



UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

ANÁLISIS COMPARATIVO DE CUATRO MODELOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO QUINUAS

Tesis previa a la obtención del título
de Ingeniero Ambiental

Autor: Juan José Contreras Silva

Director: Ing. Galo José Carrillo Rojas, MSc

Tutor: Ing. Mario Andrés Córdova Mora

Cuenca – Ecuador

Marzo 2015



Resumen

La correcta estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) constituye un requerimiento esencial en estudios hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos. A pesar de esta importancia, la ET_o ha sido escasamente estudiada en el páramo. El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento de 4 modelos de ET_o (FAO 56 P-M, Hargreaves, Priestley-Taylor y Valiantzas) en una gradiente montano andina, para esto: (I) se estimó la ET_o utilizando los diferentes modelos en la gradiente, (II) se compararon las estimaciones de ET_o de los diferentes modelos en función de la gradiente tomando como referencia el modelo de la FAO 56 P-M, (III) se analizó el impacto de las estimaciones de los cuatro modelos, mediante un análisis de sensibilidad. El estudio fue realizado con datos meteorológicos muestreados entre agosto de 2013 y julio de 2014, en 3 observatorios meteorológicos ubicados en la microcuenca del río Quinuas (Parque Nacional Cajas, Azuay). Se observó que la ET_o a lo largo del año tiene un patrón similar en los sitios estudiados, registrándose el valor máximo en el mes de noviembre y el valor mínimo en junio. Las mejores estimaciones diarias de ET_o fueron obtenidas con Valiantzas y las mensuales con Priestley-Taylor al comparar con la FAO 56 P-M. La ET_o mostró una mayor sensibilidad en el páramo a la humedad relativa y la radiación solar, seguida de la temperatura, y en menor grado la velocidad del viento. La sensibilidad de la ET_o a los parámetros meteorológicos difiere en cada modelo.

Palabras clave: Evapotranspiración de referencia, FAO 56 P-M, Hargreaves, Priestley-Taylor, Valiantzas, análisis de sensibilidad, páramo, gradiente altitudinal.



Abstract

The accurate estimation of reference evapotranspiration (ET_o) is an essential requirement in hydrological, ecohydrological and biometeorological studies. Despite this importance, the ET_o has been scarcely studied in the paramo. The aim of this study was to evaluate the performance of 4 models of ET_o (FAO 56 PM, Hargreaves, Priestley-Taylor and Valiantzas) in a Andean mountain gradient, for this: (I) ET_o was estimated using different models in the gradient, (II) ET_o estimates for different models were compared in the gradient against the reference model of the FAO 56 P-M, (III) the impact of the estimates of the 4 models was analyzed by a sensitivity analysis. The study was conducted with meteorological data sampled between August 2013 and July 2014, in 3 meteorological stations in the Quinuas micro-river basin (Cajas National Park, Azuay). The results show that ET_o has a similar pattern in the study places throughout the year, the maximum value was recorded in November and the minimum value in June. The best daily ET_o estimates were obtained using the Valiantzas method and the best monthly estimates using the Priestley-Taylor when compared to the FAO 56 P-M model. The sensitivity analysis showed that ET_o is most sensitive in the paramo to relative humidity and solar radiation, followed by temperature and less to wind speed. The sensitivity to the ET_o to the meteorological parameters differs in each model.

Keywords: Reference evapotranspiration, FAO 56 P-M, Hargreaves, Priestley-Taylor, Valiantzas, sensitivity analysis, paramo, altitudinal gradient.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen	2
Abstract	3
Cláusulas	7
Agradecimiento	10
1. Introducción	11
1.1. Antecedentes.....	11
1.2. Justificación.....	12
1.3. Objetivos.....	13
1.3.1. Objetivo General.....	13
1.3.2. Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Teórico	14
2.1. Conceptos y definiciones.....	14
2.1.1. Páramo.....	14
2.1.2. Evapotranspiración (ET).....	14
2.1.3. Evapotranspiración de referencia (ET _o).....	14
2.1.4. Factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración.....	15
2.1.4.1. Radiación solar.....	15
2.1.4.2. Temperatura del aire.....	16
2.1.4.3. Humedad relativa.....	16
2.1.4.4. Velocidad del viento.....	16
2.2. Revisión bibliográfica.....	17
2.2.1. Modelos de evapotranspiración de referencia.....	17
2.2.2. Análisis de sensibilidad.....	19
3. Métodos y materiales	22
3.1. Área de estudio.....	22
3.2. Datos.....	23



3.3. Métodos de estimación de evapotranspiración.....	25
3.3.1. Método de la FAO Penman-Monteith (FAO 56 P-M).....	25
3.3.2. Método de Hargreaves (HG).....	29
3.3.3. Método de Priestley-Taylor (P-T).....	30
3.3.4. Método de Valiantzas (V).....	31
3.4. Análisis estadístico.....	31
3.5. Análisis de sensibilidad.....	33
4. Resultados y discusión.....	34
4.1. Estimaciones de evapotranspiración de referencia.....	34
4.2. Análisis estadístico y correlacional de los modelos de ETo.....	38
4.2.1. Comparación de los modelos de ETo en estimaciones diarias.....	38
4.2.2. Comparación de los modelos de ETo en estimaciones mensuales.....	42
4.3. Análisis de sensibilidad.....	45
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	50
5.1. Conclusiones.....	50
5.2. Recomendaciones.....	51
Referencias.....	52
Anexos.....	55



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características geográficas y climáticas anuales de los lugares de estudio durante el periodo agosto 2013 – julio 2014.....	23
Tabla 2. Análisis estadístico de la comparación entre las estimaciones de ETo diaria determinada por los diferentes modelos y los de la FAO 56 P-M.....	39
Tabla 3. Valores promedio del análisis estadístico de la ETo diaria.....	39
Tabla 4. Análisis estadístico de la comparación entre las estimaciones de ETo mensual determinada por los diferentes modelos y los de la FAO 56 P-M.....	42
Tabla 5. Valores promedio del análisis estadístico de la ETo mensual.....	43
Tabla 6. Coeficientes de sensibilidad de las variables meteorológicas correspondientes a los modelos de ETo.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.....	22
Figura 2. Variación mensual de las variables meteorológicas en el lugar de estudio durante el periodo agosto 2013 - julio 2014.....	24
Figura 3. Variabilidad mensual de la ETo determinada por el modelo de la FAO 56 P-M.....	34
Figura 4. Variabilidad mensual de los modelos de ETo.....	36
Figura 5. Diagrama de cajas de la distribución de la ETo diaria y mensual.....	37
Figura 6. Comportamiento de la ETo diaria de los diferentes modelos frente a la ecuación de la FAO 56 P-M.....	41
Figura 7. Comportamiento de la ETo mensual de los diferentes modelos frente a la ecuación de la FAO 56 P-M.....	44
Figura 8. Sensibilidad de los modelos de ETo al cambio de $\pm 20\%$ en las variables meteorológicas.....	46



Universidad de Cuenca

Fundada en 1867

Yo, Juan José Contreras Silva, autor de la tesis "**ANÁLISIS COMPARATIVO DE CUATRO MODELOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO QUINUAS**", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **Ingeniero Ambiental**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, marzo de 2015

A handwritten signature in blue ink that reads "Juan José Contreras Silva".

Juan José Contreras Silva

C.I: 0105688584



Universidad de Cuenca

Fundada en 1867

Yo, Juan José Contreras Silva, autor de la tesis **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE CUATRO MODELOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO QUINUAS”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, marzo de 2015

A handwritten signature in blue ink, reading "Juan José Contreras Silva".

Juan José Contreras Silva
C.I: 0105688584



El presente estudio se ha realizado dentro del Proyecto ETAPA-DIUC: “Ciclos Meteorológicos y Evapotranspiración a lo Largo de una Gradiente Altitudinal del Parque Nacional Cajas 2013 – 2017” del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales iDRHiCA de la Universidad de Cuenca.

Las bases de datos hidrometeorológicos utilizados en la investigación son de propiedad de la Universidad de Cuenca, iDRHiCA y ETAPA, su uso y publicación externa al presente trabajo están sujetos a las leyes de propiedad intelectual vigentes.



Agradecimiento

Quiero dejar constancia de mi agradecimiento a todos quienes contribuyeron para el desarrollo del presente estudio. De manera especial al Ingeniero Galo Carrillo Rojas por el soporte académico y compromiso para la realización de este proyecto. De igual manera al Ingeniero Mario Córdova Mora por su continuo aporte de ideas y comentarios que enriquecieron este estudio. A las instituciones que aportaron directa o indirectamente en la ejecución del mismo:

Universidad de Cuenca con su Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales y Centro de Hidrología y Clima, Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (ETAPA EP), Subgerencia de Gestión Ambiental y Administración del Parque Nacional Cajas (PNC), Área de Biosfera Macizo del Cajas y Área Nacional de Recreación Quimsacocha."

Juan José Contreras Silva,
Cuenca, marzo de 2015.



1. Introducción

1.1. Antecedentes

La evapotranspiración (ET) es el proceso simultáneo de transferencia de agua a la atmósfera: por evaporación del agua desde el suelo y del agua contenida en la superficie de la vegetación, por una parte, y mediante transpiración de la vegetación, por otra. La ET es un parámetro importante para estudios meteorológicos e hidrológicos como también para la planificación y gestión de riego (Hupet & Vanclooster, 2001; Martínez et al., 2009; Xu et al., 2013). Además, es necesario cuantificarla para trabajos relacionados con la gestión de recursos hídricos o estudios ambientales (Rahimikhoob et al., 2012; Tabari et al., 2011).

Un procedimiento común para determinar la ET es estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) y luego aplicar un coeficiente de cultivo específico (Gocic & Trajkovic, 2013). La ET_o es la medida de la demanda evaporativa de la atmósfera independiente del tipo de cultivo, el cual representa un parámetro climático y puede calcularse a partir de datos meteorológicos (Allen et al., 2006). Esto hace posible comparar valores medidos o estimados de ET_o en diferentes localidades y épocas del año, debido a que se refiere a la ET determinada bajo un mismo cultivo de referencia.

Los métodos más precisos para determinar la ET_o utilizan mediciones con lisímetros (Xu et al., 2013); estas mediciones son costosas y difíciles de realizar; razones por las cuales el uso de estos equipos resultan insostenibles en la estimación de la ET_o en muchas áreas del planeta. Diferentes modelos empíricos y semi-empíricos para el cálculo de la ET_o han sido desarrollados incluyendo métodos basados en: la temperatura, radiación, transferencia de masa, tanque evaporímetro, entre otros (Allen et al., 2006; Burman, 2007; Tabari et al., 2011; Hou et al., 2013; Xu et al., 2013). El método de la FAO 56 Penman-Monteith (FAO 56 P-M) es recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) como el único estandarizado para dicho cálculo (Allen et al., 2006).

El modelo de la FAO 56 P-M, incorpora aspectos termo y aerodinámicos, con lo que ha demostrado ser un método relativamente preciso tanto en climas húmedos y áridos (Allen et al., 2006; García et al., 2004; Tabari, 2009). Sin embargo, un inconveniente que se presenta en el cálculo de la ET_o por este método, es la alta demanda de datos meteorológicos y la poca disponibilidad de estos debido a que se requiere valores de la temperatura del aire, velocidad del viento, humedad



relativa y radiación; cuyas estaciones meteorológicas en que todos estos parámetros se observan es limitada en muchas zonas del planeta (Rahimikhoob et al., 2012), lo que ha limitado su uso en algunas regiones (Bogawski & Bednorz, 2014).

En general es muy difícil contar con datos meteorológicos completos (Stöckle et al., 2004), en el Ecuador este problema es aún mayor debido a la limitada infraestructura de observatorios meteorológicos, por lo que según Córdova et al. (2013) casi todos los proyectos de riego, hidrológicos y meteorológicos realizados en el país, han sido diseñados con estimaciones mensuales de la ETo, debido a que estos son los únicos datos con los que generalmente se cuenta en las estaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

Las variables meteorológicas de entrada que requieren los diferentes métodos de ETo pueden tener impactos significativos en las estimaciones, particularmente cuando se introducen errores derivados de datos suplementarios (Rivington et al., 2005). Bajo estas condiciones, las ecuaciones simplificadas o empíricas, que requieren un menor número de parámetros de entrada, deben ser consideradas. Por ello la evaluación de la evapotranspiración de referencia obtenida por métodos simples es importante y ha recibido una considerable atención en los países en desarrollo (Tabari et al., 2011).

1.2. Justificación

La correcta estimación de la evapotranspiración de referencia constituye un requerimiento esencial para la determinación de la demanda de agua de riego, la ejecución de estudios de balance hídrico, el impacto hidrológico por la implementación de grandes obras de infra y superestructura, la aplicación de modelos de lluvia-escorrentía y de ecosistemas; entre otras necesidades.

La evapotranspiración sigue siendo uno de los elementos menos estudiados en el balance hidrológico, debido a la poca disponibilidad de datos de calidad y a una prevalencia de la incertidumbre respecto a la confiabilidad de los resultados generados por los diferentes métodos en su medición, relacionada en lo principal a un conocimiento insuficiente de sus características de variabilidad temporal y la sensibilidad a las variables meteorológicas necesarias para su cálculo. Conocer su comportamiento es ahora parte fundamental en estudios ecohidrológicos y biometeorológicos donde se vincula el clima con el desarrollo de la vegetación, el consumo de agua de ecosistemas, la respuesta y resiliencia de los ecosistemas a cambios en el clima (Córdova et al., 2013).



El páramo es la fuente principal de agua para la sierra ecuatoriana para distintos fines: doméstico, agrícola, industrial e incluso para la generación de energía hidroeléctrica en el país, a pesar de esto, este ecosistema ha sido estudiado con poca profundidad; por lo cual, la aplicación de los resultados a obtener en este estudio son importantes para la disminución de la incertidumbre local en el comportamiento de la ETo frente a las diferentes condiciones climáticas, tanto a escala espacial como temporal en futuros estudios, bajo premisas universales y vitales inscritas en el objetivo de lograr y mantener el balance hídrico más sustentable posible, según el crecimiento de la población y sus actividades.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Realizar un análisis comparativo de cuatro métodos de estimación de ETo sobre una gradiente altitudinal montano andina, empleando datos meteorológicos de tres observatorios climáticos localizados en un transecto longitudinal de la microcuenca del río Quinuas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estimar la ETo empleando cuatro modelos diferentes para los tres observatorios meteorológicos de la gradiente en estudio.
- Comparar estadística y gráficamente los valores de las estimaciones de ETo obtenidas de los diferentes modelos y su comportamiento en función de la gradiente altitudinal.
- Determinar el impacto de las estimaciones de la ETo de los cuatro modelos mediante un análisis de sensibilidad.



2. Marco Teórico

2.1. Conceptos y definiciones

2.1.1. Páramo

La cordillera de los Andes atraviesa la franja occidental de Sudamérica, incluyendo al Ecuador. La sierra ecuatoriana representa el 34% del área del país la cual se ubica a lo largo del callejón interandino (Célleri & Feyen 2009). Uno de los principales ecosistemas que se encuentran en esta zona montañosa es el páramo. El páramo andino es un ecosistema montano intertropical ubicado generalmente entre altitudes de 3000 m hasta la línea de nieves perpetuas, aproximadamente 4300 m. En el Ecuador se usa comúnmente la altitud de 3500 m como límite inferior, pero las condiciones geológicas, climáticas y antrópicas hacen que este límite varíe mucho y que se encuentren a veces páramos desde los 2.800 m, especialmente en el sur del país; o bosques cerrados hasta por sobre los 4.000 m (Medina & Mena 2001).

