

Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco

Calculation methods of the reference evapotranspiration for the Tumbaco Valley

Randon Ortiz C.^{1*}, Maritza Chile A.¹

¹ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Av. La Gasca s/n. Ciudadela Universitaria. 17052. Quito, Ecuador.

✉ Autor para correspondencia: rsortiz@uce.edu.ec

Resumen

La estimación precisa de la evapotranspiración de referencia permite obtener valores más reales sobre las necesidades hídricas de los cultivos. El objetivo del estudio consistió en evaluar nueve métodos a fin de estimar la evapotranspiración de referencia para las condiciones ambientales del Valle de Tumbaco, ubicado en la provincia de Pichincha (Ecuador). Se utilizó información climatológica mensual de la estación La Tola para determinar ET_0 . Los métodos analizados fueron: FAO56, Tanque evaporímetro, Thornthwaite modificado, Hargreaves, Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Turc y FAO Radiación. Se calcularon los siguientes parámetros inferenciales para el análisis de los resultados, tomando como base FAO56: error medio absoluto, coeficiente de determinación, coeficiente de concordancia y coeficiente de confiabilidad. Los resultados principales fueron: i) el método FAO Radiación presentó una precisión *buena*; ii) los métodos Jensen and Haise, Makkink y Priestley and Taylor, presentaron índices *tolerables*; iii) los métodos del tanque evaporímetro, Thornthwaite modificado, Hargreaves y Turc proporcionaron índices inferenciales *muy pobres*. En conclusión, el método que debe utilizarse para determinar ET_0 mensual para el entorno agroecológico del Valle de Tumbaco es FAO56.

Palabras clave: Penman-Monteith, necesidades hídricas de los cultivos, balance hídrico, Ecuador

Abstract

The precise determination of the reference evapotranspiration ensures computing real values of the crop water requirements. The objective of the study was to evaluate nine methods to determine the reference evapotranspiration for the environmental conditions of the Tumbaco Valley located in the province of Pichincha (Ecuador). Monthly climatological data from La Tola station was used to estimate ET_0 . The methods used to determine ET_0 were FAO56, Class A pan, modified Thornthwaite, Hargreaves, Jensen - Haise, Makkink, Priestley - Taylor, Turc and FAO Radiation. The following inferential parameters were used in the analysis, considering FAO56 as base: the absolute mean error, the coefficient of determination, the concordance coefficient and the confident coefficient. The results for monthly average climatological data showed that: i) the FAO Radiation method presented good statistical indexes; ii) the methods Jensen and Haise, Makkink and Priestley - Taylor presented poor indexes; iii) the methods Class A pan, modified Thornthwaite, Hargreaves and Turc presented the lowest inferential values. In conclusion, the method that should be used to estimate monthly ET_0 for the agro ecological environment of the Tumbaco Valley with good accuracy is FAO56.

Keywords: Penman-Monteith, irrigation requirements, water budget, Ecuador

1. Introducción

La evapotranspiración de referencia (ET_0) es un parámetro muy importante en el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos; este parámetro constituye la columna vertebral del diseño agronómico de todo sistema de riego, a través del cual se dimensionan redes de canales, redes de tuberías, reservorios; además, facilita la planificación de la operación de un sistema de riego (calendario y turnos de riego), y permite planificar la gestión de los recursos hídricos en una cuenca. Una sobreestimación de ET_0 producirá diseños de obras sobredimensionadas con costos elevados (construcción y mantenimiento), y una subestimación, en cambio, diseños de obras muy pequeñas, las cuales no permitirán cubrir la demanda de agua de los cultivos. Con relación al manejo del agua de riego, una sobreestimación de ET_0 en 1,0 mm, influirá en el incremento del volumen utilizado de agua en $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en cada riego, encareciendo los costos de producción y generando condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades fungosas, de tal manera que, para optimizar el uso del agua de riego se requiere estimar ET_0 con precisión.

A pesar de la variabilidad temporal y espacial del clima, se han implementado diferentes metodologías para determinar la ET_0 , las cuales se han desarrollado empíricamente a través de experimentos de campo y con base en aproximaciones teóricas (Landon, 2004), entre éstas se pueden mencionar: el tanque evaporímetro y fórmulas empíricas; dentro de las fórmulas se tiene: modelo físico completo (Penman-Monteith); basados en la temperatura (Thornthwaite y Turc); basados en la temperatura y en la radiación solar (Hargreaves, Jensen and Haise, Makkink, Priestley and Taylor y FAO Radiación), entre otros métodos (Allen *et al.*, 1990; Bhabrahi *et al.*, 2012). El método más completo para estimar ET_0 es Penman-Monteith FAO56 (Allen *et al.*, 2006), el cual únicamente puede utilizarse en sitios en donde existe la suficiente información climatológica que demanda este método, en tanto que los otros métodos pueden utilizarse en zonas con muy poca información climatológica, previo a calibraciones locales.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) recomienda utilizar el método estándar Penman-Monteith, descrito en la publicación No. 56, para determinar

ET_0 , debido a que este método se ajusta tanto a zonas áridas como templadas y tropicales (Allen *et al.*, 2006). Este método determina ET_0 con base en tres componentes: i) resistencia aerodinámica (demanda evaporativa de la atmósfera estimada en función de las variables climatológicas: temperatura promedio, máxima y mínima, humedad relativa, horas de luz solar, viento, altitud y latitud); ii) resistencia superficial del cultivo (flujo del agua por difusión desde las raíces hasta los estomas de la planta y de la evaporación directa del agua desde el suelo), y iii) albedo (radiación solar reflejada por el cultivo); para el cultivo de referencia (pasto) de una altura de 0,12 m, bien regado y con una cobertura total de la superficie del suelo, la resistencia superficial estimada es de 70 s m^{-1} y la radiación solar reflejada o albedo de 0,23 (Allen *et al.*, 2006).

