

ERRORES EN LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA DE UNA ZONA DE PÁRAMO ANDINO DEBIDOS AL USO DE DATOS MENSUALES, DIARIOS Y HORARIOS

ERRORS IN THE ESTIMATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION OF AN ANDEAN PÁRAMO REGION DUE TO THE USE OF MONTHLY, DAILY AND HOURLY DATA

Mario Córdova M.¹, Galo Carrillo R.¹, Rolando Céleri¹

Resumen

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es un dato clave en estudios hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos, donde se la vincula con el cierre del balance hidrológico, el consumo de agua de los ecosistemas y el desarrollo de la vegetación. A pesar de esta importancia, la ET_o ha sido muy poco estudiada en ecosistemas de páramo andino debido principalmente al escaso monitoreo meteorológico realizado en estos sitios y la poca disponibilidad de datos de calidad en diferentes escalas temporales, por lo que se conoce muy poco sobre su comportamiento. El objetivo de este estudio fue evaluar el error cometido en la estimación de la ET_o mediante la ecuación de Penman-Monteith debido al efecto de usar los datos meteorológicos en periodos horarios, diarios y mensuales. La investigación fue realizada con datos meteorológicos muestreados cada 5 minutos durante un periodo de 2 años, entre marzo de 2011 y febrero de 2013, en el observatorio ecohidrológico ubicado en la cuenca del río Zhurucay (3780 m s.n.m.) en el sur de Ecuador. Esto se realizó calculando promedios horarios, diarios y mensuales de las variables y obteniendo el promedio diario mensual de la ET_o para cada una de estas escalas. El error fue calculado respecto al valor proveniente de la estimación horaria que se asumió como la de referencia. Se observó que al ampliar el periodo en el cual se promedian las variables se obtienen valores más elevados de la ET_o, resultando los cálculos diario y mensual en una sobrestimación respecto al horario. Se encontró un error relativo promedio mayor al 8% al realizar la estimación de la ET_o con promedios diarios y un error mayor al 20% al utilizar datos mensuales. Estos resultados se contraponen a lo indicado en la publicación número 56 de FAO, en la que se afirma que el cálculo con promedios mensuales es muy similar al realizado con promedios diarios de las variables. Se concluyó que las considerables diferencias obtenidas al aumentar el tiempo de agregación de los datos se deben a la alta variabilidad diaria y subdiaria de las condiciones climáticas en este ecosistema de alta montaña, lo que causa que un promedio diario o mensual de las variables no refleje las condiciones reales del ambiente y su energía evaporativa real. Se evidencia que para el ecosistema en estudio la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith debe ser investigada más profundamente.

Palabras clave: evapotranspiración, ET_o, meteorología, Penman-Monteith, páramo, Ecuador, Andes.

Abstract

Reference evapotranspiration (ET_o) is a key parameter in hydrological, ecohydrological and biometeorological research; where the ET_o is linked with the closure of the hydrological balance, ecosystems water consumption and vegetation growth. Despite this importance, ET_o has been little studied in Andean ecosystems mainly due to the scarce meteorological monitoring and the resulting lack of high-quality, multi-temporal data sets. Therefore, ET_o dynamics in the páramo ecosystem is still little known. Considering that in conventional meteorological stations only daily and monthly data is registered, it was of interest to perform a multi-temporal analysis of ET_o dynamics. The objective of this study was to assess the errors in the estimation of ET_o using the Penman-Monteith equation due to the effect of using hourly, daily and monthly meteorological data. This research was conducted with meteorological data registered every 5 minutes during a 2-year period, between March 2011 and February 2013, in the main station of the ecohydrological observatory in the Zhurucay river basin (3780 m a.s.l.) in southern Ecuador. This was done by calculating hourly, daily and monthly averages of the variables and estimating the monthly daily average ET_o in each one of these time scales. The error was calculated in relation to the hourly estimation, which was taken as reference. Results show that higher values of ET_o are obtained for longer periods of data aggregation. As a consequence, ET_o calculated from daily and monthly data resulted in an overestimation when compared to the hourly estimation. It was found that the mean relative error was larger than 8 and 20 % for daily and monthly averages, respectively. These results disagree with the FAO Irrigation and Drainage paper No. 56 that sustains that the ET_o estimation using monthly averages must be very similar to the one using daily data. It is concluded that the considerable differences in estimates are produced by the high daily and sub-daily variability of weather conditions found in this high-mountain ecosystem. This causes that the monthly or even daily average of the meteorological variables fail to represent the real environmental conditions of the páramo and its real evaporative energy. Therefore, for this particular ecosystem, the application of the Penman-Monteith equation must be further investigated.