En el Ecuador, el páramo cubre alrededor de 1.250.000 ha, es decir aproximadamente un 6% del territorio nacional (Medina & Mena 2001). El clima en el páramo comúnmente es frío y húmedo. La precipitación puede ser muy variable, desde valores inferiores a 1000 mm hasta superiores a 4000 mm, dependiendo de la zona (Buytaert et al., 2006). El páramo presenta características hidrológicas muy particulares. La producción de agua en cuencas pequeñas puede superar la mitad del total de la precipitación. Esto se explica por los suelos con altos contenidos de materia orgánica (gran capacidad de retención del agua), por las bajas tasas de evapotranspiración debido al clima y a la inexistencia de una estación seca marcada (Padrón, 2013).

2.1.2. Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración (ET) es uno de los componentes que forman el ciclo hidrológico y es conocida como la combinación de dos procesos separados que ocurren de manera simultánea, por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y otra parte mediante transpiración del cultivo (Allen et al., 2006), es el intercambio de vapor de agua entre la superficie de la tierra y la atmósfera. Ésta depende de la radiación solar, velocidad del viento, temperatura del aire, presión atmosférica, flujo de calor en el suelo y humedad relativa.



2.1.3. Evapotranspiración de referencia (ET_o)

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Hace referencia a la evapotranspiración potencial de una superficie hipotética de hierba verde y altura uniforme, creciendo activamente y regada adecuadamente. La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) asume un cultivo con una altura de 0.12 m, una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0.23; este cultivo se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme creciendo activamente, dando sombra totalmente al suelo y con un adecuado aporte de agua (Allen et al., 2006); lo que hace posible comparar valores medidos o estimados de ET_o en diferentes localidades y en diferentes épocas del año, debido a que hace referencia a la ET determinada bajo una misma superficie de referencia.

La ET_o es una de las variables hidrológicas más importantes para los sistemas de programación de riego, es parte de los datos de entrada en modelos de balance hídrico e hidrológico, y el cálculo de la evapotranspiración real para una región y/o una cuenca. La ET_o es una medida de la demanda evaporativa de la atmósfera independiente del tipo de cultivo el cual representa un parámetro climático y puede calcularse a partir de datos meteorológicos.

2.1.4. Factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración

2.1.4.1. Radiación solar

La evapotranspiración depende de la cantidad de energía disponible para evaporar el agua, la radiación solar es la fuente más importante de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. Esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y estación del año y depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación (Allen et al., 2006). Cuando se determina el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua. Parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera y el suelo.



2.1.4.2. Temperatura del aire

La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra producen un aumento en la temperatura del aire. Lo que en un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco (Allen et al., 2006).

2.1.4.3. Humedad relativa

El aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. La humedad relativa (HR) es la relación en porcentaje de la presión real de vapor y la presión de saturación a una misma temperatura. Aunque la presión real de vapor puede ser relativamente constante durante el día, la humedad relativa tiene un máximo en las primeras horas de la mañana y un mínimo en las primeras horas de la tarde. La variación de la humedad relativa se produce porque la presión de saturación depende de la temperatura: como la temperatura varía durante el día también el valor de la humedad relativa fluctúa (Allen et al., 2006).

2.1.4.4. Velocidad del viento

El viento promueve el transporte del aire saturado sobre la superficie evaporante, permitiendo que se retire mayor o menor cantidad de vapor de agua según su velocidad. Al remover el aire saturado permite que un aire seco se concentre sobre la superficie, dando continuidad a la evapotranspiración. La velocidad del viento es menor cerca de la superficie de evaporación y aumenta con la altura (Allen et al., 2006).



2.2. Revisión bibliográfica

2.2.1. Modelos de evapotranspiración de referencia

Varios estudios se han realizado en las últimas décadas para validar los diferentes modelos de estimación de ETo en diversas regiones y climas del mundo, por ejemplo:

García et al. (2004) compararon tres ecuaciones de evapotranspiración (FAO 56 P-M, Thornthwaite y Hargreaves) con respecto a los valores de ET obtenidos por el cultivo de hierba determinado mediante el uso de un lisímetro durante su etapa de crecimiento en 4 localidades del Altiplano (Bolivia) con el fin de validar las ecuaciones en climas de alta montaña. Los resultados mostraron mayor error en las estimaciones de ETo determinadas por la ecuación de Thornthwaite, seguida de la ecuación de Hargreaves y la ecuación de la FAO 56 P-M; además se observó la ocurrencia de mayores desviaciones cuando la única información disponible era la temperatura máxima y mínima.

Fooladmand et al. (2008) evaluaron distintas ecuaciones de Hargreaves utilizando 14 estaciones en el sur de Irán para estimaciones de ETo mensual tomando como referencia el método de la FAO 56 P-M. Los resultados mostraron que la ecuación original de Hargreaves era sólo mejor que las demás en tres estaciones con clima húmedo y bajos niveles de la velocidad del viento durante el año.

Tabari (2009) realizó la comparación de cuatro modelos de evapotranspiración (Makkink, Turc, Priestley–Taylor y Hargreaves) comúnmente utilizados en la determinación de valores de ETo mensual, con respecto al modelo de la FAO 56 P-M con el objetivo de determinar el mejor modelo para estimar la ETo mediante el uso de pocos datos de alta precisión. Para el estudio se utilizó información de 12 estaciones meteorológicas en 4 climas diferentes de Irán. En general los resultados mostraron una menor precisión de la ETo determinada por los modelos de Makkink y Priestley–Taylor mientras que una mayor precisión con los modelos de Turc y Hargreaves para todos los climas.

Martínez et al. (2009) evaluaron tres modelos de ETo basados en la temperatura (“ecuación reducida” de Penman-Monteith, Hargreaves y Turc) tomando como referencia la ecuación de la FAO 56 P-M, los modelos fueron evaluados utilizando datos mensuales de temperatura de 72 estaciones meteorológicas en Florida.



Encontraron que la ecuación reducida de Penman-Monteith y Hargreaves tienden a sobreestimar la evapotranspiración de referencia. La ecuación reducida de Penman-Monteith mostró mayor error en estaciones costeras, mientras que la ecuación de Hargreaves mostró mayor error en lugares del interior de la isla (climas húmedos). En ausencia de métodos regionalmente calibrados la ecuación de Turc resultó ser el mejor modelo para estimar la evapotranspiración de referencia utilizando la temperatura media, máxima y mínima y la radiación en Florida.

Rahimikhoob et al. (2012) evaluaron el comportamiento de cuatro ecuaciones para estimar la ETo en 8 sitios del clima subtropical en el norte de Irán, las ecuaciones fueron: Makkink, Turc, Priestley-Taylor y Hargreaves. La ecuación de la FAO 56 P-M fue elegida como estándar para la calibración y evaluación de los modelos. Se encontró buena correlación entre los valores ETo estimados por cada una de las cuatro ecuaciones empíricas y el método de la FAO 56 P-M para todos los lugares; sin embargo las ecuaciones de Makkink y Turc produjeron subestimaciones considerables. Los resultados de la comparación mostraron que antes de la calibración, las ecuaciones de Priestley-Taylor y Hargreaves son más aplicables en una región de humedad intermedia; el rendimiento de las ecuaciones de Priestley-Taylor y Hargreaves mejoraron ligeramente después de la calibración de los coeficientes específicos de la región para cada ecuación, mientras que las ecuaciones de Turc y Makkink mejoraron en gran medida.

Xu et al. (2013) también analizaron los modelos de Priestley-Taylor, Hargreaves y Turc con el propósito de mejorar el rendimiento de métodos simples en la estimación de ETo diaria en el Este de China. Los métodos fueron evaluados y calibrados por experimentos mediante lisímetros. Los resultados mostraron que el modelo de la FAO 56 P-M es el mejor método, seguido de los modelos basados en la radiación (Priestley-Taylor y Turc) y por último el modelo de Hargreaves basado en la temperatura. Como resultado también se obtuvo un buen desempeño del modelo de Turc, siendo este un buen sustituto del modelo de la FAO 56 P-M cuando se lo calibra localmente.

Samaras et al. (2013) evaluaron 18 ecuaciones basadas en la radiación. Los métodos fueron calibrados utilizando la ecuación de la FAO 56 P-M y evaluados bajo condiciones climáticas mediterráneas húmedas, subhúmedas y semiáridas en el centro de Grecia. Los resultados mostraron que todos los modelos proporcionan estimaciones relativamente precisas de la ETo. El modelo de Abtew resultó ser el de mejor rendimiento global con respecto a los datos de todas las estaciones climáticas; sin embargo se encontró que el grupo de Priestley-Taylor, Makkink y



Jensen-Haise se desempeñaron mejor que la ecuación de Abtew en el clima mediterráneo bajo condiciones de humedad relativamente alta y baja velocidad del viento.

Bogawski & Bednorz (2014) en Polonia evaluaron diferentes ecuaciones basadas en la temperatura, la radiación, el viento y ecuaciones de tanque de evaporación para estimar la ETo con respecto a la ecuación de la FAO 56 P-M. En general los resultados mostraron las mejores estimaciones con los métodos basados en la radiación (Priestley-Taylor) seguidos de las ecuaciones de Hargreaves basadas en la temperatura, los peores resultados se dieron con las ecuaciones de tanque de evaporación.

Valipour (2014) en su estudio comparó cinco métodos diferentes de Valiantzas (uno de los modelos más recientes), así como los modelos de Priestley-Taylor y Turc para determinar el mejor método bajo diferentes condiciones climáticas. Los métodos fueron evaluados por la ecuación de la FAO 56 P-M con datos meteorológicos de 181 estaciones en 31 provincias de Irán. Los resultados obtenidos mostraron que la ecuación de Valiantzas 1 es el método más preciso para las estimaciones de ETo.

2.2.2. Análisis de sensibilidad

Un análisis de sensibilidad a las perturbaciones asociadas con una o más variables climáticas es importante para mejorar la comprensión de las conexiones entre las condiciones climáticas y la variabilidad de la ETo, y entre la disponibilidad de datos y la precisión en sus estimaciones (Gong et al., 2006; Hou et al., 2013).

McKenney & Rosenberg (1993) utilizaron un enfoque de simulación para generar estimaciones de la sensibilidad de la evapotranspiración potencial (ETo) al cambio climático utilizando 8 métodos alternativos de estimación de ETo. Los métodos utilizados fueron: Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Priestley-Taylor, Penman, y Penman-Monteith. Las simulaciones se realizaron utilizando datos climáticos de cinco sitios en las Grandes Llanuras de Estado Unidos. Además se aplicaron dos escenarios derivados del cambio climático (GCM). Se encontró que los modelos poseen diferentes sensibilidades dependiendo de las variables meteorológicas de entrada en cada uno de ellos.

Goyal (2004) estudió la sensibilidad de la evapotranspiración al calentamiento global en las regiones áridas de Rajasthan (India), en su estudio se utilizó la ecuación de la FAO 56 P-M para estimar la evapotranspiración de referencia, y la



sensibilidad de la ET se analizó en términos de cambio en temperatura, radiación solar, velocidad del viento y la presión de vapor dentro de un rango posible de cambio de $\pm 20\%$ de los parámetros meteorológicos normales a largo plazo. Se encontró que la ETo era más sensible a los cambios en la temperatura seguida de la radiación solar, la velocidad del viento y la presión de vapor.

Kwon & Choi (2011) realizaron un análisis de sensibilidad para evaluar la contribución relativa de los cambios en cada variable a los de la ETo por medio de la ecuación de la FAO 56 P-M utilizando datos climáticos de un año en Corea. La sensibilidad de la ETo se calculó sobre una base mensual para los cambios en las variables individuales de la radiación solar, presión de vapor, radiación neta y velocidad del viento, mientras que otras variables se mantuvieron constantes; con el propósito de mantener la sensibilidad dentro de un cierto rango lineal, la gama de la variación para cada variable fue establecida dentro de $\pm 20\%$ al igual que en el estudio mencionado anteriormente. Los resultados mostraron una mayor sensibilidad de la ETo a la presión de vapor, la velocidad del viento, la radiación solar y radiación solar neta, en ese orden.

Yang et al. (2011) estudiaron las variaciones espaciales y temporales de la evapotranspiración por medio del modelo de la FAO 56 P-M usando la temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa y las horas de sol de 89 estaciones meteorológicas en la cuenca del río Amarillo en China. Para el análisis de sensibilidad se basaron en la metodología propuesta anteriormente por Goyal (2004) y Kwon & Choi (2011). La sensibilidad de la ETo en este lugar fue mayor a los cambios en la humedad relativa, temperatura del aire, a las horas de sol y la velocidad del viento.

Borman (2011) comparó 18 modelos diferentes de ETo, entre ellos el de la FAO 56 P-M y Priestley-Taylor con respecto a la sensibilidad al cambio climático. En el estudio se utilizó datos del clima a largo plazo de seis estaciones meteorológicas en Alemania. Los resultados mostraron que todos los modelos de ETo investigados fueron sensibles a las tendencias significativas de cambio en los datos en el clima, además que todos los modelos mostraron diferentes sensibilidades.



Por medio de esta revisión se pudo conocer, principalmente, que los modelos de Hargreaves y Priestley-Taylor han sido evaluados con mayor frecuencia debido a que son modelos comúnmente utilizados en todo el mundo (McKenney & Rosenberg, 1993). Uno de los modelos más recientes es la ecuación de Valiantzas, que ha demostrado ser el método más preciso para estimar la ETo (Valiantzas, 2013; Valipour, 2014) luego del modelo de la FAO 56 P-M.

Sin embargo no se han encontrado estudios en el páramo que validen las estimaciones por estos tres métodos, ni el impacto que tienen las variables meteorológicas de entrada a cada uno de ellos en la ETo. Por lo que ésta tesis tiene como objetivo evaluar el desempeño de estos modelos (Hargreaves, Priestley-Taylor y Valiantzas) frente a la ecuación de la FAO 56 P-M y determinar el impacto que tienen las variables meteorológicas en cada uno, con el fin de disminuir la incertidumbre y mejorar la comprensión de las relaciones entre las condiciones climáticas y la variabilidad de la ETo, así como entre la disponibilidad de datos y la precisión en las estimaciones de la ETo.

3. Métodos y materiales

3.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la microcuenca del río Quinuas (Fig. 1), ubicada al sur del Ecuador en la provincia del Azuay; con un área de 9408 ha, es parte del complejo de micro cuencas del Parque Nacional Cajas (PNC). La microcuenca del Quinuas es el segundo aporte más importante de efluentes al río Tomebamba de gran importancia para la ciudad de Cuenca con 106 cuerpos de agua que nacen en este lugar (Carrasco et al., 2013).