El tanque evaporímetro Clase A proporciona una medida integrada del efecto de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo que ocurre en una superficie libre de agua, a pesar de que existen varios factores que difieren entre la evaporación y la transpiración, como: reflexión de la radiación solar, almacenamiento de calor en el agua contenida en el tanque, turbulencia alrededor del tanque, transferencia de calor a través de las paredes del tanque y localización (variables que influyen en el balance energético); el tanque evaporímetro puede utilizarse para estimar la ET_0 en forma confiable cuando las lecturas de la lámina de agua se realizan correctamente. La ET_0 se determina a través de la utilización de un coeficiente empírico derivado de las condiciones físicas y ambientales que rodean al tanque, el cual varía entre 0.40 y 0.85 (Allen *et al.*, 2006; Doorenbos & Pruitt, 1977). El método de Thornthwaite fue desarrollado para el territorio de los Estados Unidos con base en el índice de calor anual a partir de la temperatura promedio mensual (Thornthwaite, 1948), este método fue modificado por Camargo *et al.* (1999). El método Hargreaves fue diseñado para condiciones ambientales de California (Hargreaves & Samani, 1985). El método Makkink es una modificación de la ecuación de Penman, después de haber comparado los resultados proporcionados por el método Penman con valores obtenidos a través de lisímetros para condiciones ambientales de Holanda (Allen *et al.*, 1990; Landon, 2004). El método Priestley and Taylor es una versión reducida de la ecuación combinada original de Penman y adaptada para zonas

húmedas como el estado de Victoria en Australia (Priestley & Taylor, 1972). La fórmula de Turc fue desarrollada para el clima del oeste de Europa (Landon, 2004). El método FAO Radiación es una modificación de la fórmula de Makkink, sugerido para utilizarse en zonas donde al menos exista la información de la temperatura del aire (Doorenbos & Pruitt, 1977).

En Ecuador, muchos estudios de balance hídrico se han realizado con ET_0 calculada a través del método de Thornthwaite modificado, tal es así que, el Plan Nacional de la gestión integrada de los recursos hídricos de las cuencas y microcuencas hidrográficas del Ecuador se realizó utilizando la ET_0 calculada con este método, considerando que el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología determinó que este método y Penman-Monteith presentaron la misma tendencia para las condiciones ambientales del Ecuador (CISPDR, 2016).

A pesar de que en el Centro Académico Docente Experimental La Tola (CADET) se producen cultivos con fines comerciales y se desarrollan proyectos de investigación de diverso tipo, no se cuenta con una metodología adaptada a la zona que permita

determinar ET_0 con precisión para calcular las necesidades hídricas y programar la aplicación del agua de riego a los cultivos, cualquiera que sea su método de aplicación.

El objetivo del estudio consistió en evaluar nueve métodos para determinar la evapotranspiración de referencia en el Valle de Tumbaco en Ecuador, con el fin de optimizar el uso del agua de riego.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio para la presente investigación se estableció en el Valle de Tumbaco, localizado en la República del Ecuador, provincia de Pichincha, ubicado en la cuenca alta del río Esmeraldas. Se utilizó información de la estación agrometeorológica La Tola (M002) perteneciente al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), localizada a una altura de 2480 m, a $0^{\circ}13'46''$ de latitud sur y $78^{\circ}22'0''$ de longitud oeste (Figura 1). La serie histórica mensual de datos va desde 1986 hasta 2018 (32 años).