Keywords: evapotranspiration, ET_o, meteorology, Penman-Monteith, Andean páramo, Ecuador, Andes.

¹ Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. E-mail de contacto: marioandrescm@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

La Cordillera de los Andes atraviesa el callejón occidental de Sudamérica pasando por Ecuador, donde esta cadena montañosa configura la región Sierra. En la parte más alta de esta región, debajo de los glaciares, se encuentra el páramo. El páramo es un ecosistema andino que se encuentra aproximadamente entre los 3500 y 5000 metros de altura sobre el nivel del mar (Josse et. al., 2009). El páramo consiste de planicies y valles de origen glacial con una gran variedad de lagunas, pantanos y praderas húmedas cubiertas por suelos volcánicos poco profundos y porosos con alto contenido de materia orgánica; Este ecosistema ha sido estudiado con poca profundidad, y a pesar de su importancia en la producción de agua, la biodiversidad y la oferta de los servicios ecosistémicos, la investigación científica en el páramo de los Andes es escasa (Céleri y Feyen, 2009). Climáticamente se caracteriza por su baja presión atmosférica, alta radiación ultravioleta y vientos fuertes de dirección altamente variable; la temperatura decrece con una gradiente de entre 0,5 °C y 0,7 °C cada 100 m y presenta una temperatura promedio de 7°C a 3500 m de altura (Buytaert et. al., 2006).

La evapotranspiración (ET) es el intercambio de vapor de agua entre la superficie de la tierra y la atmósfera debido a evaporación directa y transpiración de la capa vegetal. Ésta depende de la radiación solar, velocidad del viento, temperatura del aire, presión atmosférica, flujo de calor en el suelo y humedad relativa. Depende además de las características propias de cada cultivo. La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) asume un cultivo con una altura de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23; este cultivo se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme creciendo activamente, sombreando totalmente el suelo y con un adecuado aporte de agua (Allen et. al., 2006). Realizar el cálculo de la ET_o resulta de gran utilidad porque al depender solamente de variables meteorológicas se pueden realizar comparaciones entre distintas regiones y localidades independientemente del cultivo.

La correcta estimación de la evapotranspiración es de gran importancia en estudios hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos donde se vincula el clima con el desarrollo de la vegetación, el consumo de agua de los ecosistemas y el cierre del balance hidrológico. Este parámetro no ha podido ser estudiado a profundidad en el páramo debido a la poca disponibilidad de datos de calidad por lo que se conoce muy poco de sus características, su variabilidad temporal y la sensibilidad a las variables meteorológicas que influyen en su cálculo; es por esto que un monitoreo meteorológico de calidad es de suma importancia para fines hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos debido a que es un proceso clave en estos campos de estudio.

Durante los últimos 50 años se han propuesto varios métodos teóricos y empíricos alrededor del mundo para estimar la evapotranspiración a partir de diferentes variables meteorológicas; entre los más difundidos se encuentran: el método de Hargreaves (Hargreaves et. al., 2003; Mohammadieh et. al., 2009; ElNesr et. al., 2011), el método de Priestley Taylor (Gunston and Batchelor, 1983; Summer and Jacobs, 2005), los métodos basados en la temperatura (Xu and Singh, 2001; Trajkovic, 2005), el método de Tanque Evaporímetro (Allen et. al., 2006; Raghuwanshi and Wallender, 1998), y el método de Penman-Monteith (Allen et. al., 2006; Hauviller et. al., 2006). Se han realizado además varias investigaciones en las cuales se han comparado estos distintos métodos (Yoder et. al., 2005; Alkaeed et. al., 2006, García et. al., 2004; Droogers and Allen, 2002). En un estudio sobre estimación diaria, mensual y anual de la evapotranspiración de referencia realizado en Ecuador (Vega y Jara, 2009) que cuenta con información meteorológica diaria correspondiente a temperatura y humedad relativa del aire, velocidad del viento, evaporación de bandeja y horas de sol se discute la aplicabilidad de diferentes métodos de estimación de la ET_o en dos localidades del Ecuador ubicadas a 60 y 2838 m sobre el nivel del mar. En el estudio citado se calibra la evapotranspiración de referencia con distintos métodos, utilizando la de bandeja afectada por un coeficiente que fue determinado para cada localidad como referencia y se encuentra que la ecuación de Penman-Monteith mostró el peor desempeño entre los modelos utilizados.. Estos resultados negativos al utilizar la ecuación de Penman-Monteith se pueden deber a que solamente se contaba con datos diarios además de la carencia de valores observados de radiación. En un estudio realizado en el altiplano boliviano por García et. al. (2004) en 4 localidades ubicadas entre 3700 y 3820 m, los resultados demuestran el mejor desempeño de la ecuación de Penman-Monteith (inclusive cuando hay datos meteorológicos faltantes) en comparación con los métodos de Hargreaves y Thornthwaite; sin embargo, a pesar de que el altiplano es un ecosistema andino de igual altitud que el páramo sus condiciones climáticas son completamente diferentes. El estudio del funcionamiento, errores y desviaciones realizado con todos los métodos propuestos, ha llevado a la conclusión de que la ecuación combinada de Penman-Monteith describe de mejor manera el comportamiento de la ET_o a nivel global, por lo que se ha decidido utilizar dicha ecuación en el presente estudio.