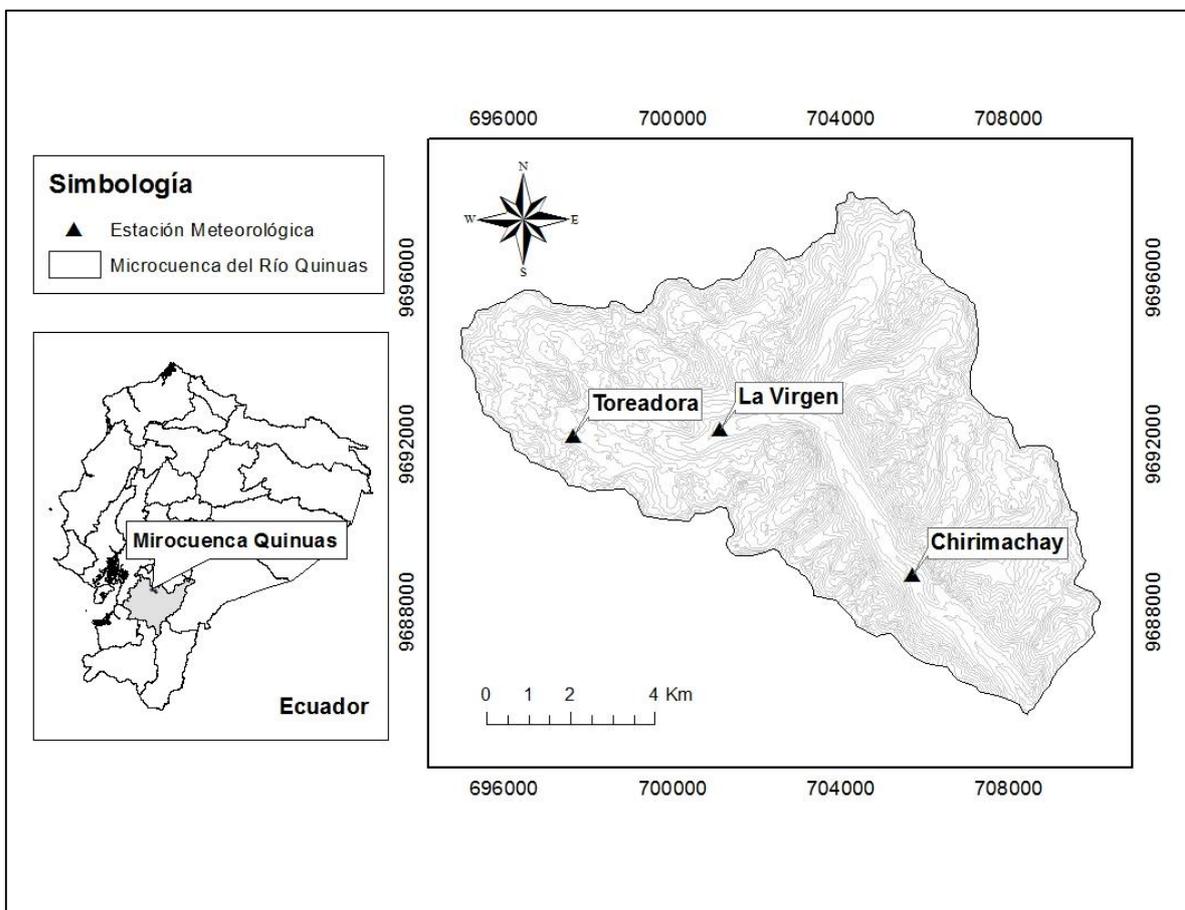


Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

3.2. Datos

El estudio se realizó con datos recolectados durante el periodo de un año, entre agosto del 2013 y julio del 2014. Los datos meteorológicos fueron obtenidos de tres estaciones automáticas pertenecientes al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHiCA) de la Universidad de Cuenca, las cuales se encuentran ubicadas en un transecto longitudinal a diferentes elevaciones (Fig. 1).

Con el fin de estudiar el clima del área de estudio a diferentes niveles altitudinales, las estaciones se encuentran a una diferencia aproximada de 300 m de altura entre cada una. Las estaciones registran valores de temperatura promedio (T), temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$), temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$), humedad relativa promedio (HR), humedad relativa máxima ($HR_{\text{máx}}$), humedad relativa mínima ($HR_{\text{mín}}$), velocidad del viento (u), radiación solar (R_s) y presión atmosférica (P). La información relativa a los sitios, y los valores de las variables climáticas durante el año de estudio se muestran en la Tabla 1.

Todas las mediciones se realizaron a una altura de 2 m sobre el nivel del suelo. Las estaciones se encuentran equipadas con los siguientes sensores: para medir la temperatura y la humedad relativa se utilizó un sensor de temperatura y humedad relativa (CS2150 Temperature and Relative Humidity probe, Campbell Scientific), para la velocidad del viento un anemómetro (MetOne 034B Windset, Campbell Scientific), para la radiación solar o de onda corta un piranómetro (CS300, Campbell Scientific) y para la presión atmosférica un barómetro (VAISALA PTB110). Los datos recopilados fueron tomados cada 5 minutos por los diferentes equipos.

Tabla 1. Características geográficas y climáticas anuales de los lugares de estudio durante el periodo agosto 2013 – julio 2014.

Estación	UTM X	UTM Y	Altitud (m)	T máx. (°C)	T (°C)	T mín. (°C)	HR (%)	u (m/s)	R _s (MJ/m ² día)
Chirimachay	705703	9688895	3314	18.57	8.72	-0.75	92.27	1.66	10.50
Virgen	701110	9692382	3655	15.56	6.55	-2.85	89.39	1.69	11.96
Toreadora	697618	9692227	3965	17.21	5.36	-1.70	90.65	2.21	11.91

Con los datos obtenidos de las tres estaciones meteorológicas, se describió el clima del lugar de estudio. La variabilidad climática a lo largo del año en Chirimachay, la Virgen y la Toreadora en cuanto a la temperatura, radiación solar, humedad relativa y la velocidad del viento se ilustra en la Figura 2.

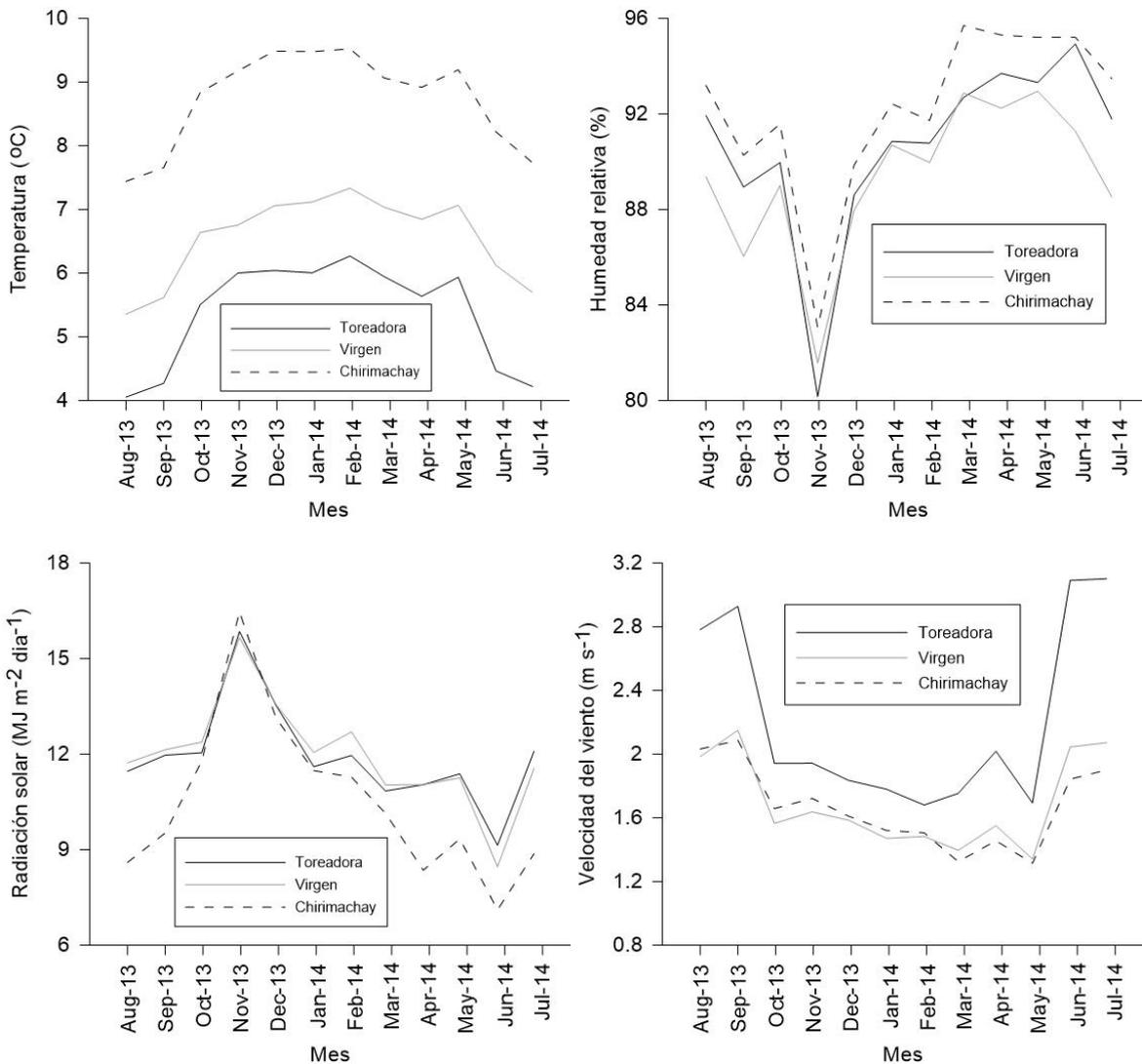


Figura 2. Variación mensual de las variables meteorológicas en el lugar de estudio durante el periodo agosto 2013 - julio 2014.

En la Figura 2 se observa que las variables meteorológicas presentan pequeñas fluctuaciones a lo largo del año, con un patrón similar en las tres estaciones. En cuanto a la temperatura, los valores máximos se registran en febrero mientras que las temperaturas mínimas se registran en agosto. La humedad relativa es mayor en el periodo de marzo a junio, y esta disminuye significativamente en noviembre. Se registraron los mayores valores de velocidad del viento en junio en la Toreadora, y en septiembre en la Virgen y Chirimachay. La radiación solar fue mayor en noviembre y la misma tuvo menor incidencia en junio.



Para obtener las estimaciones de ET_o , se promediaron los valores de: temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y presión atmosférica cada 5 minutos, en dos escalas de agrupación: diaria y mensual. Los promedios de las variables meteorológicas se los realizó para cada una de las estaciones, para estimar los valores de ET_o se aplicaron las ecuaciones descritas en la sección 3.3.

3.3. Métodos de estimación de evapotranspiración

Los modelos empíricos de ET_o generalmente se basan en datos micrometeorológicos tales como la temperatura del aire, la radiación, la velocidad del viento y la humedad (Rahimikhoob et al., 2012). De la gran variedad de modelos usados para estimar la ET_o , tres ecuaciones fueron elegidas para evaluar en esta tesis: Hargreaves (HG), Priestley-Taylor (P-T) y Valiantzas (V). Como ya se ha mencionado anteriormente la ecuación de la FAO 56 P-M es el único método estandarizado para estimar la ET_o a partir de datos meteorológicos (Allen et al., 2006), por lo que este método será utilizado como referente para evaluar los modelos antes mencionados.

A continuación en la sección 3.3.1, sección 3.3.2, sección 3.3.3 y sección 3.3.4 se presentan los procedimientos para estimar la ET_o por cada uno de los modelos.

3.3.1. Método de la FAO 56 Penman-Monteith (FAO 56 P-M)

El modelo de Penman-Monteith incorpora aspectos termodinámicos y aerodinámicos con lo que ha demostrado ser un método muy preciso para estimar la ET_o en cualquier lugar (Allen et al., 2006). Sin embargo el mayor limitante para el uso de éste modelo es que requiere una gran cantidad de datos meteorológicos, limitando su uso en lugares donde estos no se encuentran disponibles. La forma del método de la FAO 56 P-M es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

Donde

- ET_o : evapotranspiración del cultivo de referencia [mm dia^{-1}],
- R_n : radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$],

- G: flujo del calor de suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],
- T: temperatura media del aire a 2 m de altura [$^{\circ}\text{C}$],
- u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura [ms^{-1}],
- e_s : presión de vapor de saturación [kPa],
- e_a : presión real de vapor [kPa],
- $e_s - e_a$: déficit de presión de vapor [kPa],
- Δ : pendiente de la curva de presión de vapor [$\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$],
- Y: constante psicrométrica [$\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Los valores de Δ , R_n , G, Y, e_s y e_a fueron calculados usando las ecuaciones dadas por Allen et al. (2006) en el estudio de la FAO riego y drenaje 56:

- **Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ):**

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (2)$$

- **Flujo de calor del suelo (G):**

$$G_{mes,i} = 0,07 (T_{mes,i+1} - T_{mes,i-1}) \quad (3)$$

$$G_{día} = 0$$

Donde

- $T_{mes, i}$: temperatura media del aire en el mes i [$^{\circ}\text{C}$],
- $T_{mes, i-1}$: temperatura media del aire en el mes i -1 [$^{\circ}\text{C}$],
- $T_{mes, i+1}$: temperatura media del aire en el mes i +1 [$^{\circ}\text{C}$].

- **Constante Psicrométrica (Y):**

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} P \quad (4)$$

Donde

P: presión atmosférica [kPa].

- **Presión media de vapor de la saturación (e_s):**

$$e^\circ(T) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right] \quad (5)$$

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (6)$$

Donde

$e^\circ(T)$: presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T [kPa].

- **Presión real de vapor (e_a) derivada de datos de humedad relativa:**

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{min}) \frac{HR_{max}}{100} + e^\circ(T_{max}) \frac{HR_{min}}{100}}{2} \quad (7)$$

Donde

- $e^\circ(T_{min})$: presión de saturación de vapor a la temperatura mínima [kPa],
- $e^\circ(T_{max})$ presión de saturación de vapor a la temperatura máxima [kPa],
- HR_{max} humedad relativa máxima [%],
- HR_{min} humedad relativa mínima [%].

- **Radiación extraterrestre para periodos diarios (R_a):**

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (8)$$

Donde

- R_a : radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]
- G_{sc} : constante solar = $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$,
- d_r : distancia relativa inversa Tierra-Sol,
- ω_s : ángulo de radiación a la puesta del sol [rad],
- ϕ : latitud [rad],
- δ : declinación solar [rad].



$$[\text{radianes}] = \left[\frac{\pi}{180} \right] [\text{grados decimales}] \quad (9)$$

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (10)$$

$$\delta = 0,409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad (11)$$

Donde J es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{-\tan(\varphi)\tan(\delta)}{X^{0,5}}\right] \quad (12)$$

Donde

$$X = 1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2 \quad (13)$$

$$y X = 0,00001 \text{ si } X \leq 0$$

- **Radiación solar en un día despejado (R_{so}):**

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * z) * R_a \quad (14)$$

Donde

- R_{so} : radiación solar en un día despejado [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],
- z: elevación de la estación sobre el nivel del mar [m].