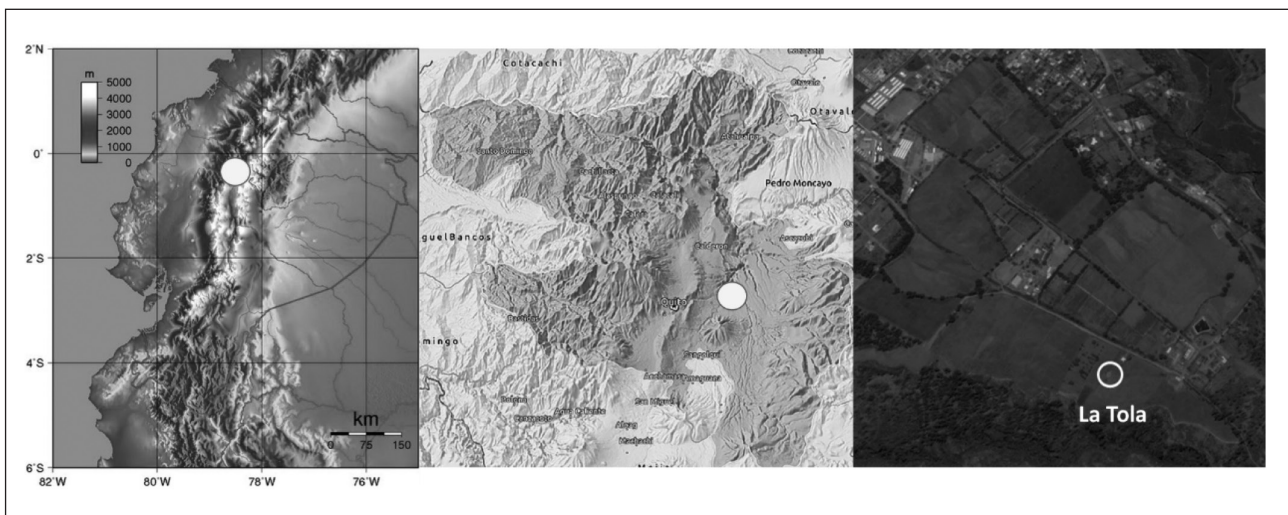


Figura 1. Ubicación del Valle de Tumbaco y la estación climatológica La Tola.

2.2 Climatología

Las condiciones agroecológicas del valle de Tumbaco se caracterizan por tener dos estaciones climáticas bien diferenciadas: la lluviosa de octubre a mayo, y verano de junio a septiembre; durante los meses de julio y

agosto se presentan vientos fuertes, mayor insolación y temperaturas máximas y mínimas; la humedad relativa máxima mensual se registra en el mes de abril con el 79,20% (mes más lluvioso) y la mínima en el mes de agosto con el 65,70% (mes más seco); la temperatura máxima varía entre $25,4^{\circ}\text{C}$ y $26,6^{\circ}\text{C}$; la temperatura

mínima varía entre 4,8 °C y 7,3 °C; la velocidad del viento máxima se registra en el mes de agosto con 1,70 m s⁻¹ y la mínima en el mes de abril con 0,50 m s⁻¹; el

mes con el mayor número de horas de luz es agosto con 7,50 h d⁻¹ y el mes con el menor número de horas de luz es abril con 4,3 h d⁻¹ (Tabla 1).

Tabla 1. Información climatológica promedio. Período 1986-2018 (INAMHI, 2018)

Mes	HR %	Tmax °C	Tmin °C	Viento m s ⁻¹	Horas de luz h d ⁻¹
Enero	76,7	25,7	5,9	0,8	5,8
Febrero	77,3	25,7	6,6	0,6	4,8
Marzo	78,0	25,7	7,0	0,8	4,3
Abril	79,2	25,4	7,3	0,5	4,5
Mayo	77,3	25,5	7,0	0,7	5,1
Junio	72,1	25,6	5,8	0,9	6,0
Julio	66,7	25,6	4,8	1,5	7,1
Agosto	65,7	26,1	4,8	1,7	7,5
Septiembre	69,3	26,6	5,0	1,1	6,2
Octubre	75,1	26,1	5,7	0,9	5,5
Noviembre	76,8	25,8	5,8	0,6	5,3
Diciembre	75,9	25,5	6,0	0,8	5,7

2.3 Métodos para determinar la evapotranspiración de referencia

Penman-Monteith FAO56 (Allen *et al.*, 2006).

$$ET_o = \frac{0,408 \times \Delta \times (Rn - G) + \gamma \times \frac{900}{(T + 273)} \times U_2 \times (es - ea)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)}$$

Donde: ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹); Rn , radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹); G , flujo del calor de suelo (MJ m⁻² d⁻¹); U_2 , velocidad del viento (m s⁻¹); ea , presión real de vapor (kPa); es , presión de vapor de saturación; Δ , pendiente de la curva de variación de la presión (kPa °C⁻¹); T , temperatura promedio (°C); γ , constante psicométrica (kPa °C⁻¹); Z , elevación sobre el nivel medio del mar; λ , calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹).

Tanque evaporímetro Clase A (Allen *et al.*, 2006; Doorenbos & Pruitt, 1977).

$$ET_o = Kp \times Eo$$

$$Kp = 0,5321 - 3 \times 10^{-4} \times U_2 + 0,0249 \times \ln(F) + 0,0025 \times HR$$

Donde: Kp es el coeficiente del tanque evaporímetro; Eo , evaporación del tanque (mm d⁻¹); F distancia que existe entre el tanque evaporímetro y el

área con cultivo (m). Para la estación climatológica La Tola, el método Snyder presentó los mejores índices inferenciales; el coeficiente promedio fue 0,72 (Ortiz *et al.*, 2018).