En general es muy difícil contar con datos meteorológicos completos a escala horaria y diaria (Stöckle et. al., 2004; Li et. al., 2009). En la Sierra ecuatoriana esto es aún más difícil por la limitación de infraestructura de observatorios meteorológicos/climáticos en zonas de difícil acceso. Es por esto que casi todos los proyectos de riego, meteorológicos e hidrológicos realizados en el país han sido diseñados con estimaciones mensuales de la ET_o, debido a que estos

son los únicos datos con los que generalmente se cuenta en las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Para estimar el promedio diario mensual de la ETo se pueden utilizar los promedios mensuales de las variables meteorológicas. En FAO 56 (Allen et. al., 2006) se indica que este valor es similar al obtenido al realizar el promedio mensual del cálculo diario de la ETo. Sin embargo estas recomendaciones no han sido verificadas en un ecosistema de páramo. Debido a los antecedentes expuestos y la falta de conocimiento al respecto, en el presente estudio se evaluará el error cometido en la estimación mensual de la ETo al comparar el cálculo obtenido con las tres distintas escalas de agregación de las variables (mensual, diaria y horaria). Esto se puede realizar gracias a que la estación principal del observatorio ecohidrológico Zhurucay del Departamento de

Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca realiza una medición de muy alta frecuencia (5 minutos) de los parámetros involucrados en el cálculo; de esta manera se puede cuantificar aproximadamente los errores cometidos en el cálculo de la ETo con promedios diarios y mensuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio

La estación meteorológica está ubicada en el observatorio ecohidrológico del río Zhurucay, afluente del río Jubones que drena hacia el Océano Pacífico. El sitio de estudio se encuentra a 85 km al sudeste de la ciudad de Cuenca Azuay, Ecuador, a 3780 m s.n.m y coordenadas UTM 17M, 696439, 9661707. (Ver Figura 1)