- **Radiación neta solar o de onda corta (R_{ns}):**

$$R_{ns} = 0,77 * R_s \quad (15)$$

Donde

- R_{ns} : radiación neta solar o de onda corta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],
- R_s : radiación solar entrante [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$].

- **Radiación neta de onda larga (R_{nl}):**

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K^4} + T_{min,K^4}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (16)$$

Donde

- R_{nl} : radiación neta de onda larga [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],
- σ constante de Stefan-Boltzmann [$4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],
- T_{max} , K: temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$],
- T_{min} , K: temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$],
- R_s/R_{so} radiación relativa de onda corta (valores $\leq 1,0$).

- **Radiación neta (R_n):**

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (17)$$

3.3.2. Método de Hargreaves (HG)

La ecuación de Hargreaves es considerada una de las más simples y prácticas entre las ecuaciones de ET_o , ya que solamente se requieren valores de la temperatura del aire generalmente disponibles en la mayoría de estaciones meteorológicas de todo el mundo (Droogers & Allen, 2002). La radiación extraterrestre también puede ser calculada para un determinado día y lugar por lo que únicamente se requieren observaciones de la temperatura.

Cuando no se tiene disponibilidad de datos meteorológicos de radiación solar, humedad relativa o velocidad del viento; Allen et al. (2006) recomienda como alternativa el uso de la ecuación de Hargreaves para determinar la ET_o . Aunque este método tiene un mejor comportamiento para predicciones semanales o periodos más largos, algunas estimaciones precisas de ET_o diaria también se han reportado en la literatura (Hargreaves & Allen 2003).

La forma de la ecuación de Hargreaves presentada en el documento de la FAO riego y drenaje 56 por Allen et al. (2006) es la siguiente:

$$ET_o = 0.408 * 0.0023(T + 17.8)(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0.5} R_a \quad (18)$$

Donde

- ET_o : evapotranspiración del cultivo de referencia [mm dia^{-1}],
- T : temperatura media del aire a 2 m de altura [$^{\circ}\text{C}$],
- T_{max} : temperatura máxima del aire [$^{\circ}\text{C}$],
- T_{min} : temperatura mínima del aire [$^{\circ}\text{C}$],
- R_a : radiación extraterrestre (ecuación 8) [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$].

3.3.3. Método de Priestley-Taylor (P-T)

Priestley & Taylor (1972) demostraron que, cuando grandes áreas de tierra se saturan, la radiación neta es el factor dominante que afecta la evapotranspiración. Ellos demostraron que en condiciones de equilibrio, el término transferencia de advección o masa (aerodinámica) de la ecuación original de Penman tiende hacia una fracción constante del término radiación. La ecuación de acuerdo con Priestley & Taylor (1972) tiene la siguiente forma:

$$ET_o = 0.408 \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (19)$$

Donde

- ET_o : evapotranspiración del cultivo de referencia [mm dia^{-1}],
- α : es un coeficiente empírico equivalente a 1,26 [adimensional],
- R_n : radiación neta en la superficie del cultivo (ecuación 17) [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$],
- G : flujo del calor de suelo (ecuación 3) [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$],
- Δ : pendiente de la curva de presión de vapor (ecuación 2) [$\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$],
- γ : constante psicrométrica (ecuación 4) [$\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$].

3.3.4. Método de Valiantzas (V)

La ecuación de Valiantzas es una de las ecuaciones más recientes que se han desarrollado para estimar la ETo a partir de datos meteorológicos. Valiantzas (2013) derivó una expresión algebraica simple equivalente en precisión al modelo de la FAO 56 P-M para el cálculo de la ETo, el cálculo de estos valores por la nueva fórmula es fácil de usar para aplicaciones hidrológicas habituales que requieren registros meteorológicos de rutina por lo general disponibles en las estaciones meteorológicas estándar; la ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} ETo = & 0.05(1-\alpha)R_s\sqrt{T+9.5} - 0.188(T+13)\left(\frac{R_s}{R_a} - 0.194\right)\left(1 - 0.00015(T+45)^2\sqrt{\frac{HR}{100}}\right) \\ & - 0.0165R_su^{0.7} + 0.0585(T+17)u^{0.75} \\ & \times \frac{\left((1 + 0.00043 \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^2)^2 - \frac{HR}{100}\right)}{(1 + 0.00043 \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^2)} \\ & + 0.0001z \end{aligned} \quad (20)$$

Donde

- ETo: evapotranspiración del cultivo de referencia [mm día⁻¹],
- α : 0,23 [adimensional],
- T: temperatura media del aire a 2 m de altura [°C],
- T_{max}: temperatura máxima del aire [°C],
- T_{min}: temperatura mínima del aire [°C],
- R_s: radiación solar entrante [MJ m⁻² día⁻¹],
- R_a: radiación extraterrestre (ecuación 8) [MJ m⁻² día⁻¹].
- HR: humedad relativa media [%],
- z: elevación de la estación sobre el nivel del mar [m].

3.4. Análisis estadístico

Los índices estadísticos utilizados para evaluar el desempeño de los diferentes modelos fueron: el coeficiente de determinación (R²), error medio cuadrático (RMSE), error medio absoluto (MAE) y error de medio sesgo (MBE); usados comúnmente para la calibración y validación de métodos de estimación de evapotranspiración de referencia (ej. Martínez et al., 2009; Rahimikhoob et al., 2012; Tabari et al., 2011; Tabari, 2009; Xu et al., 2013).

- Error medio cuadrático (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (\text{mm día}^{-1}) \quad (21)$$

- Error medio absoluto (MAE):

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{n} \quad (\text{mm día}^{-1}) \quad (22)$$

- Error medio sesgo (MBE):

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)}{n} \quad (\text{mm día}^{-1}) \quad (23)$$

- Coeficiente de determinación (R^2):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (24)$$

Donde

- n : es el número de estimaciones diarias o mensuales,
- y_i : es la ETo estimada a partir de una de las ecuaciones a evaluar (Hargreaves, Priestley-Taylor o Valiantzas),
- x_i : es la ETo estimada mediante la ecuación de la FAO 56 P-M.

El coeficiente de determinación R^2 oscila entre 0 y 1, siendo 1 el valor óptimo. Para obtener una buena estimación de la ETo por medio de los modelos (Hargreaves, Priestley-Taylor o Valiantzas) se recomienda que el valor de R^2 debe ser mayor a 0.7 y que la pendiente de la recta "b" este dentro del rango $0.7 < b < 1.3$, lo que indica buena correlación entre los datos y la suficiente homogeneidad como para sustituir el modelo.

RMSE es la desviación estándar de los residuales y es un indicador de la fiabilidad de la predicción.



MAE mide la magnitud promedio de los errores en un conjunto de pronósticos, es la media de la muestra de verificación de los valores absolutos de las diferencias entre los valores estimados y los de referencia.

MBE es la suma de los residuos. La desviación de cero implica que la estimación sobreestima o subestima los valores en comparación con lo observado.

3.5. Análisis de sensibilidad

Una forma sencilla, pero práctica de presentar un análisis de sensibilidad es graficar los cambios relativos de una variable dependiente frente a los cambios relativos de un conjunto independiente de variables denotado como el método de “curva de sensibilidad” (Gong et al., 2006; Goyal, 2004; McKenney & Rosenberg, 1993).

Para determinar el impacto de las variables meteorológicas en las estimaciones de la ETo en cada uno de los modelos, se siguió la metodología propuesta por: Goyal (2004), Kwon & Choi (2011) y Yang et al. (2011).

El análisis de sensibilidad se lo realizó en base a los cambios de los promedios diarios de las variables meteorológicas. El procedimiento se describe a continuación:

1. Se calculó el valor promedio diario anual de las variables meteorológicas (T , $T_{\text{máx}}$, $T_{\text{mín}}$, HR , $HR_{\text{máx}}$, $HR_{\text{mín}}$, u y R_s) correspondientes a cada estación durante el periodo de estudio (agosto 2013 – julio 2014).
2. Con los valores promedio de las variables meteorológicas se estimó la ETo para cada estación por medio de los diferentes modelos (FAO 56 P-M, Hargreaves, Priestley-Taylor y Valiantzas). Estos valores fueron usados como referencia.
3. Se generaron perturbaciones en los promedios de las variables meteorológicas. Con el fin de mantener los cambios dentro de un mismo rango estos se los realizó entre un $\pm 20\%$ de los valores iniciales.
4. Se calcularon los nuevos valores de ETo por los diferentes modelos introduciendo las perturbaciones de las variables una a la vez mientras que las demás se mantuvieron constantes.

4. Resultados y discusión

4.1. Estimaciones de evapotranspiración de referencia

Mediante los procedimientos descritos en la sección 3.3 se estimó la ETo con los promedios diarios y mensuales de las variables meteorológicas, estos valores conocidos comúnmente en la literatura como ETo diaria y ETo mensual, respectivamente. Los valores se obtuvieron para cada una de las estaciones (Tabla 1), durante el periodo agosto 2013 – julio 2014. La tabla de los valores de ETo obtenidos por los diferentes modelos se muestra en el Anexo 1.

Los valores de referencia fueron calculados por la ecuación de la FAO 56 P-M cuyos resultados se comparan con los obtenidos por los otros métodos. Según el modelo de referencia, se encontró que la ETo total durante el año fue mayor en la Virgen (736,46 mm/año), seguida de la Toreadora (714,61 mm/año) y Chirimachay (702,33 mm/año). Se observó que no existe una estacionalidad marcada de la ETo, mostrando una ligera variabilidad entre todos los meses del año. Para todas las estaciones, se registra el mayor pico de ETo en el mes de noviembre y el menor en el mes de junio (Figura 3).

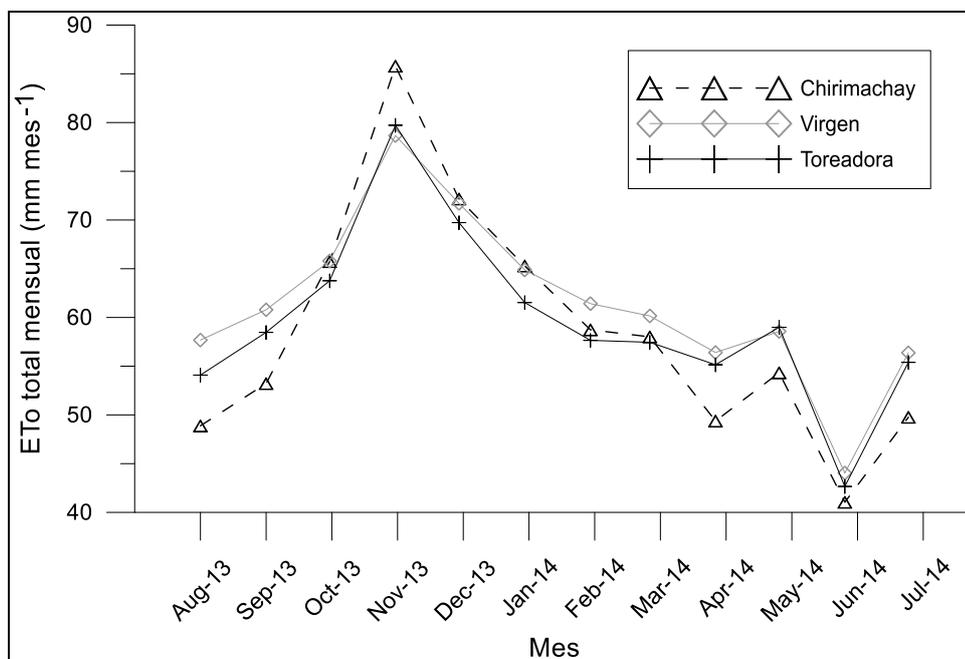
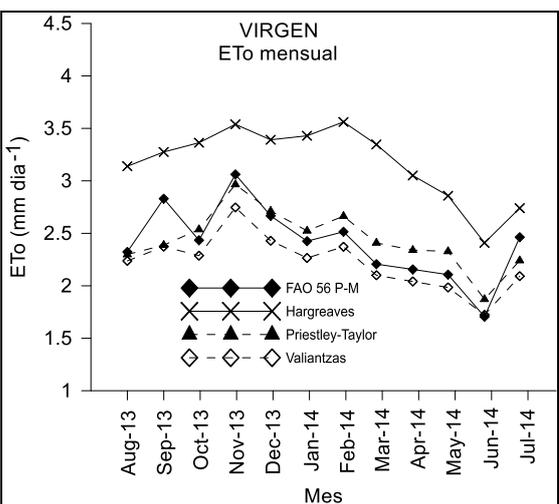
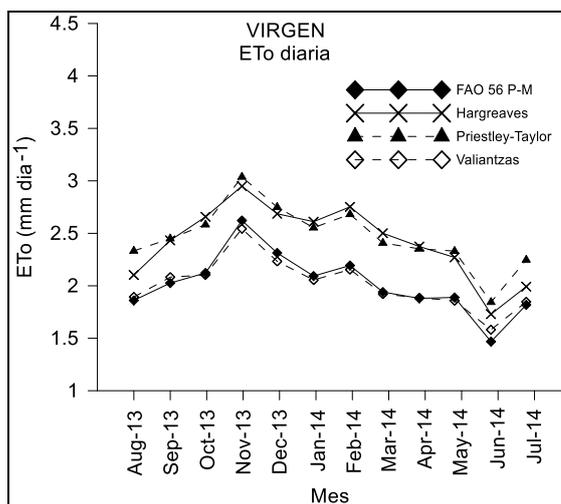
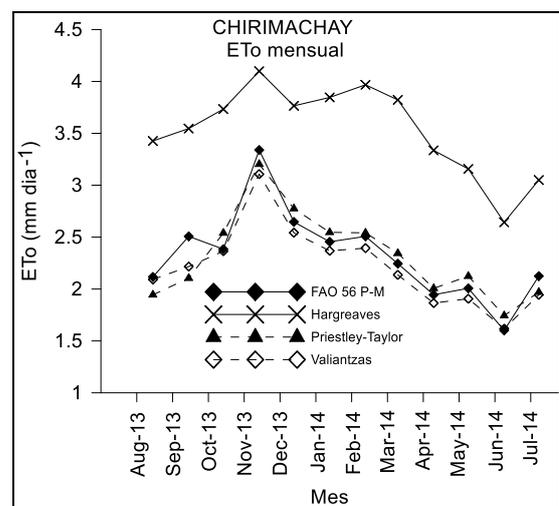
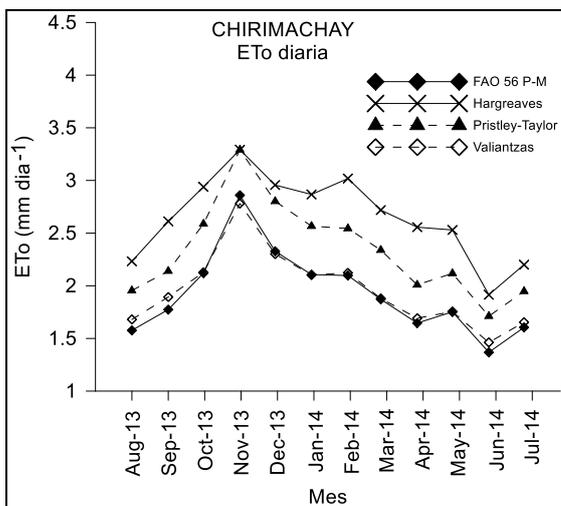


Figura 3. Variabilidad mensual de la ETo determinada por el modelo de la FAO 56 P-M.

