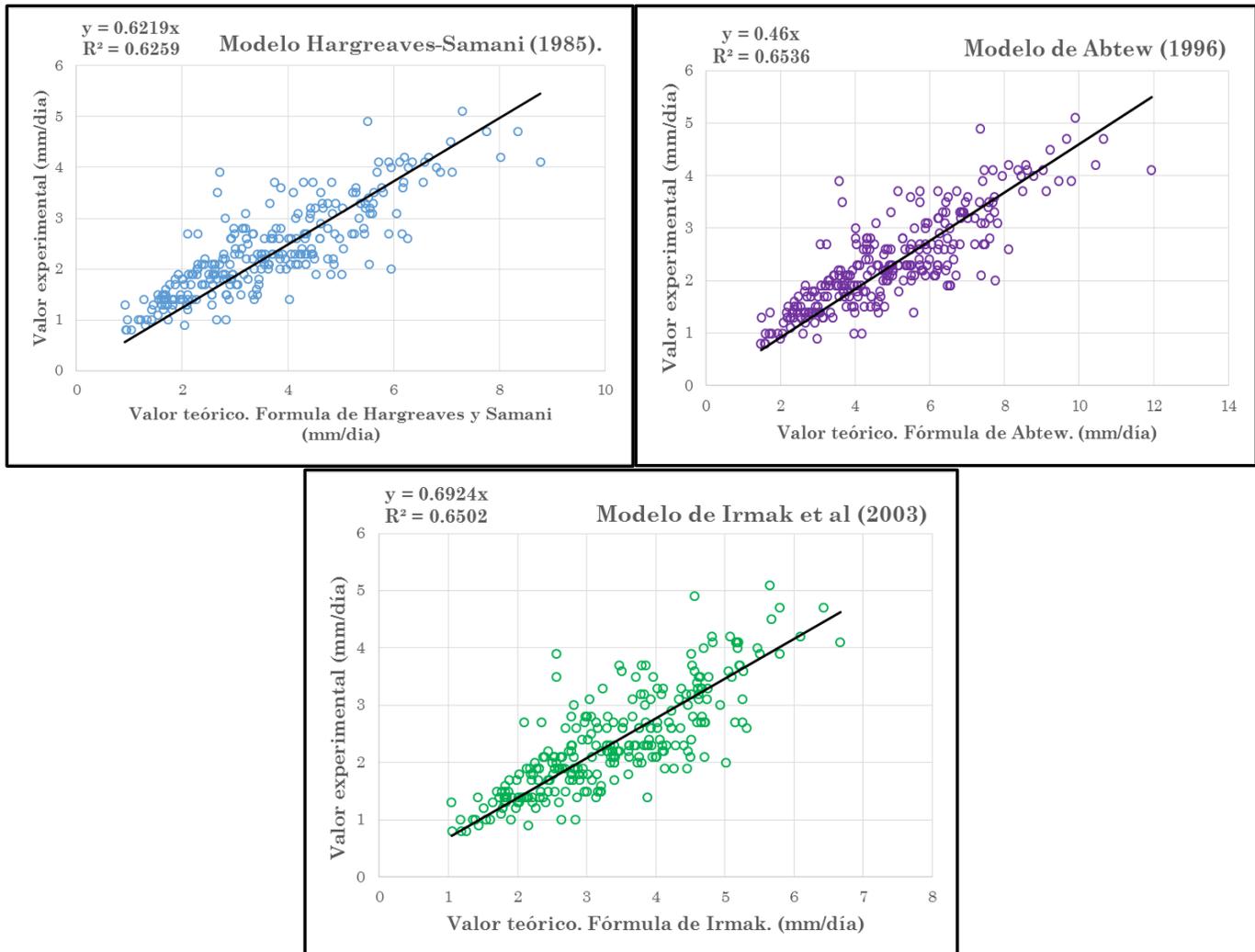


Figura 1. Contraste experimental de los cinco modelos empíricos. Se representa, en el eje-Y, el valor experimental para la ETo (mm/día), y en el eje-X, la predicción empírica de la ETo (mm/día) para cada uno de los cinco modelos empíricos contrastados.

Por otro lado, la evaporación máxima que se ha medido experimentalmente por cubeta de evaporación fue de 5.1mm/día. Se observa que los modelos de Jensen-Haise (1963) y Abtew (1996) predicen valores para la evapotranspiración que en algunos casos supera los 10mm/día, lo que supone una tasa de evaporación que es el doble de la evaporación máxima medida en las 268 observaciones experimentales.