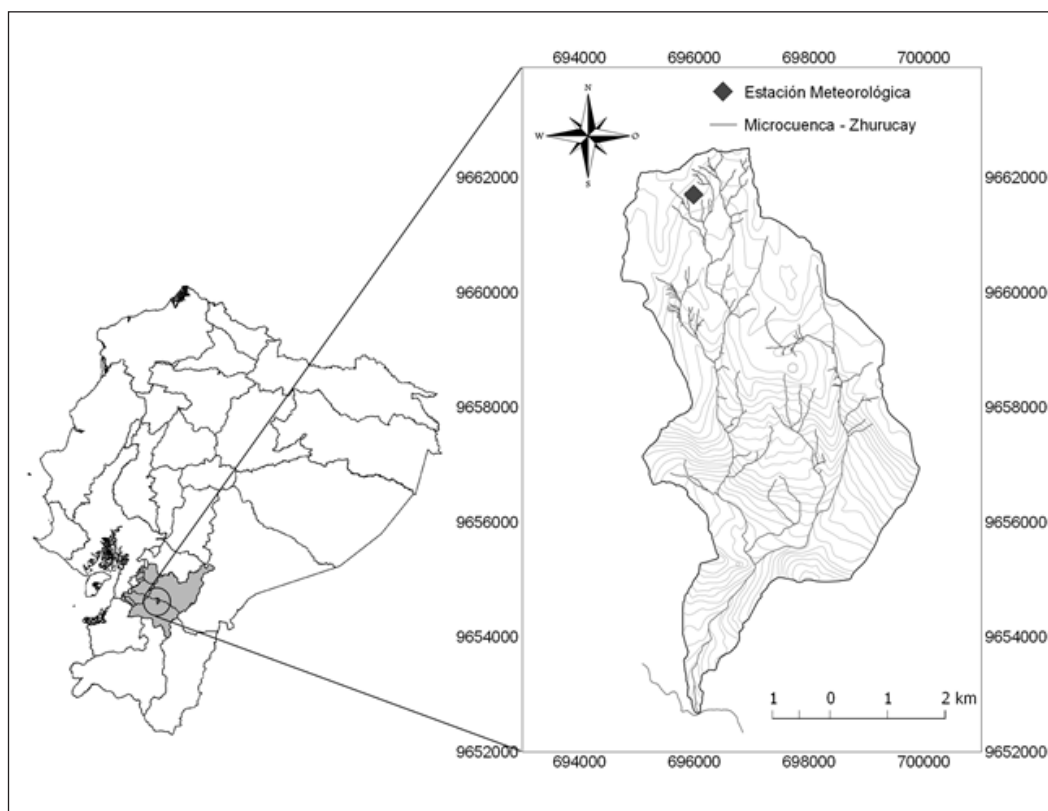


Figura 1. Ubicación geográfica de la estación meteorológica utilizada en el estudio .

El clima del sitio de estudio está influenciado por el régimen del Pacífico desde el lado oeste de la cuenca, aunque masas de aire continentales provenientes del lado amazónico también parecen presentar alguna influencia (Vuille et. al., 2000). La lluvia anual varía entre los 900 y 1600mm de acuerdo al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). La parte norte de la cuenca, en la que se encuentra la estación meteorológica está sobre la formación

Quimsacocha que está compuesta de plagioclasas, feldespato y piroclastos andesíticos. La cobertura vegetal está principalmente compuesta de pajonal, almohadilla y bosque de *Polylepis* sp. Esta vegetación ha sido afectada por pastoreo extensivo de baja densidad y quemadas en la parte baja de la cuenca. El suelo tiene alto contenido de materia orgánica debido a su formación volcánica, el clima frío y húmedo y la baja presión atmosférica. (Mosquera et. al., 2012)

Datos

El estudio se realizó utilizando datos de la estación meteorológica principal del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca. La estación está equipada con un radiómetro neto CNR2 - Kipp and Zonen, un piranómetro CS300 - Campbell Scientific, un anemómetro y veleta Met One 34B - Windset Campbell Scientific, un sensor combinado de humedad relativa y temperatura del aire CS2150 - Temperature and Relative Humidity probe, Campbell Scientific. Los datos se han almacenado en un datalogger CR1000 - Measurement and Control Datalogger, Campbell Scientific. Para el estudio se utilizaron dos años completos de datos, desde el 1 de marzo de 2011 hasta el 28 de febrero de 2013.

Los sensores fueron programados para muestrear cada segundo las variables indicadas y el registro de datos se realiza de la siguiente manera: Temperatura promedio, máxima y mínima del aire [$^{\circ}\text{C}$] cada 5 minutos; Radiación neta promedio [KW m^{-2}] cada 5 minutos; Radiación solar promedio [KW m^{-2}] y total [MJ m^{-2}] cada 5 minutos; Velocidad promedio del viento [m s^{-1}] cada 5 minutos, y Humedad relativa instantánea cada 5 minutos [%].

Cálculo del promedio diario mensual de la ETo

Se calculó el promedio diario mensual de la ETo mediante la ecuación de Penman-Monteith descrita en FAO56 (Allen et. al., 2006):

En donde ETo: evapotranspiración del cultivo de referencia [mm día^{-1}], Rn: radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$], G: flujo del calor de suelo [$\text{MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$], T: temperatura media del aire a 2 m de altura [$^{\circ}\text{C}$], u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura [m s^{-1}], es: presión de vapor de saturación [kPa], ea: presión real de vapor [kPa], (es - ea): déficit de presión de vapor [kPa], Δ : pendiente de la curva de presión de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], Y: constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], z: altura sobre el nivel del mar [m], HR: humedad relativa del aire [%]. Adicionalmente se considera lo indicado por Allen et. al., 2006 para los valores de Δ , G, T, P, y.

Cálculo del promedio diario de la ETo

El cálculo del promedio diario de la ETo se realiza con la ecuación 1. Se ingresan promedios diarios de las variables meteorológicas en la ecuación y se obtiene el valor de la ETo en mm día^{-1} .

Cálculo del promedio horario de la ETo

Para la determinación de la ETo en periodos horarios la ecuación de Penman-Monteith debe ser modificada, los cambios se deben a que en la ecuación 1 el cálculo de la ETo se obtiene en mm día^{-1} mientras

que mediante la ecuación 2 se la estima en mm hora^{-1} . Al introducir estas modificaciones la ecuación requiere de promedios horarios de las variables y toma la siguiente forma:

En donde ETo: evapotranspiración del cultivo de referencia [mm hora^{-1}], Rn: radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$], G: flujo del calor de suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$], T_{hr} : temperatura media del aire a 2 m de altura cada hora [$^{\circ}\text{C}$], $e^{\circ}(T_{hr})$: presión de saturación de vapor a temperatura del aire T_{hr} [kPa], ea: promedio horario de la presión real de vapor [kPa]. Los valores de Δ , Y, ea y G se calculan con las ecuaciones descritas por Allen et. al., 2006