La variabilidad temporal de la ETo estimada por los diferentes modelos durante el año de estudio se ilustra en la Figura 4. Para una mejor apreciación de los resultados, se promediaron las estimaciones de ETo diaria para cada uno de los meses del año.



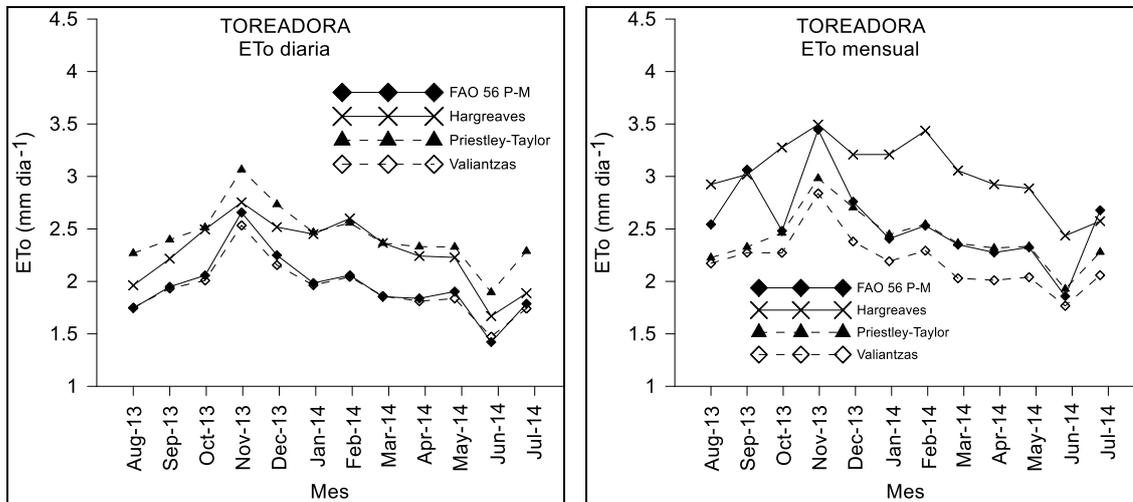
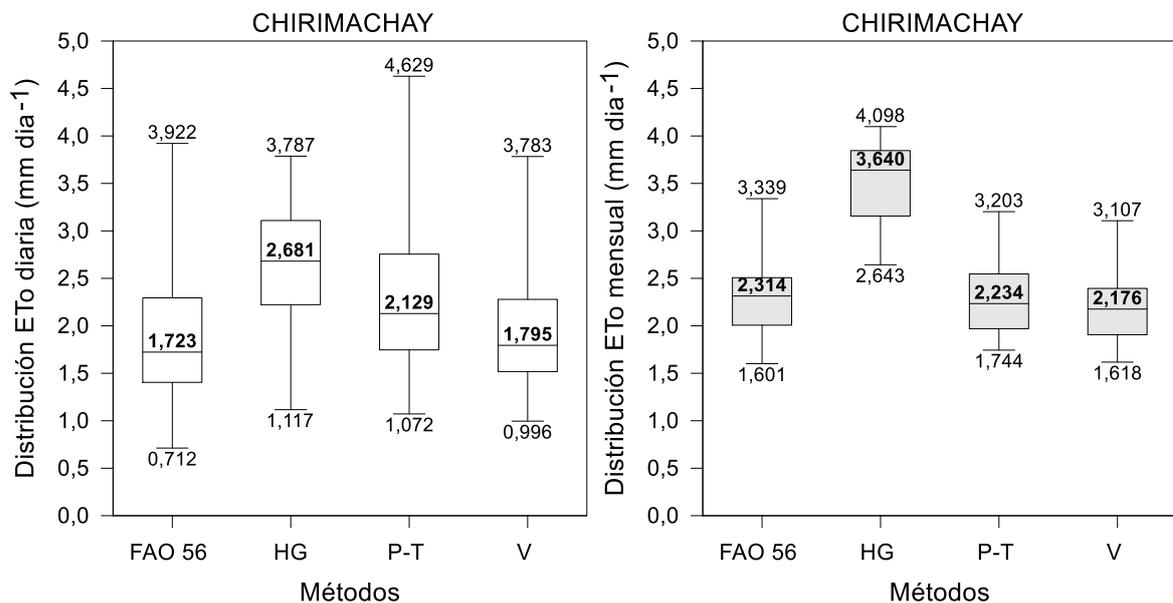


Figura 4. Variabilidad mensual de los modelos de ETo.

En la Figura 4 se observa que para cálculos diarios, existe una sobreestimación de la ETo con los modelos de Hargreaves y Priestley-Taylor en las tres estaciones. La sobreestimación por Hargreaves es aún más marcada para cálculos mensuales, produciendo mayores estimaciones en Chirimachay; a su vez la ecuación de Valiantzas subestimó la ETo en mayor medida en la Virgen y la Toreadora.

Para ilustrar de mejor manera la distribución de los valores de ETo determinados por los cuatro modelos se realizó un diagrama de cajas Figura 5.



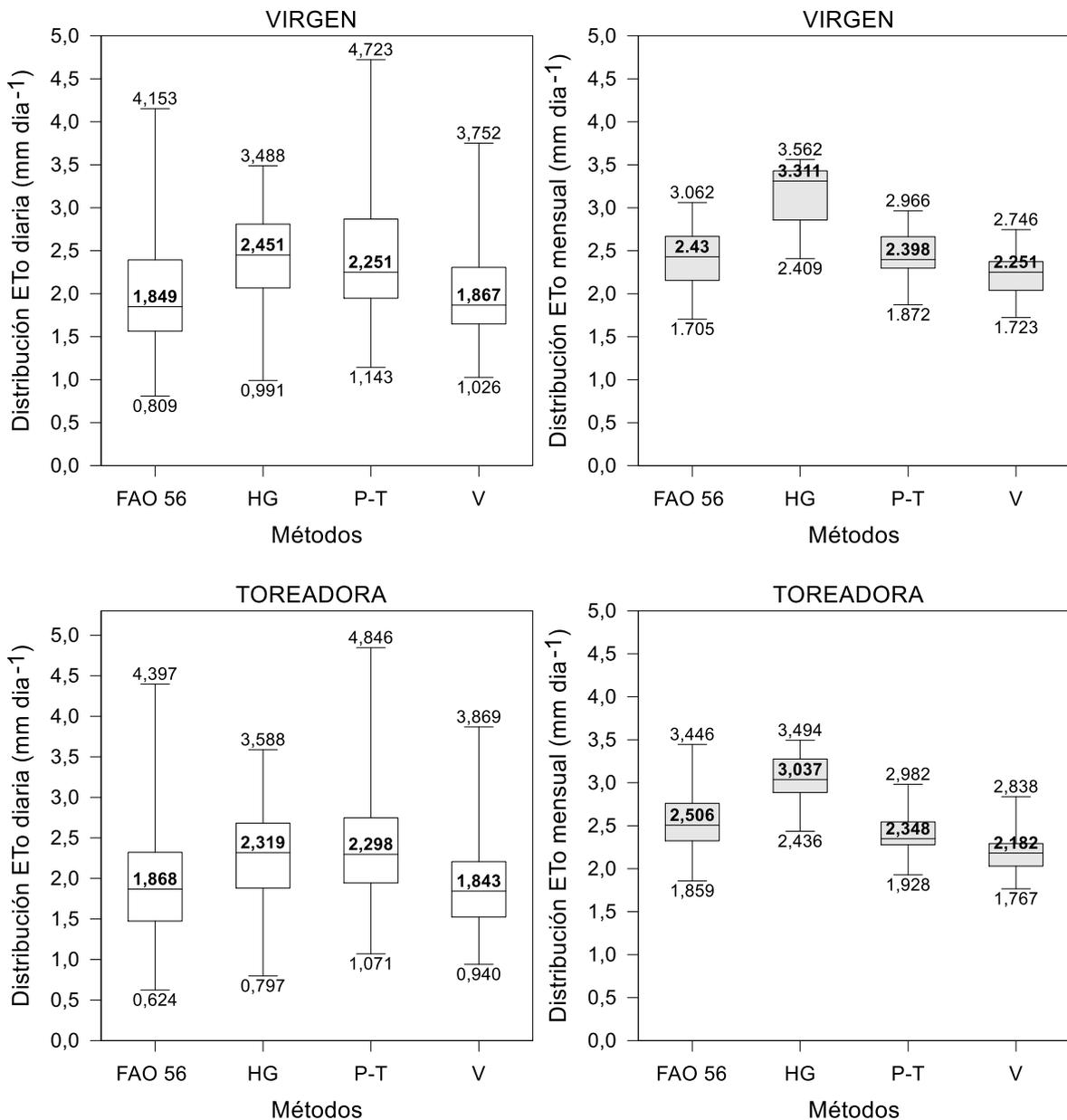


Figura 5. Diagrama de cajas de la distribución de la ETo diaria y mensual. Cada una de las cajas encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0.25 y 0.75 y la línea central es la media, los extremos indican los valores máximos y mínimos.

El diagrama de cajas (Fig. 5) muestra que la ETo tanto en estimaciones diarias como mensuales determinada por Hargreaves difiere en mayor medida de los otros modelos. Mientras que las estimaciones diarias de ETo por el método de Valiantzas son similares a las determinadas por la FAO 56 P-M, no así para estimaciones mensuales donde los valores de ETo obtenidos por Priestley-Taylor son los que más se acercan al modelo de la FAO 56 P-M entre los cuartiles 0.25 y 0.75.



Los valores máximos de ETo para cálculos diarios fueron obtenidos por la ecuación de Priestley-Taylor con un valor máximo en la Toreadora de 4.846 mm/día; los valores mínimos fueron calculados por la ecuación de la FAO 56 P-M registrándose el menor valor de igual manera en la Toreadora con 0.624 mm/día.

En las estimaciones mensuales, los valores máximos fueron obtenidos por la ecuación de Hargreaves, registrándose el mayor valor en Chirimachay con 4.098 mm/día. Por la ecuación de la FAO 56 P-M se obtuvieron los menores valores de ETo mensual registrándose un valor de 1.601 y 1.705 mm/día en Chirimachay y la Virgen respectivamente; sin embargo para la Toreadora el valor mínimo se registró con el método de Valiantzas con un valor de 1.767 mm/día.

La media muestra que los valores de ETo diaria y mensual determinados por Hargreaves se mantienen por encima de los otros modelos en todas las estaciones. Además se observa que la distribución de los valores de ETo determinada por todos los modelos para estimaciones mensuales es menor que para estimaciones diarias, reduciéndose ésta distribución a medida que aumenta la altura, especialmente en las estimaciones mensuales.

4.2. Análisis estadístico y correlacional de los modelos de ETo

Las estimaciones de ETo diaria y mensual obtenidas por las ecuaciones de HG, P-T y V en la sección 4.1 fueron comparadas con las estimaciones de la FAO 56 P-M mediante el análisis estadístico propuesto en la sección 3.4.

4.2.1. Comparación de los modelos de ETo en estimaciones diarias

Se encontró que las ecuaciones de HG y P-T tienden a sobreestimar la ETo en todas las estaciones. La primera sobreestimó la ETo particularmente en la zona de menor altitud (Chirimachay), y la segunda, en la de mayor altitud (Toreadora).

Por otro lado, se observó que en las tres estaciones la ecuación de HG produjo una mayor dispersión en las estimaciones, en comparación con las otras ecuaciones. Mientras que con el modelo de Valiantzas se obtuvieron los mejores resultados mostrando errores muy bajos y valores de dispersión muy cercanos a la unidad.

El resumen estadístico de la comparación entre la ETo diaria estimada por el método de la FAO 56 P-M y por los tres modelos empíricos se presenta en la Tabla 2 y 3.

Tabla 2. Análisis estadístico de la comparación entre las estimaciones de ETo diaria determinada por los diferentes modelos y los de la FAO 56 P-M.

Método	Estación	R ²	RMSE (mm/día)	MAE (mm/día)	MBE (mm/día)
Hargreaves (HG)	Chirimachay	0.742	0.816	0.743	0.727
	Virgen	0.682	0.536	0.472	0.402
	Toreadora	0.722	0.480	0.423	0.322
Priestley–Taylor (P-T)	Chirimachay	0.983	0.428	0.409	0.409
	Virgen	0.974	0.467	0.445	0.445
	Toreadora	0.960	0.496	0.477	0.476
Valiantzas (V)	Chirimachay	0.986	0.140	0.114	0.029
	Virgen	0.979	0.143	0.111	-0.006
	Toreadora	0.984	0.158	0.121	-0.033

En la Tabla 2 se observa que los errores en las estimaciones de ETo con los modelos de P-T y V presentan una ligera variabilidad entre las estaciones, tendiendo a incrementarse estos a medida que aumenta la altitud. Mientras que con el modelo de HG la variabilidad de los errores entre las tres estaciones es mucho mayor, incrementándose estos a medida que disminuye la elevación. La disminución en los errores con HG, se explica debido a que el modelo tiene como variable principal a la temperatura (Fooladmand et al., 2008; Garcia et al., 2004; Martinez et al., 2009; Rahimikhoob et al., 2012; Xu et al., 2013), resultando en estimaciones mayores de ETo cuando la temperatura es mayor y reduciéndose las mismas a medida que disminuye la temperatura con el aumento en la elevación ver Tabla 1.

Tabla 3. Valores promedio del análisis estadístico de la ETo diaria.

Método	R ²	RMSE (mm/día)	RMSE (%)	MAE (mm/día)	MAE (%)	MBE (mm/día)	MBE (%)
Hargreaves (HG)	0.713	0.611	31.07	0.546	27.76	0.484	24.61
Priestley-Taylor (P-T)	0.970	0.464	23.59	0.444	22.58	0.443	22.53
Valiantzas (V)	0.983	0.147	7.47	0.115	5.85	-0.003	-0.15

Hargreaves con el coeficiente de determinación más bajo ($R^2 = 0.713$) y con los errores más altos (RMSE = 0.611 mm/día, MAE: 0.546 mm/día y MBE: 0.484 mm/día) (Tabla 3) entre los modelos; resultó ser el peor método para estimar la ETo diaria, sobreestimándola entre un 14.14 % en la Toreadora hasta un 27.41 % en Chirimachay. Una de las razones por las que el modelo de Hargreaves sobreestima



en gran medida la ETo se debe a que la ecuación no considera el aspecto aerodinámico (la humedad y la velocidad del viento) (García et al., 2004), de gran importancia en este ecosistema debido a que se registran valores altos de humedad relativa durante todo el año (ver Figura 2), el cual representa un factor limitante en la ETo (Allen et al., 2006). Otra razón, es que Hargreaves utiliza la Ra para estimar la Rs por medio de la amplitud térmica, estos podrían generar valores elevados de ETo debido a la cercanía del lugar de estudio a la línea equinoccial, donde existe una mayor incidencia de la Ra (García et al., 2004). Estos resultados concuerdan con estudios previos, como los realizados por Xu et al. (2013) y Bogawski & Bednorz (2014) quienes encontraron un pobre desempeño del modelo de Hargreaves, sobreestimando la ETo diaria en climas húmedos y con bajos niveles de velocidad de viento. Por otro lado, Rahimikhoob et al. (2012) encontró un mejor desempeño del modelo en regiones con humedad intermedia.