Thornthwaite modificado (Thornthwaite, 1948; Camargo *et al.*, 1999).

$$Tef = 0,35 \times (3 \times T_{max} - T_{min}) \quad (4)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (5)$$

$$0,49239 + 0,0179 \times I - 0,0000771 \times I^2 + 0,000000675 \times I \quad (6)$$

$$E = 1,6 \times \left(\frac{10 \times Tef}{I} \right)^a \quad \text{si } T < 26 \text{ °C} \quad (7)$$

$$E = -415,85 + 32,24 \times Tef - 0,43 \times Tef^2 \quad \text{si } T > 26 \text{ °C} \quad (8)$$

$$ET_o = E \times \frac{Nd \times Nh}{360} \quad (9)$$

Donde: I es el índice de calor anual; T_i , la temperatura promedio mensual (°C); Tef , la temperatura efectiva (°C); E , la evapotranspiración mensual sin ajustar (mm m⁻¹); Nd , el número de días del mes; Nh , la duración astronómica del día (h); ET_o , la evapotranspiración mensual corregida (mm mes⁻¹).

Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985).

$$ET_o = 0,0135 \times KT \times Ra \times (T + 17,8) \times (T_{max} - T_{min})^{0,5}$$

Donde: R_a es la radiación solar entrante de onda corta (mm d^{-1}); T_{max} , la temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} , la temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$); KT , 0,162 por regiones internas y 0,19 para regiones costeras.

Jensen – Haise (Allen *et al.*, 1990; Landon, 2004).

$$ET_o = R_s \times (0,0252 \times T + 0,078) \quad (11)$$

Donde: R_s es la radiación solar entrante de onda corta (mm d^{-1}).

Makkink (Allen *et al.*, 1990; Landon, 2004).

$$ET_o = 0,61 \times \frac{R_s}{\lambda} \times \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0,12 \quad (12)$$

Priestley and Taylor (Priestley & Taylor, 1972).

$$ET_o = 1,26 \times \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \times (R_n - G) \quad (13)$$

Turc, para HR mayor a 50%, condición ambiental del Valle de Tumbaco (Tabla 1).

$$ET_o = 0,0133 \times \left(\frac{T}{T + 15} \right) \times (R_s + 50) \quad (14)$$

FAO Radiación (Doorenbos & Pruitt, 1977).

$$b = 1,066 - 0,0013 \times HR + 0,045 \times U_2 - 0,0002 \times HR \times U_2 - 0,0000315 \times HR^2 - 0,0011U_2 \quad (15)$$

$$ET_o = b \times R_s \times \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0,3 \quad (16)$$

Donde: b es el coeficiente de ajuste según la velocidad del viento y la humedad relativa.

Previo a la determinación de ET_o , se realizó un control de calidad de las series de datos para verificar que estas sean independientes, homogéneas y consistentes, con un nivel de significancia del 95%.

Abreviaciones: la ET_o determinada a través del método: Penman-Monteith FAO 56 se define como **FAO56**; tanque evaporímetro como **Tan**; Thornthwaite modificado como **Th**; Hargreaves como **Ha**; Jensen and Haise como **JH**; Makkink como

Mk; Priestley and Taylor como **PT**; Turc como **Tu** y FAO Radiación como **Ra**.

2.4 Parámetros inferenciales de evaluación

Para el análisis entre los diferentes métodos, tomando FAO56 como base, se evaluaron los siguientes índices inferenciales:

Error medio absoluto (MAE , mm mes^{-1}), utilizado para establecer la diferencia que existe entre una variable medida con relación a una estimada, es el promedio de todos los errores absolutos; cuando este valor tiende a cero, el error es menor entre la variable medida y la estimada, el valor óptimo es igual a cero (Chai & Draxler, 2014).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - E_i|}{n} \quad (18)$$

Donde: O es el valor observado; E , el valor proyectado; n , el número de valores en estudio.

Coficiente de determinación (R^2), calculado a través de regresiones simples, es un índice estadístico utilizado para medir la relación lineal entre dos variables cuantitativas; el valor óptimo debe ser igual a uno y cuando este valor tiende a cero, la correlación entre dos variables es baja; cuando el valor es positivo, la relación es directa y cuando el valor es negativo, la relación es inversa (Samuels, 2014).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - X)(E_i - E_m) \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^n O_i^2 - nX^2 \right) \times \left(\sum_{i=1}^n E_i^2 - nE_m^2 \right)} \quad (19)$$

Donde: E_i es el valor proyectado; E_m , el promedio de los valores proyectados; X , el promedio de los valores observados.

Coficiente de concordancia (D), determina la precisión de los resultados proporcionados por el modelo utilizado para pronosticar un valor observado; cuando este valor tiende a uno, el modelo presenta una mayor precisión (Willmott *et al.*, 2012).

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - X + E_i - X)^2} \quad (20)$$

Coficiente de confiabilidad (C), determina la precisión de los resultados con base en el coeficiente de determinación y el coeficiente de correlación (Silva *et al.*, 2018).

$$C = R \times D \quad (21) \quad 2.5 \text{ Validación del método de mejor ajuste}$$

Tabla 2. Criterio para interpretar el coeficiente de confiabilidad (Silva *et al.*, 2018)

Coeficiente de confiabilidad	Clasificación
> 0,85	Excelente
0,76 to 0,85	Muy bueno
0,66 to 0,75	Bueno
0,61 to 0,65	Intermedio
0,51 to 0,60	Tolerable
0,41 to 0,50	Pobre
< 0,40	Muy pobre

El método que presente un mayor índice de confiabilidad se analizará para los años de máxima (2015) y mínima (1988) evapotranspiración anual, para determinar su grado de precisión en condiciones extremas.