Análisis de la calidad de las estimaciones

Para determinar la calidad de las estimaciones diarias y mensuales de la ETo en comparación con el cálculo horario Se utilizaron el Error absoluto (Ec. 3), Error relativo (Ec. 4) y Absolute Percent Bias (APB) (Ec.5). Todos los índices se calcularon con respecto a la estimación obtenida mediante el cálculo horario de la ETo debido a que ésta se acoge a la recomendación de FAO 56 (Allen et. al., 2006).

Donde Si: valor de la ETo correspondiente al cálculo diario o mensual, Oi: valor de la ETo correspondiente al cálculo horario y n: número de datos.

El APB es un indicador porcentual del error acumulado absoluto que se comete en una estimación, para su análisis se consideró el criterio de desempeño presentado por Tokay et. al. (2009) como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterio de interpretación del desempeño para comparación entre series de datos estimados y observados, para el índice Absolute Percent Bias (APB).

APB	Desempeño
< 5	Excelente
5 – 10	Muy bueno
10 – 15	Bueno
15 – 20	Razonable
> 20	Pésimo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se promediaron la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación neta; horaria, diaria y mensualmente y se calculó el promedio de la ETo correspondiente a cada escala según la metodología descrita. Luego se agregaron los cálculos diario y horario para obtener el promedio diario mensual de la ETo y poder comparar los resultados de las tres escalas temporales. Los resultados se muestran en la Figura 2.

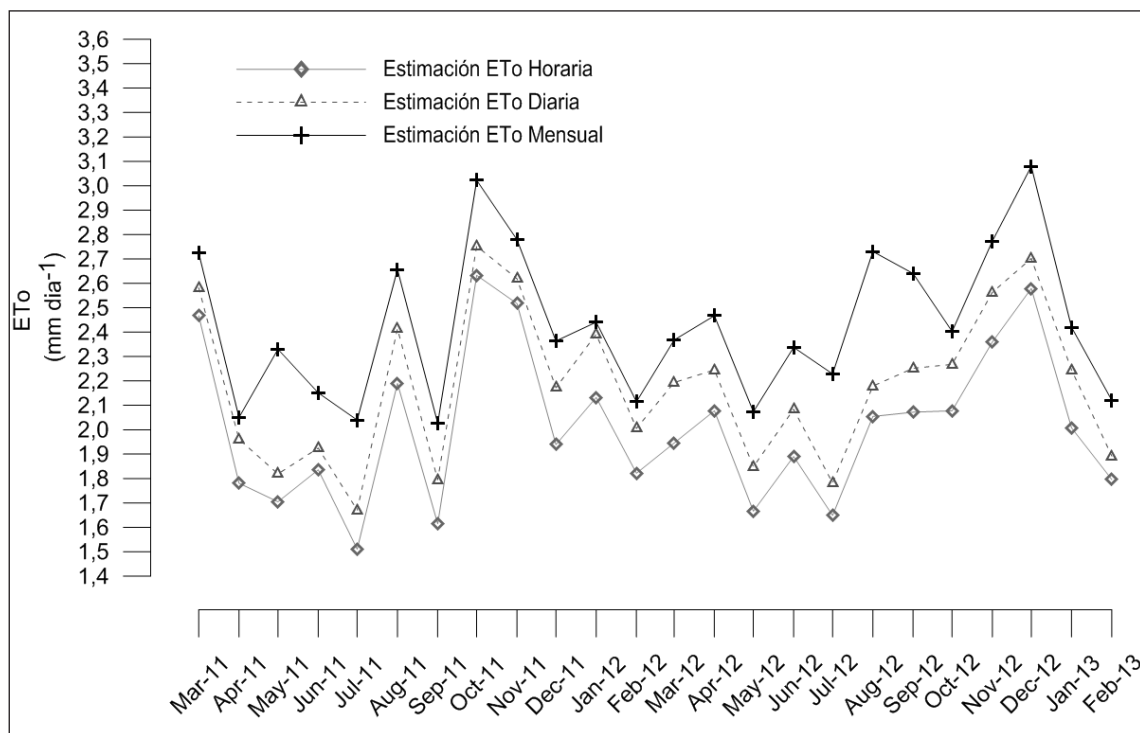


Figura 2. Promedio diario mensual de la ETo estimado a partir de distintas escalas temporales de cálculo.