Mejores estimaciones se determinaron con el modelo de Priestley-Taylor (RMSE = 0.464 mm/día, MAE: 0.444 mm/día y MBE: 0.443 mm/día) (Tabla 3) este sobreestimó la ETo desde un 17.53 % en Chirimachay hasta un 19.55 % en la Toreadora; sin embargo se encontró un óptimo coeficiente de correlación ($R^2 = 0.970$). Estos resultados de igual manera están de acuerdo con los encontrados por Rahimikhoob et al. (2012), Xu et al. (2013) y Bogawski & Bednorz (2014) quienes encontraron menores errores en las estimaciones de ETo en comparación al modelo de Hargreaves, con un R^2 mayor a 0.9 en climas con una humedad relativamente alta y valores de velocidad de viento bajos.

Las mejores estimaciones, fueron determinadas por la ecuación de Valiantzas con un coeficiente de determinación muy cercano a la unidad ($R^2 = 0.983$), similares a los reportados por Valiantzas (2013) y con errores bajos (RMSE = 0.147 mm/día, MAE: 0.115 mm/día y MBE: -0.003 mm/día) (Tabla 3); produciendo una ligera sobreestimación en Chirimachay en un 1.47 %, y una subestimación en la Virgen y la Toreadora en un 0.29 % y 1.71 % respectivamente. Aunque la ecuación de Valiantzas es el mejor método para estimaciones diarias, este requiere al igual que el modelo de la FAO 56 P-M valores de temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, lo que podría limitar su uso.

En la Figura 6 se ilustra la correlación entre las estimaciones de ETo por los modelos empíricos y el de la FAO 56 P-M en la gradiente altitudinal.

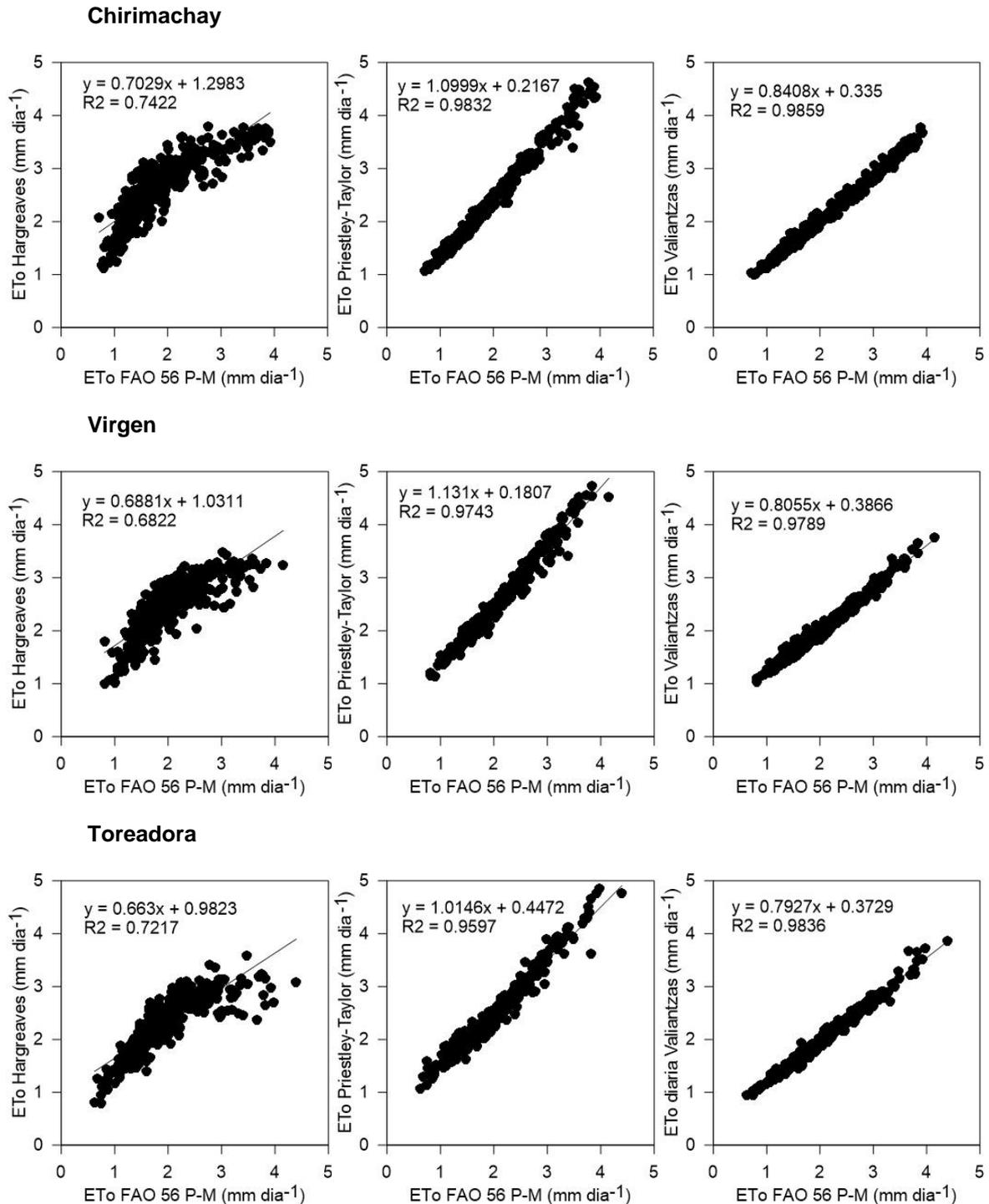


Figura 6. Comportamiento de la ETo diaria de los diferentes modelos frente a la ecuación de la FAO 56 P-M.

Como se ve en la Figura 6 los métodos de Priestley-Taylor y Valiantzas estimaron muy bien la ETo, mostrando valores bien distribuidos a lo largo de la línea 1:1 con un R^2 mayor a 0.95 en todas las estaciones. Como se ve a partir de los gráficos de dispersión, la ubicación del sitio tiene poco efecto sobre el rendimiento de cada ecuación. Esto indica que las diferencias entre las ecuaciones en lugar de las diferencias en los datos recogidos en cada estación son los que dominan las estimaciones ETo. Sin embargo se observa que existe una mejor correlación en las estimaciones de todos los modelos en la estación de menor altura (Chirimachay).

4.2.2. Comparación de los modelos de ETo en estimaciones mensuales

Para estimaciones mensuales, la ecuación de HG sobreestimó la ETo en mayor magnitud que para cálculos diarios, mientras que la ecuación de V subestimó ésta en todas las estaciones. P-T fue la ecuación que menores errores mostró entre los modelos. Los coeficientes de determinación (Figura 7) obtenidos por HG y P-T son muy bajos en comparación a los obtenidos con la ecuación de Valiantzas.

El resumen estadístico de la comparación entre la ETo mensual estimada por el método de la FAO 56 P-M y por los tres modelos empíricos en los tres lugares de la microcuenca del río Quinuas se presenta en la Tabla 3.

Tabla 4. Análisis estadístico de la comparación entre las estimaciones de ETo mensual determinada por los diferentes modelos y los de la FAO 56 P-M.

Método	Estación	R^2	RMSE (mm/día)	MAE (mm/día)	MBE (mm/día)
Hargreaves (HG)	Chirimachay	0.708	1.232	1.210	1.210
	Virgen	0.527	0.807	0.768	0.768
	Toreadora	0.326	0.579	0.502	0.477
Priestley-Taylor (P-T)	Chirimachay	0.842	0.167	0.141	-0.003
	Virgen	0.686	0.194	0.163	0.032
	Toreadora	0.594	0.293	0.182	-0.150
Valiantzas (V)	Chirimachay	0.967	0.139	0.113	-0.110
	Virgen	0.905	0.227	0.190	-0.187
	Toreadora	0.804	0.416	0.366	-0.366

En la Tabla 4 se observa que al igual que en las estimaciones diarias, los errores encontrados con los diferentes modelos tienen el mismo comportamiento en función de la gradiente altitudinal. Sin embargo en las estimaciones mensuales la variabilidad de los errores entre las estaciones es mayor. El incremento de los



errores en todos los modelos en comparación con las estimaciones diarias se debe a que según Allen et al. (2006), el cálculo diario es más exacto que el mensual debido a que puede haber días con valores excepcionales en las variables meteorológicas, los cuales no son presentados por una media mensual y estos inducen a errores en el cálculo de la ETo.

Tabla 5. Valores promedio del análisis estadístico de la ETo mensual.

Método	R ²	RMSE (mm/día)	RMSE (%)	MAE (mm/día)	MAE (%)	MBE (mm/día)	MBE (%)
Hargreaves (HG)	0.520	0.873	35.92	0.826	33.99	0.818	33.66
Priestley-Taylor (P-T)	0.707	0.218	8.97	0.162	6.67	-0.040	-1.65
Valiantzas (V)	0.892	0.260	10.70	0.223	9.18	-0.221	-9.09

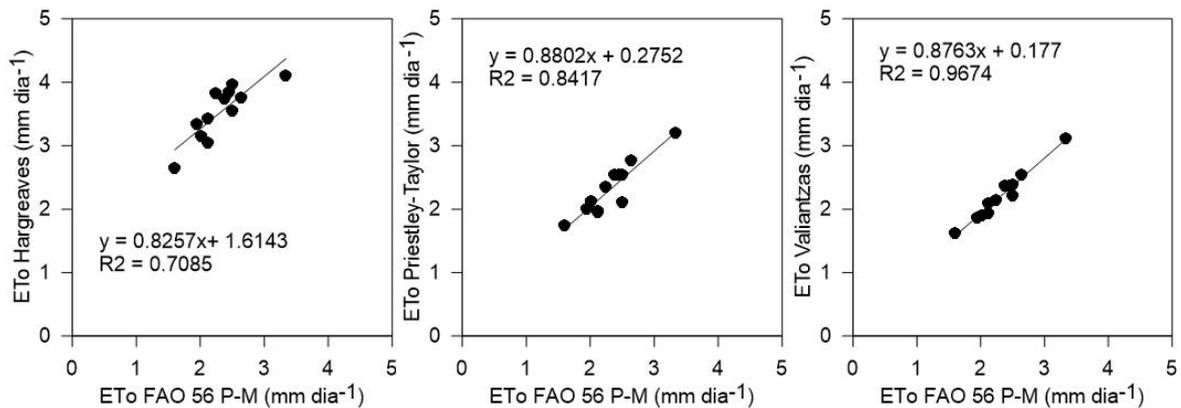
Hargreaves al igual que en las estimaciones diarias, sobreestimó la ETo con un coeficiente de determinación muy pobre ($R^2 = 0.520$) y errores altos (RMSE = 0.873 mm/día, MAE: 0.826 mm/día y MBE: 0.818 mm/día) (Tabla 5), sobreestimó en un 15.70 % en la Toreadora hasta un 34.24 % en Chirimachay. Los malos resultados con el modelo de Hargreaves están de acuerdo con estudios realizados anteriormente por: Bogawski & Bednorz (2014), Garcia et al. (2004), Martinez et al. (2009) y Tabari (2009) los cuales mostraron un pobre desempeño del modelo debido a la mayor ocurrencia de errores y una sobreestimación de la ETo principalmente en climas húmedos fríos con bajos niveles de velocidad del viento. Estos resultados, por otra parte contradicen un estudio realizado por Fooladmand et al., 2008 el cuál evaluó diferentes tipos de la ecuación de Hargreaves y encontró que la ecuación original estimaba mejor la ETo en climas húmedos y con bajos niveles en la velocidad del viento.

El siguiente método que mayor error mostró fue la ecuación de Valiantzas (RMSE = 0.260 mm/día, MAE: 0.223 mm/día y MBE: -0.221 mm/día) (Tabla 5), sin embargo con este modelo se encontró la mejor relación entre las estimaciones de la FAO 56 P-M con un $R^2 = 0.892$, Valiantzas subestimó la ETo entre un 4.99 % en Chirimachay hasta un 16.70% en la Toreadora.

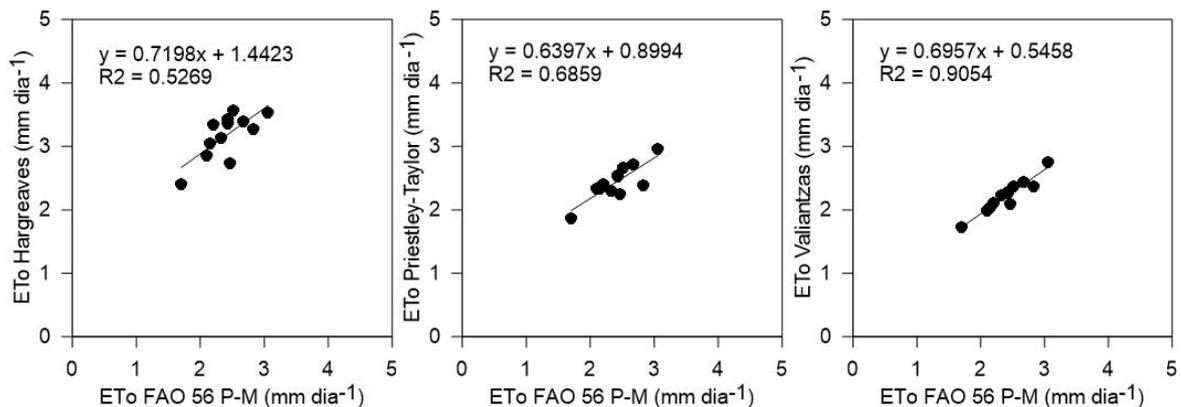
El modelo que mejor estimó la ETo mensual fue Priestley-Taylor (RMSE = 0.218 mm/día, MAE: 0.162 mm/día y MBE: -0.040 mm/día) (Tabla 5) con un $R^2 = 0.707$, subestimando la ETo entre un 0.13 % en Chirimachay hasta un 6.24 % en la Toreadora. Samaras et al. (2013), anteriormente ya había recalado el buen

desempeño de este modelo bajo condiciones de humedad y bajos niveles en la velocidad del viento.