Por lo que, en base a este criterio, parece razonable rechazar el uso de estos dos modelos frente al resto ya que sobrestiman el valor de la evapotranspiración medida en esta zona. Teniendo en cuenta además que, la predicción para la evaporación máxima del modelo de Irmak (2003) no llega a 7mm/día, mientras que las de los modelos de Stephens (1965) y Hargreaves-Samani (1985) superan ampliamente los 8mm/día, puede parecer razonable proponer el uso de la ecuación de Irmak (2003) para la predicción de la evapotranspiración en esta región de Ecuador por encima del resto de los modelos.



Conclusiones

Se concluye de los resultados obtenidos de este estudio preliminar para el coeficiente de correlación de Pearson que cualquiera de las cinco ecuaciones empíricas analizadas puede predecir razonablemente la evapotranspiración en esta región del norte de Ecuador. Sin embargo, todos estos modelos sobrestiman la ETo en los días de máxima evaporación frente a la evaporación máxima que se ha medido experimentalmente. En este sentido, se concluye que el modelo de Irmak (2003) que es el que predice valores más bajos para la ETo en los días de máxima evaporación es el más adecuado para la descripción de esta variable en el norte de Ecuador. A pesar de ello, este modelo marca un valor máximo para la ETo durante este periodo que es un 30.7% superior al valor máximo obtenido experimentalmente.

Consecuentemente, puede ser de utilidad ajustar alguna de las ecuaciones utilizadas, o incluso proponer una ecuación nueva que relacione la temperatura y radiación térmica con la ETo obtenida experimentalmente y que se ajuste mejor a los valores observados para este parámetro en la zona, sobretudo en circunstancias de máxima evaporación. Una línea futura de investigación sería integrar estas ecuaciones, o una nueva ecuación empírica obtenida para la evapotranspiración, al modelo numérico de simulación antes mencionado (del Vigo *et al.*, 2022) con el fin de mejorar la precisión en las simulaciones de este modelo que es de utilidad potencial para el diseño y programación de los riegos.

Referencias Bibliográficas

- Abtew, W. (1996). Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 32(3), 465-473.
- Allen, R. G. Pereira, L.S.; Raes, D., Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Vol. 56). Food & Agriculture Org. 56, 280.
- Alexandris, S., Stricevic, R., & Petkovic, S. (2008). Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, 21(22), 17-28.
- Azua-Barron, M., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Quevedo-Nolasco, A. (2020). Calibration and evaluation of mathematical models to calculate reference evapotranspiration in greenhouses. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 125-137.
- Blanco, F. y Folegatti, M. (2003). Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. *Rev. Bras. De Eng. Agrícola e Ambient.*, 7, 285–291.



- Catalán, V., Sánchez, C., Villa, C., Inzunza, I., Mendoza, M. (2007). Programa para Calcular las Demandas de Agua y Calendarizar el Riego de los Cultivos. Folleto Técnico 7. CENID-RASPA. INIFAP. Gómez Palacio, Dgo. Méx. 44 p.
- Colimba-Limaico, J. E., Zobelzu-Minguez, S., Rodríguez-Sinobas, L. (2022). Optimal Irrigation Scheduling for Greenhouse Tomato Crop (*Solanum Lycopersicum* L.) in Ecuador. *Agronomy*, 12(5), 1020. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051020>.
- del Vigo, Á., Zobelzu, S., & Juana, L. (2020). Numerical routine for soil water dynamics from trickle irrigation. *Applied Mathematical Modelling*, 83, 371-385. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.01.058>.
- del Vigo, Á. (2020). Simulación del flujo del agua en el suelo en riego por goteo superficial, soluciones analíticas aproximadas, caracterización del suelo y diseño de los riegos. Doctoral dissertation, Phd. Thesis, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.63840>.
- del Vigo, Á., Colimba, J., Juana, L., Rodríguez-Sinobas, L. (2022). Numerical model for the simulation of soil water flow under root absorption conditions. Application to tomato plant crop. *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00806-x>.
- Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de San Francisco de Natabuela. (2016). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Natabuela, Ecuador.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., & Jones, J. W. (2003). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(5), 336-347.
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89(4), 15-41.
- Macías, R. (2009). Estimación de la evapotranspiración del cultivo y requerimientos hídricos del tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. Cv. El Cid) en invernadero. (Tesis de Maestría), Instituto Politécnico Nacional, Jiquilpan, México.
- SENAGUA (Secretaría del Agua). (2019). Plan Nacional de Riego y Drenaje 2019–2027; SENAGUA: Quito, Ecuador. pp. 1–160.
- Sivisaca, J. (2013). Efecto de tres frecuencias de riego por goteo en la producción del cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.), según la evaporación del tanque



evaporímetro Clase A. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador.

Stephens, J. C. (1965). Discussion of “Estimating evaporation from insolation”. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(5), 171-182.