En la Figura 2 se observa que las tres estimaciones presentan una distribución temporal muy similar. Se puede identificar que los valores de la ETo se sobrestiman a medida que aumenta el periodo en el que se promedian las variables: las magnitudes de la estimación diaria son siempre superiores a los valores de la estimación horaria, y las magnitudes de la estimación mensual son superiores a las de la estimación diaria. Al analizar detenidamente la variabilidad de las estimaciones se identifica que en mayo de 2011 hay un cambio en la concavidad de la gráfica del cálculo mensual con respecto a las otras dos. Al analizar lo sucedido en este mes se encontró la combinación de dos factores que causaron este error (ver Figura 3). El primero fue un sostenimiento del promedio diario de la temperatura, siempre mayor a 6°C, entre el 12 y el 25 de mayo. El segundo, y el más influyente sobre la estimación mensual de la ETo, fue un periodo de siete días consecutivos en los que no se registró lluvia entre el 15 y el 21 de mayo (Padrón, 2013). Estos dos fenómenos causaron que el ambiente se seque y provoque una caída de la humedad relativa, que el 19 de mayo alcanzó un valor promedio de 34,2% y un mínimo de 12,4%, el mínimo registrado durante todo el periodo de estudio; este registro extremo de humedad mínima, considerando que el promedio mensual correspondiente a mayo de 2011 fue mayor al 65%, causó una subestimación de la presión real de vapor en el cálculo mensual lo que derivó en esta excepcional sobrestimación de la ETo. Algo similar ocurrió en los meses de agosto y septiembre de 2012, en los que se registraron 14 y 8 días secos consecutivos, respectivamente, los que

causaron humedades relativas mínimas excepcionales (24,5% y 35,8% respectivamente). Estos períodos con baja humedad relativa ocasionaron una alta sobrestimación de la ETo al agregar las variables mensualmente.

El diagrama de cajas de la distribución de la ETo (Figura 4), muestra claramente cómo la ETo se sobrestima al incrementar las escalas de agregación de datos. Se observa que toda la distribución aumenta junto con la escala temporal; la mediana, los cuartiles, e inclusive los valores máximo y mínimo. Al comparar los resultados del cálculo horario y el cálculo mensual se identifica que la mediana del cálculo mensual se encuentra cerca de 0,5 mm día⁻¹ por encima de la correspondiente al cálculo horario (alrededor de un 20%). Los valores estimados con datos diarios producen una sobrestimación no muy elevada con relación a los cálculos con datos horarios, aunque la diferencia entre las medianas es de alrededor del 10%. Esto significa que al usar datos diarios y mensuales se estima una mayor pérdida de agua debido a evapotranspiración que cuando se usan datos horarios. Este error de sobrestimación de la ETo al aumentar el periodo de agregación de las variables provocaría una subestimación del agua disponible en el sistema al realizar balance hidrológico; lo que no resulta tan negativo, ya que de existir un error de subestimación, este ocasionaría consecuencias muy negativas en los programas de aprovechamiento de recursos hídricos ya que indicaría la existencia de mayor disponibilidad de agua que la real en los cauces.