3. Resultados

La ET_0 determinada por los nueve métodos para las condiciones ambientales del Valle de Tumbaco e información climatológica mensual se presenta en la Tabla 3 y Figura 2a.

Tabla 3. ET_0 mensual y anual para la estación La Tola con los nueve métodos evaluados

Métodos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
FAO56	103,89	92,32	99,43	90,17	93,85	95,35	118,22	129,64	114,42	109,05	95,29	101,23	1242,85
Tan	92,65	82,47	80,84	75,69	84,67	101,06	123,81	136,65	111,38	92,50	81,63	88,89	1152,25
Th	132,47	121,72	128,75	121,40	127,33	126,73	134,74	138,79	137,83	136,44	129,38	130,37	1565,97
Ha	149,80	143,48	154,35	142,59	140,09	132,53	140,98	151,34	155,33	157,15	146,03	146,11	1759,78
JH	107,61	97,13	101,04	96,29	98,44	96,51	107,86	118,21	110,16	107,98	99,65	104,15	1245,03
PT	112,17	103,27	108,83	103,00	101,97	97,56	107,10	117,10	112,72	113,79	105,41	108,64	1291,54
Mk	95,07	84,81	87,64	83,54	85,67	85,62	97,41	105,97	97,48	95,16	88,17	92,23	1098,76
Tu	106,69	100,75	108,25	104,74	107,99	102,79	104,66	105,44	103,22	106,92	103,12	106,40	1260,97
Ra	117,34	102,99	106,03	98,99	103,88	109,41	133,33	147,57	129,58	119,40	107,53	114,29	1390,35

Considerando el mes de máxima ET_0 (agosto: Tabla 3, columna 9) y el método FAO56 como base, el tanque evaporímetro proporcionó un valor de ET_0 superior del 5,41%; Thornthwaite modificado un valor superior del 7,06%; Hargreaves un valor superior del 16,74%; Jensen and Haise un valor inferior del 9,67%; Priestley and Taylor un valor inferior del 9,67%; Makkink un valor inferior del 18,26%; Turc un valor inferior del 18,67% y FAO Radiación un valor superior del 13,83%.

Considerando el total anual de ET_0 (Tabla 3, columna 14) y el método FAO56 como base, el tanque evaporímetro proporcionó un valor de ET_0 inferior del 7,29%; Thornthwaite modificado un valor superior del 26,0%; Hargreaves un valor superior del 41,59%; Jensen and Haise un valor mayor del 0,18%; Priestley and Taylor un valor superior del 3,92%; Makkink un valor inferior del 11,59%; Turc

un valor superior del 1,46% y FAO Radiación un valor superior del 11,87%.

El método del tanque evaporímetro para información climatológica de toda la serie histórica de datos presentó un desempeño pobre (Tabla 4); para el año de máxima ET_0 índices intermedios (Tabla 5) y para el año de mínima ET_0 un índice de confiabilidad muy pobre (Tabla 5). En otras zonas de la región, como Sao Paulo (Brasil), este método presentó mejores resultados que FAO56 considerando ET_0 determinada a través de lisímetros (Sentelhas & Folegatti, 2003).

El método Thornthwaite modificado presentó un índice de confiabilidad muy pobre tanto para toda la serie de datos como para el año de máxima y mínima ET_0 (Tablas 4 y 5). Este método es muy utilizado en el Ecuador en estudios de balances hídricos (CISPDR, 2016).

Tabla 4. Parámetros inferenciales. Serie total de datos

Métodos	MAE	R ²	D	C	Clasificación
Tan	18,86	0,64	0,66	0,42	Pobre
Th	28,93	0,44	0,45	0,20	Muy pobre
Ha	27,71	0,26	0,26	0,07	Muy pobre
JH	11,00	0,73	0,74	0,54	Tolerable
PT	13,15	0,66	0,64	0,42	Pobre
Mk	13,88	0,81	0,72	0,58	Tolerable
Tu	14,81	0,06	0,34	0,02	Muy pobre
Ra	12,86	0,88	0,78	0,69	Bueno

El método Hargreaves presentó un índice de confiabilidad muy pobre tanto para toda la serie de datos como para el año de máxima y mínima ET_0 (Tablas 4 y 5); en otras zonas de la región presentó índices inferenciales de alta precisión como en Campos Dos Goytacazes en Rio de Janeiro en Brasil (Lázaro *et al.*, 2012), en la región del libertador general Bernardo O'Higgins en Chile (Sánchez & Carvacho, 2011) y en la cuenca andino-amazónica peruana (Lavado Casimiro *et al.*, 2015).

El método Jensen and Haise para información climatológica de toda la serie histórica de datos presentó un desempeño tolerable (Tabla 4), mientras que para el año de máxima y mínima ET_0 índices muy pobres (Tabla 5).

El método Priestley and Taylor para información climatológica de toda la serie histórica de datos presentó un desempeño pobre (Tabla 4), para el año de máxima ET_0 un índice muy pobre y para el año de mínima ET_0 , índices pobres (Tabla 5); en la provin-

cia del Azuay (Ecuador) presentó índices confiables para estimar ET_0 en la microcuenca del río Quinuas (Contreras, 2015), así como, índices de alta precisión en Campos Dos Goytacazes en Rio de Janeiro en Brasil (Lázaro *et al.*, 2012).