Chirimachay



Virgen



Toreadora

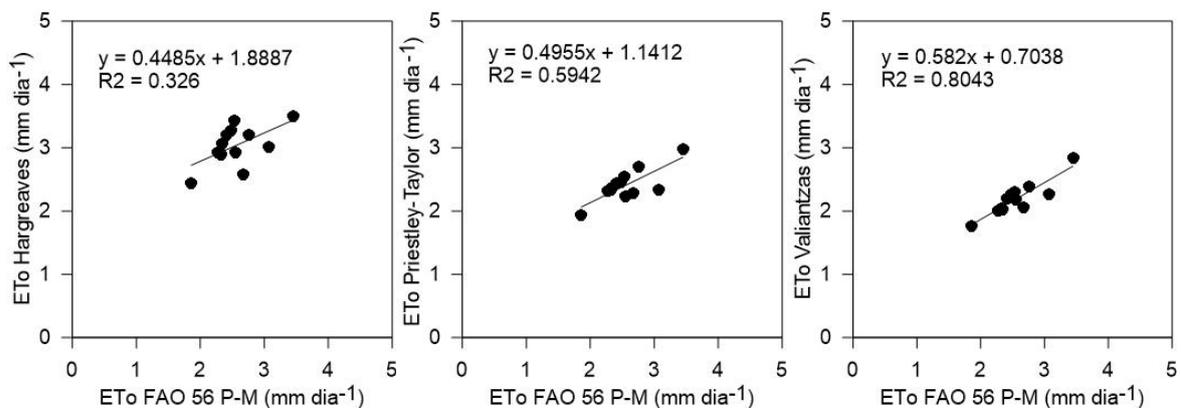


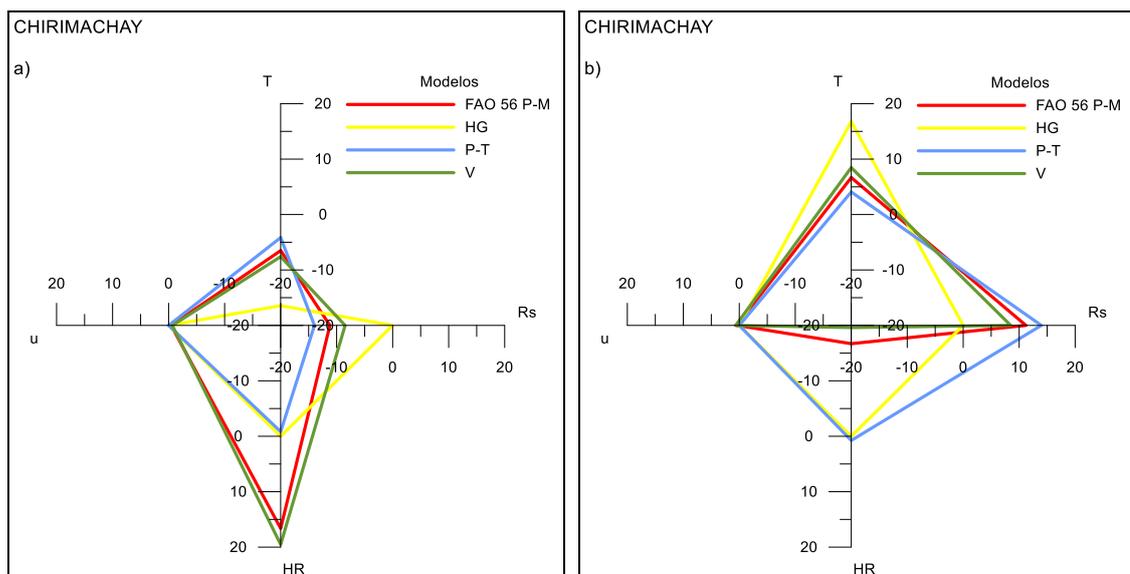
Figura 7. Comportamiento de la ETo mensual de los diferentes modelos frente a la ecuación de la FAO 56 P-M.

En la Figura 7 se observa que existe una relación muy pobre con el modelo de Hargreaves en comparación con los otros modelos, encontrándose valores de R^2 menores a 0.70 en todas las estaciones. La mejor relación entre las estimaciones de ETo con el modelo de la FAO 56 P-M se obtuvo por la ecuación de Valiantzas con un R^2 mayor a 0.80 en todas las estaciones. Al igual que en las estimaciones diarias, se observa con más claridad que existe una mayor correlación en la estación de menor altura (Chirimachay), y una menor correlación en la de mayor altura (Toreadora); sin embargo estos coeficientes de determinación podrían no ser representativos debido al limitado número de datos que se utilizan en las estimaciones mensuales, ya que el valor del coeficiente de determinación siempre aumenta cuando se incluye nuevas variables en el modelo, incluso cuando éstas son poco significativas o tienen poca correlación con la variable dependiente.

4.3. Análisis de sensibilidad

Con el fin de examinar el cambio en la ETo producido por el cambio relativo en las variables meteorológicas de entrada a los diferentes modelos, se realizó el análisis de sensibilidad propuesto en la sección 3.5. La tabla de los cambios generados en cada una de las variables climáticas se presenta en el Anexo 2.

La sensibilidad de los diferentes modelos de ETo a las variables climáticas analizadas se ilustra en la Figura 8.



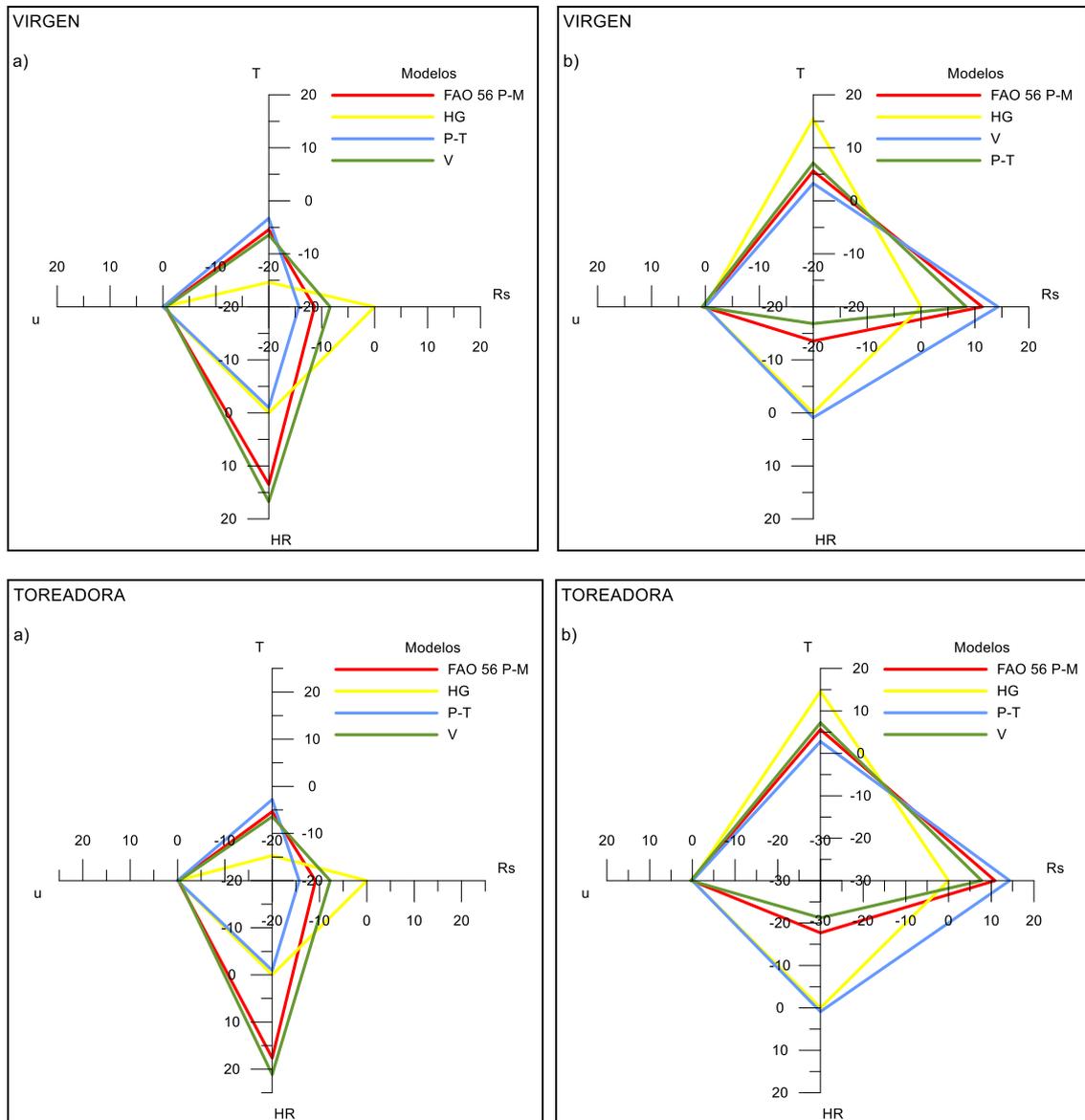


Figura 8. Sensibilidad de los modelos de ETo al cambio de $\pm 20\%$ en las variables meteorológicas. El gráfico radial hace referencia al cambio en porcentaje de la ETo producido por el cambio en la T, Rs, HR y u. a) Sensibilidad de los modelos debido al cambio de -20% en las variables meteorológicas. b) Sensibilidad de los modelos debido al cambio de $+20\%$ en las variables meteorológicas.

En la Figura 8 se observa que los modelos de ETo tienen diferentes sensibilidades a las variables meteorológicas. Según el modelo de la FAO 56 P-M, en el páramo la ETo es más sensible a los cambios en la humedad relativa y a la radiación solar, seguida de la temperatura y en menor grado de la velocidad del viento; estos resultados recalcan la importancia de realizar un análisis de



sensibilidad para un determinado ecosistema ya que en estudios realizados por: Goyal (2004), Kwon & Choi (2011) y Yang et al. (2011) se encontraron diferentes sensibilidades para las variables involucradas en la ecuación de la FAO 56 P-M, dependiendo de la variabilidad climática de cada región o lugar en la que se analice.

Entre las ecuaciones que tienen como variable de entrada a la temperatura (FAO 56 P-M, HG, P-T y V), la sensibilidad al cambio de $\pm 20\%$ en éste parámetro, fue mayor con el modelo de Hargreaves generando un cambio aproximado de $\pm 15\%$ en la ETo. Se observó que con todos los modelos la ETo es más sensible al aumento de la temperatura que a la disminución en ésta, la relación no lineal en la temperatura concuerda con estudios realizados anteriormente por: Goyal (2004), McKenney & Rosenberg (1993) y Yang et al. (2011).

Del grupo de modelos que usan radiación solar (FAO 56 P-M, P-T y V), Priestley-Taylor fue más sensible a los cambios de $\pm 20\%$ en la radiación solar, generando un cambio entre $\pm 14\%$ en la ETo, encontrándose una relación completamente lineal entre el incremento y la disminución de este parámetro.

La ecuación de Valiantzas resultó ser más sensible a la humedad relativa en comparación a los modelos de la FAO 56 P-M y P-T que también tienen como variable de entrada este parámetro. La sensibilidad al cambio de $\pm 20\%$ en la humedad relativa resultó en un cambio aproximado de $\pm 19\%$ en la ETo con éste modelo. Al igual que con la temperatura, la ETo es más sensible al aumento en la humedad relativa que a una disminución en la misma. Según Allen et al. (2006) una reducción en la humedad relativa produciría un aumento en la ETo, sin embargo esto no se cumple con el modelo de Priestley-Taylor ya que se encontró un comportamiento opuesto y una mayor sensibilidad de la ETo a la disminución en la humedad relativa.

La velocidad del viento por otra parte, mostró ser más sensible a la disminución que al aumento en los valores de dicho parámetro. Valiantzas mostró una mayor sensibilidad a la velocidad del viento en comparación al modelo de la FAO 56 P-M, generando un cambio en la ETo aproximado de $\pm 0.63\%$ en Chirimachay y la Virgen, y un cambio de $\pm 0.35\%$ en la Toreadora en respuesta al cambio de $\pm 20\%$ en la velocidad del viento; la sensibilidad de la ETo en la gradiente altitudinal se ve reducida casi a la mitad entre la Toreadora y las otras estaciones debido a la mayor diferencia en los valores de velocidad del viento en los tres observatorios meteorológicos (ver Tabla 1).



Como ya se mencionó anteriormente los modelos tienen diferentes sensibilidades a las variables meteorológicas. Con el fin de visualizar de mejor manera la sensibilidad de los modelos en la gradiente de estudio, se determinaron coeficientes de sensibilidad para cada variable. Un coeficiente de sensibilidad es la relación entre el cambio resultante de la ETo y el cambio de la variable meteorológica que induce dicho cambio en la ETo; por lo que los coeficientes se obtuvieron al dividir el porcentaje de cambio de la ETo para el porcentaje de cambio correspondiente a cada variable.

Los requisitos mínimos de datos hacen que los coeficientes de sensibilidad sean útiles para áreas donde se carecen de registros meteorológicos detallados. También puede ser útil para un cálculo rápido de la evapotranspiración en sistemas de riego y gestión del agua (Liang et al., 2008).

Un coeficiente de sensibilidad de 0.1 sugiere que un cambio del 10% en una variable resulta en un cambio del 1% en la ETo. Un coeficiente de sensibilidad positivo/negativo de una variable indica que la ETo aumenta/disminuye cuando la variable aumenta (Gong et al., 2006; Hupet & Vanclooster, 2001). Los coeficientes de sensibilidad promedio de cada variable en las tres estaciones de estudio se presentan en la Tabla 4.

Tabla 6. Coeficientes de sensibilidad de las variables meteorológicas correspondientes a los modelos de ETo.

Parámetro	Modelo	Estación		
		Chirimachay	Virgen	Toreadora
Temperatura	FAO 56 P-M	0.33	0.28	0.27
	HG	0.83	0.77	0.73
	P-T	0.21	0.16	0.14
	V	0.4	0.34	0.34
Radiación solar	FAO 56 P-M	0.56	0.57	0.54
	P-T	0.7	0.72	0.72
	V	0.42	0.42	0.39
Humedad relativa	FAO 56 P-M	-0.83	-0.68	-0.88
	P-T	0.04	0.05	0.05
	V	-0.98	-0.84	-1.06
Velocidad del viento	FAO 56 P-M	0.02	0.02	0.01
	V	0.03	0.03	0.02



En la Tabla 6 se observa que no existe un cambio significativo en la respuesta de la ETo frente a la sensibilidad de las variables meteorológicas entre las tres estaciones, sin embargo se encontró una mayor diferencia en las sensibilidades de la temperatura entre cada lugar en comparación a las demás variables, esto relacionado a que los valores de temperatura varían en mayor magnitud entre un lugar y otro en comparación a las demás variables (ver Tabla 1 y Figura 2). La sensibilidad de todos los modelos a la temperatura fue mayor en Chirimachay, a la radiación solar en la Virgen, a la humedad relativa en la Toreadora y a la velocidad del viento en Chirimachay y la Virgen por igual. Los mayores cambios en la ETo debido a la sensibilidad de los diferentes parámetros climáticos se presentan en la tabla del Anexo 3.

El análisis demuestra que la sensibilidad de la ETo a los cambios en las variables meteorológicas puede variar según el lugar y la época del año. Aunque la aplicación de algunos de estos modelos, por tanto, podría ser cuestionable, muchos de ellos se aplican comúnmente en diferentes climas y regiones debido a la limitada disponibilidad de datos en muchas regiones del planeta.



5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

El estudio tuvo como objetivo analizar el comportamiento de cuatro modelos de ETo (FAO 56 P-M, Hargreaves, Priestley-Taylor y Valiantzas) en una gradiente altitudinal montano andina. Para el estudio se contó con datos meteorológicos de tres estaciones automáticas pertenecientes al iDRHiCA ubicadas a diferentes elevaciones en la microcuenca.