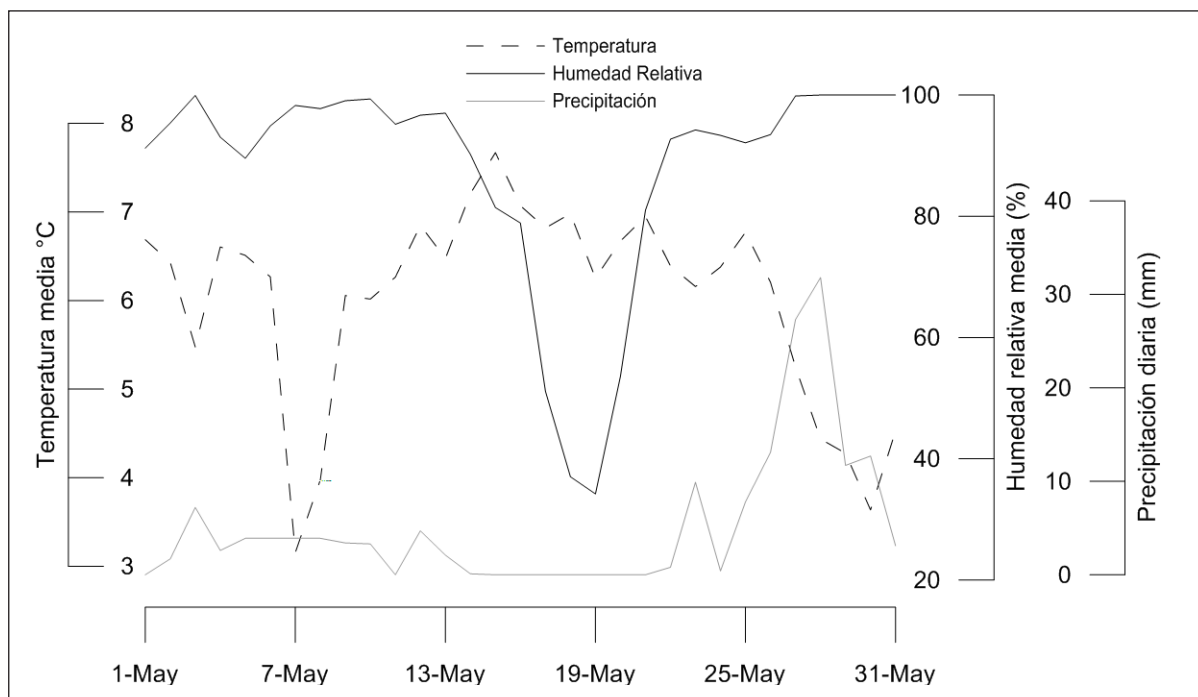


Figura 3. Promedio diario de la temperatura y humedad relativa y precipitación diaria correspondientes a mayo de 2011. La precipitación se midió con un disdrómetro láser (Thies Laser Precipitation Monitor) ubicado junto a la estación meteorológica.

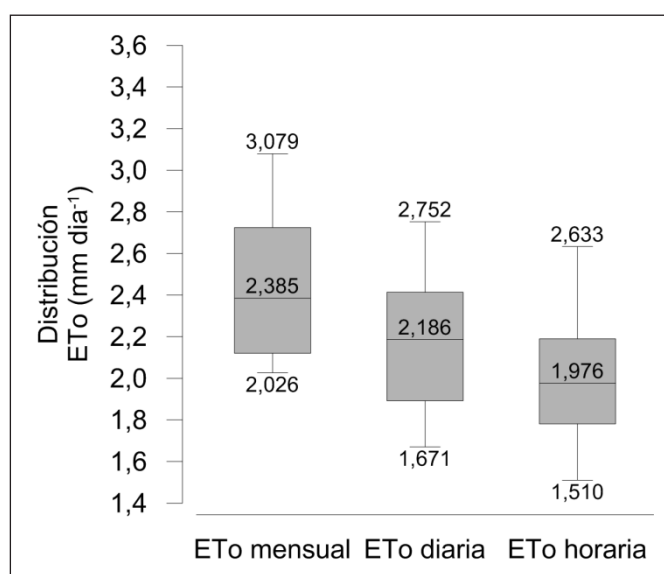


Figura 4. Diagrama de cajas de la distribución del promedio diario mensual de la ETo. Cada una de las cajas encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la mediana, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

Los resultados del análisis estadístico se resumen en la Tabla 2. Se observa que la calidad de la estimación con datos diarios es notablemente mejor a la obtenida con datos mensuales. Se obtuvieron valores del error relativo promedio y APB mayores al 8 y al 20% en los cálculos diario y mensual respectivamente, lo que marca una gran diferencia entre estas dos estimaciones ya que la primera es calificada como muy buena y la segunda como pésima. Al analizar los valores del error relativo promedio y máximo en

las dos series de datos se identifica que en el cálculo mensual hay una diferencia mayor al 14% entre estos dos índices, mientras que la misma diferencia es del 4% en el cálculo diario; esto implica una mayor incertidumbre al calcular la ETo en periodos mensuales. Se observa además que hay una alta similitud entre los valores correspondientes del error relativo promedio y el APB en los dos casos, esto se debe a que los errores fueron siempre de sobrestimación y por lo tanto siempre positivos.

Tabla 2. Errores encontrados al comparar la ETo calculada con datos mensuales y diarios con relación a la ETo horaria.

Periodo de Cálculo					
Datos diarios vs horarios			Datos mensuales vs horarios		
	Error absoluto	Error relativo		Error absoluto	Error relativo
	(mm día ⁻¹)	(%)		(mm día ⁻¹)	(%)
Máximo	0,259	12,75	Máximo	0,676	36,68
Promedio	0,172	8,74	Promedio	0,428	22,04
APB (%)	8,36		APB (%)	20,74	
Evaluación según APB	Muy bueno		Evaluación según APB	Pésimo	

Para evaluar la diferencia media entre el cálculo mensual y diario se observa la diferencia entre sus errores relativos medios, que resulta ser de alrededor del 14%. Estos resultados son interesantes ya que la publicación 56 de FAO (Allen et. al., 2006) indica que normalmente los resultados del cálculo mensual de la ETo son muy similares a los del cálculo diario, lo cual no ocurre para este sitio de alta montaña. Esta diferencia se debe a la significativa variabilidad diaria y subdiaria de las variables meteorológicas encontrada en el ecosistema de páramo característico, en el cual, la nubosidad, la velocidad del viento y la radiación, tienen una considerable variación en periodos cortos de tiempo. Mientras se aumenta la escala de agregación de las variables, éstas dejan de representar la energía evaporativa real del ambiente.