El método Makkink para información climatológica de toda la serie histórica de datos presentó un desempeño tolerable (tabla 4); para el año de máxima ET_0 un índice muy pobre (Tabla 5), y para el año de mínima ET_0 un índice de confiabilidad pobre (Tabla 5); este método presentó índices de alta precisión en Campos Dos Goytacazes en Rio de Janeiro (Lázaro *et al.*, 2012).

El método Turc presentó un índice de confiabilidad muy pobre tanto para toda la serie de datos como para el año de máxima y mínima ET_0 , por el contrario, en la región del libertador general Bernardo O'Higgins (Chile) presentó índices de alta precisión (Sánchez & Carvacho, 2011).

El método FAO Radiación presentó un coeficiente de confiabilidad bueno para toda la serie de datos (Tabla 4), excelente para el año de máxima ET_0 (Tabla 5), y para el año de mínima ET_0 un coeficiente muy pobre (Tabla 5).

Para el año de ET_0 máxima (2015), FAO56 proporcionó un total anual de 1.550,78 mm y FAO Radiación 1.571,69 mm, con una diferencia de 20,91 mm (1,35%); para el año de ET_0 mínima (1988), FAO56 proporcionó 1.049,47 mm y FAO Radiación 1.278,72 mm, con un exceso de 229,25 mm (21,84%).

Tabla 5. Validación del método FAO Radiación para el año de máxima y mínima ET_0 .

Métodos	Año 2015					Año 1988				
	MAE	R ²	D	C	Clasificación	MAE	R ²	D	C	Clasificación
Tan	30,06	0,91	0,68	0,62	Intermedio	15,90	0,19	0,53	0,10	Muy pobre
Th	17,41	0,37	0,60	0,22	Muy pobre	42,18	0,20	0,28	0,06	Muy pobre
Ha	20,18	0,08	0,40	0,03	Muy pobre	40,57	0,38	0,31	0,12	Muy pobre
JH	19,36	0,56	0,58	0,32	Muy pobre	14,85	0,50	0,61	0,31	Muy pobre
PT	20,27	0,27	0,51	0,14	Muy pobre	17,34	0,82	0,58	0,48	Pobre
Mk	34,20	0,64	0,51	0,33	Muy pobre	4,81	0,54	0,80	0,43	Pobre
Tu	23,74	0,07	0,43	0,03	Muy pobre	21,44	0,10	0,40	0,04	Muy pobre
Ra	6,51	0,90	0,97	0,87	Excelente	19,10	0,60	0,59	0,35	Muy pobre