Primero, se estimó la ETo diaria y mensual para cada lugar de estudio. Posteriormente se analizaron los diferentes modelos en función de la gradiente y se compararon con el método estandarizado de la FAO 56 P-M. Además se realizó un análisis de sensibilidad a las variables de entrada a cada uno de los modelos y su conexión frente a la variabilidad climática de la gradiente.

Las estimaciones tanto diarias como mensuales de ETo mostraron una gran similitud entre las tres localidades, se encontró que la ETo a lo largo del año tiene un patrón similar en los sitios estudiados, registrándose el pico más alto en el mes de noviembre y el pico más bajo en junio.

Al comparar los modelos de Hargreaves, Priestley-Taylor y Valiantzas con el de la FAO 56 P-M, se encontró que para estimaciones diarias las ecuaciones de Priestley-Taylor y Valiantzas mostraron los mejores resultados en las estimaciones de ETo con los menores errores y un R^2 mayor a 0.95 en todas las estaciones, para estimaciones mensuales la ecuación de Valiantzas presentó la mejor correlación frente a las estimaciones de la FAO 56 P-M con un R^2 mayor a 0.80, sin embargo los menores errores fueron determinados por la ecuación de Priestley-Taylor, siendo este último método el mejor para estimar la evapotranspiración mensual.

Pese a que el uso del modelo de Hargreaves es recomendado por la FAO cuando no se tienen datos de radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento; éste no se recomienda usar en el páramo ya que produjo una gran sobrestimación de la ETo y una pobre correlación tanto para estimaciones diarias y mensuales. Este hallazgo confirma también que es necesario la calibración regional de los métodos basados en la temperatura en regiones particulares (Valipour, 2014). Además se recomienda realizar el cálculo de la ETo con datos diarios, o al menos con promedios diarios de las variables meteorológicas, debido a que el error se incrementa al aumentar a escalas mensuales, esto concuerda con lo hallado por



Córdova et al. (2013). Este error podría incrementarse en este ecosistema en particular, debido a la alta variabilidad subdiaria en las variables meteorológicas.

El análisis de sensibilidad mostró que en el páramo, la ETo es más susceptible a los cambios en la humedad relativa, seguido de la radiación solar, la temperatura y en un grado menor por la velocidad del viento. Entre los modelos alternativos para estimar la ETo, Hargreaves fue más sensible a los cambios en la temperatura, Priestley-Taylor a la radiación, y Valiantzas a la humedad relativa y a la velocidad del viento. Debido a lo expuesto, al momento de elegir modelos alternativos, se debe considerar la importancia que las variables meteorológicas representan en este ecosistema en el proceso de ET, además de la importancia crítica en la obtención de datos de calidad en los lugares donde éstas variables presentan mayor sensibilidad con el fin de obtener datos de ETo más exactos y confiables.

Por otra parte, elegir un modelo de ETo no sólo debe basarse en la disponibilidad de las variables climáticas, si la sensibilidad de los modelos de ETo se ignora frente a la variabilidad climática, estudios que requieren escenarios climáticos pueden verse afectados considerablemente. Por lo que los resultados de este trabajo pueden servir como aporte para investigaciones futuras sobre la respuesta de la evapotranspiración de referencia al cambio climático.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda aplicar los resultados de la ETo mediante los diferentes modelos alternativos (Hargreaves, Priestley-Taylor y Valiantzas) en el balance hídrico, y con ello determinar el impacto que tienen en el cierre de este último.
- Para mejorar las estimaciones de ETo se recomienda calibrar los modelos de Hargreaves y Priestley-Taylor con los coeficientes propios para el lugar de estudio por medio de datos de un lisímetro u otras técnicas instrumentales.
- Realizar la misma comparación con modelos que tengan como variable de entrada la humedad (variable más importante en el páramo), para determinar su validez para estimar la ETo, en comparación a los ya estudiados.
- La influencia de la variación simultánea de las variables meteorológicas en la ETo necesita ser investigada más a fondo, pues un efecto independiente de una variable meteorológica en la ETo podría producir un resultado de sensibilidad parcial.



Referencias

1. 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. *Food and Agriculture Org.*, 56.
2. Bogawski, P., & Bednorz, E. (2014). Comparison and Validation of Selected Evapotranspiration Models for Conditions in Poland (Central Europe). *Water Resources Management*, 28(14), 5021–5038.
3. Bormann, H. (2011). Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations. *Climatic Change*, 104(3-4), 729-753.
4. Burman, R. D. (2007). Evapotranspiration formulas. *Encyclopedia of Water Science*, (April 2013), 37–41.
5. Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 413–421.
6. Carrasco, C., Mosquera, P., & Gonzales, H. (2013). Programa de monitoreo y vigilancia de RRHH y de clima de ETAPA EP.
7. Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350-355.
8. Córdova M., M., Carrillo R., G., & Célleri, R. (2013). Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de páramo andino debido al uso de datos mensuales, diarios y horarios. *Aqua-LAC*, 5, 14–22.
9. Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and drainage systems*, 16(1), 33-45.
10. Fooladmand, H. R., Zandilak, H., & Ravanan, M. H. (2008). Comparison of different types of Hargreaves equation for estimating monthly evapotranspiration in the south of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 54(3), 321–330.
11. Garcia, M., Raes, D., Allen, R., & Herbas, C. (2004). Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology*, 125(1-2), 67–82.
12. Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of trends in reference evapotranspiration data in a humid climate. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 165–180.



13. Gong, L., Xu, C., Chen, D., Halldin, S., & Chen, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 620–629.
14. Goyal, R. K. (2004). Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural Water Management*, 69(1), 1–11.
15. Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53-63.
16. Hou, L. G., Zou, S. B., Xiao, H. L., & Yang, Y. G. (2013). Sensitivity of the reference evapotranspiration to key climatic variables during the growing season in the Ejina oasis northwest China. *SpringerPlus*, 2(Suppl 1), S4.
17. Hupet, F., & Vanclooster, M. (2001). Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 243(3-4), 192–204.
18. 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.
19. Kwon, H., & Choi, M. (2011). Error assessment of climate variables for FAO-56 reference evapotranspiration. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 112(1-2), 81–90.
20. Martinez, C. J., & Thepadia, M. (2009). Estimating reference evapotranspiration with minimum data in Florida. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 136(7), 494-501.
21. McKenney, M. S., & Rosenberg, N. J. (1993). Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(1-2), 81–110.
22. Mena Vásquez, P., & Medina, G. (2001). La biodiversidad de los páramos en el Ecuador. *Los Páramos de Ecuador. Particularidades, Problemas y Perspectivas*, Editorial Abya Yala, Quito, 27-52.
23. Liang, L., Li, L., Zhang, L., Li, J., & Li, B. (2008). Sensitivity of penman-monteith reference crop evapotranspiration in Tao'er River Basin of northeastern China. *Chinese Geographical Science*, 18(4), 340-347.
24. Padrón, R. 2013. Análisis de la estructura de la lluvia del páramo. Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. 100 p.



25. Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81-92.
26. Rahimikhoob, A., Behbahani, M. R., & Fakheri, J. (2012). An Evaluation of Four Reference Evapotranspiration Models in a Subtropical Climate. *Water Resources Management*, 26(10), 2867–2881.
27. Rivington, M., Bellocchi, G., Matthews, K. B., & Buchan, K. (2005). Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. *Agricultural and forest Meteorology*, 132(3), 228-243.
28. Samaras, D. a., Reif, A., & Theodoropoulos, K. (2013). Evaluation of Radiation-Based Reference Evapotranspiration Models Under Different Mediterranean Climates in Central Greece. *Water Resources Management*, 28(1), 207–225.
29. Stöckle, C. O., Kjelgaard, J., & Bellocchi, G. (2004). Evaluation of estimated weather data for calculating Penman-Monteith reference crop evapotranspiration. *Irrigation science*, 23(1), 39-46.
30. Tabari, H. (2009). Evaluation of Reference Crop Evapotranspiration Equations in Various Climates. *Water Resources Management*, 24(10), 2311–2337.
31. Tabari, H., Grismer, M. E., & Trajkovic, S. (2011). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31(2), 107–117.
32. Valiantzas, J. D. (2013). Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman–Monteith reference evapotranspiration using limited weather data. *Journal of Hydrology*, 505, 13–23.
33. Valipour, M. (2014). Investigation of Valiantzas' evapotranspiration equation in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-12.
34. Xu, J., Peng, S., Ding, J., Wei, Q., & Yu, Y. (2013). Evaluation and calibration of simple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East China. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(6), 845–858.
35. Yang, Z., Liu, Q., & Cui, B. (2011). Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2006 in the Yellow River Basin, China. *Hydrological Sciences Journal*, 56(6), 1015–1026.



Anexos

Anexo 1. Estimaciones de ETo por los diferentes modelos durante el periodo de estudio (agosto 2013 – julio 2014). a) Valores promedio mensual de ETo diaria. b) Valores de ETo mensual.

a)

Fecha	Chirimachay				Virgen				Toreadora			
	FAO 56 P-M	HG	P-T	V	FAO 56 P-M	HG	P-T	V	FAO 56 P-M	HG	P-T	V
ago-13	1.577	2.232	1.955	1.680	1.861	2.103	2.332	1.893	1.745	1.962	2.269	1.750
sep-13	1.774	2.611	2.140	1.894	2.026	2.433	2.450	2.082	1.949	2.216	2.397	1.933
oct-13	2.121	2.939	2.588	2.128	2.122	2.657	2.582	2.104	2.057	2.496	2.514	2.009
nov-13	2.860	3.292	3.291	2.781	2.622	2.949	3.038	2.543	2.657	2.753	3.066	2.534
dic-13	2.328	2.956	2.802	2.301	2.313	2.686	2.749	2.233	2.249	2.518	2.735	2.156
ene-14	2.106	2.867	2.566	2.103	2.093	2.611	2.553	2.055	1.985	2.451	2.468	1.964
feb-14	2.098	3.018	2.544	2.122	2.193	2.752	2.682	2.155	2.059	2.600	2.557	2.043
mar-14	1.871	2.719	2.339	1.880	1.940	2.501	2.408	1.921	1.853	2.366	2.365	1.860
abr-14	1.646	2.556	2.009	1.692	1.880	2.374	2.352	1.885	1.838	2.242	2.331	1.812
may-14	1.752	2.530	2.118	1.755	1.889	2.270	2.331	1.859	1.903	2.228	2.328	1.836
jun-14	1.368	1.915	1.711	1.462	1.468	1.730	1.844	1.581	1.422	1.669	1.896	1.473
jul-14	1.605	2.200	1.948	1.654	1.818	1.992	2.247	1.847	1.787	1.887	2.288	1.741



b)

Fecha	Chirimachay				Virgen				Toreadora			
	FAO 56 P-M	HG	P-T	V	FAO 56 P-M	HG	P-T	V	FAO 56 P-M	HG	P-T	V
ago-13	2.117	3.427	1.944	2.092	2.323	3.139	2.298	2.237	2.544	2.924	2.226	2.172
sep-13	2.507	3.546	2.104	2.216	2.830	3.275	2.387	2.373	3.065	3.019	2.328	2.273
oct-13	2.384	3.734	2.540	2.365	2.434	3.363	2.537	2.287	2.482	3.276	2.462	2.272
nov-13	3.339	4.098	3.203	3.107	3.062	3.539	2.966	2.746	3.446	3.494	2.982	2.838
dic-13	2.647	3.765	2.775	2.542	2.667	3.392	2.713	2.430	2.760	3.209	2.705	2.380
ene-14	2.455	3.846	2.546	2.368	2.425	3.430	2.524	2.265	2.407	3.210	2.447	2.192
feb-14	2.507	3.968	2.541	2.394	2.515	3.562	2.664	2.372	2.531	3.436	2.545	2.293
mar-14	2.244	3.822	2.344	2.136	2.206	3.347	2.409	2.100	2.351	3.056	2.363	2.030
abr-14	1.945	3.336	2.006	1.865	2.156	3.051	2.340	2.041	2.275	2.925	2.318	2.011
may-14	2.007	3.157	2.124	1.906	2.106	2.858	2.328	1.984	2.325	2.887	2.334	2.040
jun-14	1.601	2.643	1.744	1.618	1.705	2.409	1.872	1.723	1.859	2.436	1.928	1.767
jul-14	2.124	3.051	1.970	1.943	2.463	2.740	2.240	2.091	2.678	2.574	2.279	2.059



Anexo 2. Cambio en los valores de las variables meteorológicas por el cambio de $\pm 20\%$.

Estación	Parámetro meteorológico	Cambio en los parámetros meteorológicos								
		-20%	-15%	-10%	-5%	0	+5%	+10%	+15%	+20%
Chirimachay	T	6.98	7.42	7.85	8.29	8.72	9.16	9.60	10.03	10.47
	Rs	8.40	8.93	9.45	9.98	10.50	11.03	11.55	12.08	12.60
	HR	73.82	78.43	83.04	87.66	92.27	96.88	101.50*	106.11*	110.72*
	U	1.33	1.42	1.50	1.58	1.66	1.75	1.83	1.91	2.00
Virgen	T	5.24	5.57	5.89	6.22	6.55	6.88	7.20	7.53	7.86
	Rs	9.57	10.17	10.76	11.36	11.96	12.56	13.16	13.75	14.35
	HR	71.51	75.98	80.45	84.92	89.39	93.86	98.33	102.79*	107.26*
	U	1.35	1.44	1.52	1.61	1.69	1.77	1.86	1.94	2.03
Toreadora	T	4.29	4.55	4.82	5.09	5.36	5.63	5.89	6.16	6.43
	Rs	9.53	10.12	10.72	11.31	11.91	12.50	13.10	13.70	14.29
	HR	72.52	77.05	81.58	86.12	90.65	95.18	99.71	104.25*	108.78*
	U	1.77	1.88	1.99	2.10	2.21	2.32	2.44	2.55	2.66

T ($^{\circ}\text{C}$), Rs ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), HR (%), u (m s^{-1}). * Los valores en la humedad relativa se encuentran por encima del punto de saturación (mayores al 100%), lo que representan valores irreales de humedad relativa.



Anexo 3. Mayores sensibilidades a las variables meteorológicas.

Estación	Parámetro meteorológico	Modelo	ETo (mm) esperada debido al porcentaje de cambio en los parámetros meteorológicos								
			-20%	-15%	-10%	-5%	0	+5%	+10%	+15%	+20%
CH	Temperatura	HG	2.241	2.351	2.461	2.571	2.682	2.793	2.905	3.018	3.131
VR	Radiación solar	P-T	2.112	2.201	2.289	2.377	2.465	2.553	2.641	2.729	2.817
TO	Humedad relativa	V	2.288	2.188	2.088	1.989	1.889	1.789	1.688	1.588*	1.488*
CH	Velocidad del viento	V	1.913	1.916	1.920	1.923	1.926	1.929	1.932	1.935	1.938

CH: Chirimachay, VR: Virgen, TO: Toreadora. * Los valores no podrían estar representando la demanda evaporativa real debido a que se introdujeron valores de humedad relativa mayores al punto de saturación (Anexo 2).

Anexo 4. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.



Foto 1: Estación meteorológica Chirimachay (CH)



Foto 2: Estación meteorológica La Virgen (VR)



Foto 3: Estación meteorológica Toreadora (TO)