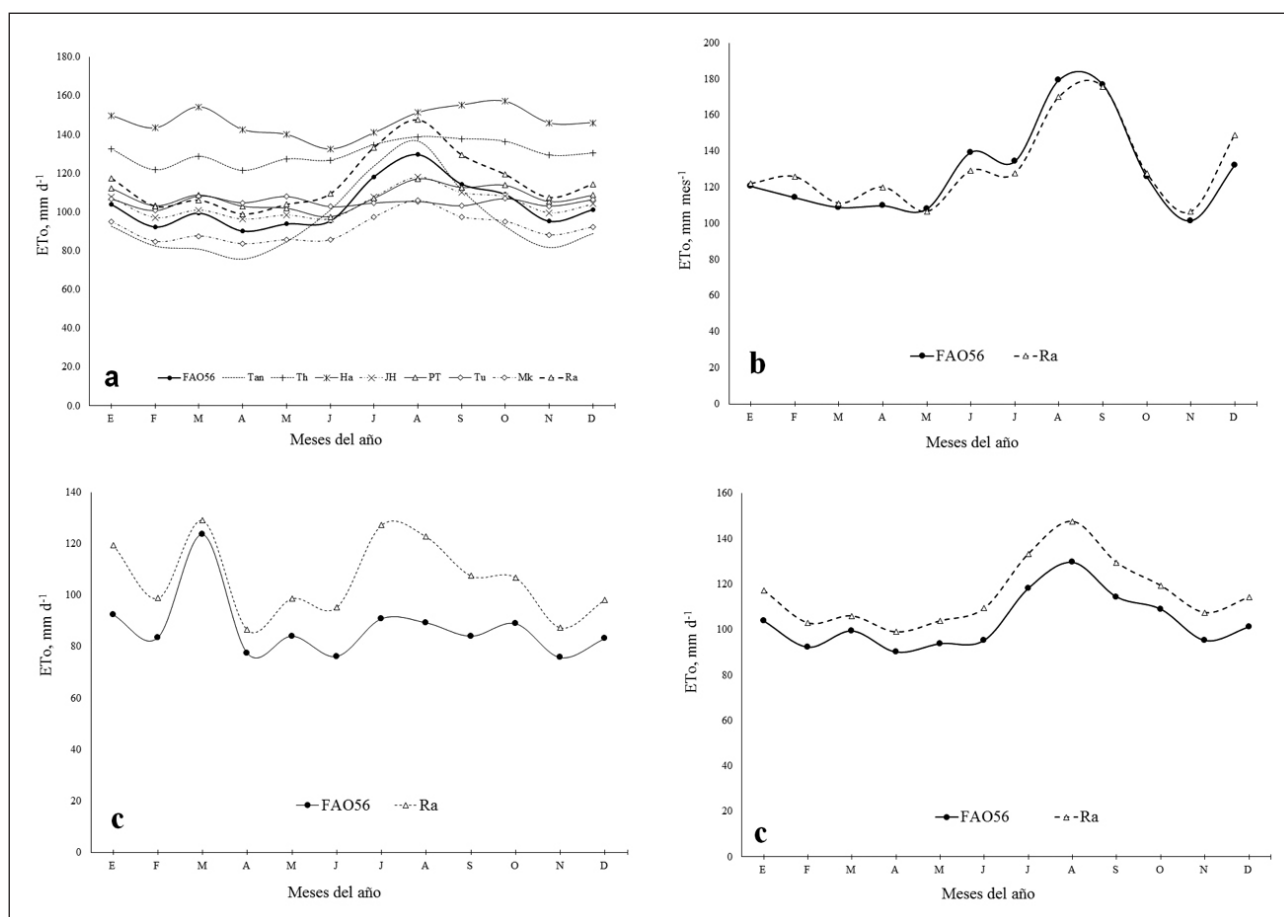


Figura 2. Evapotranspiración de referencia: (a) promedio mensual multianual de los nueve métodos, (b) ET₀ máxima anual (2015), (c) ET₀ mínima anual (1988), y (d) ET₀ promedio multianual (serie de 32 años).

El método FAO Radiación para el año con mayor ET₀ (2015), subestima ET₀ en los meses de junio, julio y agosto, y sobreestima en febrero, abril y diciembre (Figura 2b), siendo diciembre el mes con máxima variación (12,66%); para el año con ET₀ mínima (1988), sobreestima ET₀ durante todo el año (Figura 2c), siendo julio el mes en el que presenta la máxima variación (40,16%); para valores de ET₀ promedio de la serie histórica, sobreestima ETo durante todo el año, siendo junio en donde se presenta la máxima variación con un 14,75% (Figura 2d).

4. Discusión

Los métodos para calcular ET₀ como: FAO56, tanque evaporímetro, Thornthwaite, Hargreaves, Jensen and Haise y Turc presentan diferencias sustanciales en los procedimientos matemáticos para determinar ET₀. Los métodos FAO56, FAO Radiación, Makkink, Priestley and Taylor, se derivan de la ecuación original de Penman.

El método FAO56, a diferencia de los otros métodos, es un modelo aerodinámico completo, el cual

integra en su fórmula de cálculo todas las variables que intervienen en el proceso de ET₀ tal como la resistencia aerodinámica, la resistencia superficial del cultivo y el albedo (Allen *et al.*, 2006), presentando una alta correlación cuando ha sido contrastado con lisímetros, tanto en zonas áridas como húmedas y templadas (Allen *et al.*, 1990).

El método del tanque evaporímetro presentó índices inferenciales que varían de muy pobre a intermedio; a pesar de su sencillez, requiere de una operación y mantenimiento rigurosos para obtener lecturas confiables de evaporación, considerando que el color del tanque, lámina de agua, dificultad para leer la evaporación durante las lluvias, entre otros factores, influyen directamente en el balance energético, y por lo tanto en los valores registrados de evaporación.

El método Thornthwaite modificado presentó índices inferenciales muy pobres, debido a que los coeficientes están calibrados para condiciones ambientales de Estados Unidos, en donde existen cuatro estaciones climáticas bien diferenciadas (otoño,

invierno, primavera y verano), presentándose temperaturas bajo cero en invierno (enero), situación muy diferente a la que ocurre en el valle de Tumbaco, en donde se registran temperaturas máximas de 25,84 °C y mínimas de 5,95 °C en el mes de enero (Tabla 1).

El método Hargreaves presentó índices inferenciales muy pobres, debido a que este método se desarrolló para condiciones ambientales de Estados Unidos, en donde se presentan días con 4 horas de luz en invierno y de hasta 16 horas en verano, mientras que en el Ecuador existen 12 horas de luz durante los 365 días del año.

El método Jensen and Haise presentó índices inferenciales que varían de muy pobre a tolerable. El método Makkink presentó mejores índices inferenciales que el método Priestley and Taylor, debido a que los valores del coeficiente "a" son diferentes (ecuaciones 10 y 11), para Makkink este valor es de 0,61 y para Priestley and Taylor de 1,26. Por otro lado, mientras que en el método Makkink se sustrae una constante de 0,12 mm d⁻¹ de ET_o, el método Priestley and Taylor utiliza la radiación neta y el flujo del calor del suelo para determinar ET_o.

El método Turc presentó índices inferenciales muy pobres, debido a que los coeficientes se ajustaron para la climatología del oeste de Europa (Landon, 2004), muy diferente a las condiciones climatológicas ecuatoriales, en donde existen dos estaciones climáticas bien diferenciadas (invierno y verano); en invierno, las lluvias se presentan por el efecto atmosférico que produce la corriente cálida de El Niño y, en verano, el clima se encuentra afectado por la corriente fría de Humboldt. Por otro lado, las cordilleras oriental y occidental de los Andes que rodean al valle de Tumbaco también influyen en el clima, con la presencia de los nevados (Cotopaxi, Antisana, entre otros), los cuales producen temperaturas muy bajas o heladas en verano. Asimismo, en los meses de julio y agosto, la

presencia de los vientos incrementa la tasa de evapotranspiración, llegando a ser ésta incluso mayor a la ET_o que se registra en la Costa ecuatoriana.

A pesar de que los métodos FAO56 y FAO Radiación se basan en el método original de Penman para estimar ET_o, FAO Radiación presentó índices de confiabilidad que varían de muy pobre a excelente, variación asociada con las variables utilizadas en el cálculo, así como, en el ajuste del coeficiente b que utiliza FAO Radiación para estimar la evapotranspiración de referencia (ecuación 15). FAO Radiación no utiliza las siguientes variables para estimar ET_o: radiación neta en la superficie del cultivo y flujo de calor del suelo. Por otro lado, el coeficiente b está calibrado para condiciones ambientales de Estados Unidos.

5. Conclusiones

Con base en los índices inferenciales MAE, R², D y C, el método FAO Radiación presentó una precisión *buena*; Jensen and Haise, Makkink y Priestley and Taylor, proporcionaron una precisión *tolerable*; el tanque evaporímetro, Hargreaves, Turc y Thornthwaite, índices inferenciales *muy pobres*.

A pesar de que los métodos Jensen and Haise y Turc proporcionan valores anuales de ET_o cercanos a FAO56, las diferencias sustanciales en ET_o mensual, hacen que estos métodos no presenten índices inferenciales de mayor precisión.

Los métodos basados en la temperatura y radiación solar, subestiman ET_o durante los meses de julio y agosto, debido a que no incorporan en su fórmula la velocidad del viento, cuyos valores oscilan entre 1,1 y 1,7 m s⁻¹, afectando directamente a la tasa de evapotranspiración.

Para estimar ET_o con las condiciones ambientales del Valle de Tumbaco debe utilizarse el método FAO56.

Referencias

- Allen, R., Burman, R., & Jensen, M. (1990). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. New York: American Society of Civil Engineers.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma: FAO.
- Bhabagrahi, S., Imtisenla, W., Bidyut, D., & Bhagwati, B. (2012). Standardization of Reference Evapotranspiration Models for a Subhumid Valley Rangeland in the Eastern Himalayas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138, 880-895.

- Camargo, A., Marín, F., Sentelhas, P., & Picini, A. (1999). Adjust of the Thornthwaite's method to estimate the potential evapotranspiration for arid and superhumid climates, based on daily temperature amplitude. *Revista Brasileira de Agrometeorología*, 7(2), 251-257.
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7, 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- CISPDR - Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research. (2016). *Plan nacional de la gestión integrada e integral de los recursos hídricos de las cuencas y micro cuencas hidrográficas del Ecuador*. Ecuador: Secretaría Nacional del Agua.
- Contreras, J. (2015). *Análisis comparativo de cuatro modelos de evapotranspiración de referencia en la microcuenca del río Quinuas*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. Roma: FAO.
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- INAMHI. (2018). Información climatológica proporcionada por el INAMHI. Quito, Ecuador.
- Landon, R. (2004). *An evaluation of reference evapotranspiration models in Louisiana*. United States: Louisiana State University.
- Lavado Casimiro, W.S., Lhomme, J.-P., Labat, D., Guyot, J.-L., & Boulet, G. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO-56 Penman – Monteith) con limitados datos climáticos en la cuenca andina amazónica peruana. *Revista Peruana Geo-Atmosférica*, 4, 31-43.
- Lázaro, F., Célia, M., & Otto, C. (2012). Evaluation of six empirical evapotranspiration equations – Case study: campos dos Goytacazes. *Revista Brasileira de Meteorología*, 27(3), 272-280. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000300002>
- Ortiz, R. Tamayo, Ch. Chile, M. & Méndez, A. (2018). Coeficiente del tanque evaporímetro Clase A para estimar la evapotranspiración de referencia para el valle de Tumbaco. *Siembra*, 5(1), 16-25.
- Priestley, C., & Taylor, R. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Atmospheric Physics*, 100(2), 81-92.
- Samuels, P. (2014). Pearson Correlation. Disponible en: <http://www.statstutor.ac.uk/resources/uploaded/pearsoncorrelation3.pdf>
- Sánchez, M., & Carvacho, L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la región del libertador general Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50, 171-186. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000300010>
- Sentelhas, P., & Folegatti, M. (2003). Class A pan coefficients (K_p) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_0). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(1), 111-115. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000100018>
- Silva, G. H. da, Dias, S. H. B., Ferreira, L. B., Santos, J. É. O., & Cunha, F. F. da. (2018). Performance of different methods for reference evapotranspiration estimation in Jaíba, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 83-89. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p83-89>
- Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a Rational Classification of Climate. *American Geographical Society*, 38(1), 55-94.
- Willmott, C., Robeson, S., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32, 2088-2094. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>