La Figura 5 muestra la distribución del error absoluto en las estimaciones diaria y mensual de la ETo. Todos los valores son positivos en este diagrama de cajas, debido a que los errores resultaron ser siempre de sobrestimación. Al comparar los valores de los diagramas se observa una diferencia extrema entre los dos cálculos. Por ejemplo, se puede ver que el valor máximo del error en la estimación diaria es prácticamente igual al valor mínimo en la estimación mensual. La distribución más amplia en el cálculo mensual, cuya diferencia entre los valores máximo y mínimo es mayor a 0,4 mm día⁻¹ mientras que este valor es apenas mayor a 0,1 mm día⁻¹, demuestra el aumento de la incertidumbre que conlleva el promediar las variables en periodos mayores de tiempo.

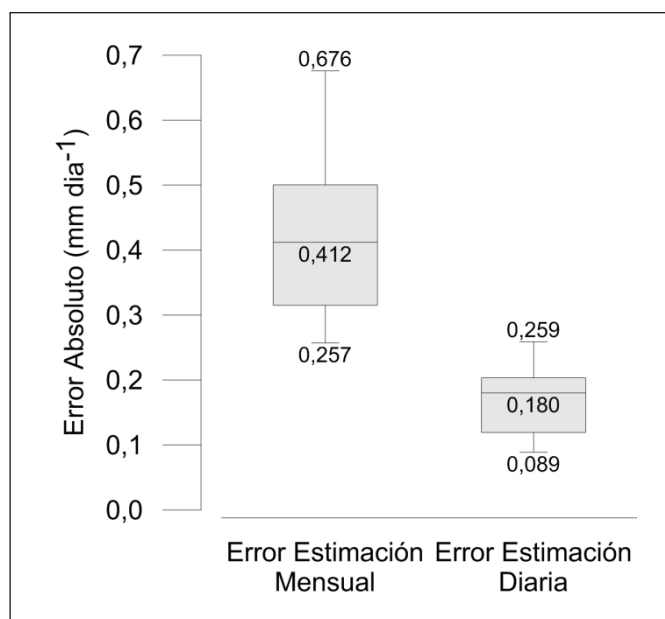


Figura 5. Diagrama de cajas de la distribución del error absoluto en el cálculo del promedio diario mensual de la ETo. Cada una de las cajas encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la mediana, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo por objeto evaluar la calidad de las estimaciones de la ETo al utilizar distintas escalas temporales en el cálculo para el ecosistema de páramo. En especial nos interesaba conocer qué tan importante es contar con datos horarios para la estimación de la ETo, ya que en los estudios meteorológicos realizados en zonas remotas solamente se cuenta con estaciones convencionales y por lo tanto con datos diarios o mensuales. Esto se realizó promediando las variables meteorológicas involucradas en la ecuación de Penman-Monteith (radiación neta, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura) horaria, diaria y mensualmente usando datos de una estación meteorológica ubicada a 3800 m.

Al agregar los resultados del cálculo diario y horario, a promedio diario mensual, y compararlos con el cálculo mensual, se observó que a mayor escala de agregación de datos, mayor es el error cometido en la estimación de la ETo. Se halló que al promediar las variables en periodos mayores, se incurre en una sobrestimación de la ETo. Particularmente al aplicar estos valores sobrestimados de la ETo en el balance hidrológico se incurriría ventajosamente en una subestimación real de la cantidad de agua disponible en el sistema, ya que lo contrario a esto resultaría muy negativo en un proyecto de aprovechamiento de agua.

Para este sitio de alta montaña se determinó que existe baja confiabilidad al estimar la ETo con promedios mensuales de las variables, contrario a lo expresado por Allen et. al. (2006) en la publicación número 56 de FAO (Allen et. al., 2006), en la que se indica que las estimaciones mensuales son muy similares a las realizadas con un promedio diario de las variables. En este caso puntual se observó una diferencia promedio del 14% entre los dos cálculos. Se obtuvieron además valores del error relativo promedio y APB mayores al 20% al comparar el cálculo mensual con el horario, lo que califica la estimación como pésima. Este error se acentúa en este ecosistema, debido a la alta variabilidad diaria y subdiaria de las condiciones meteorológicas, que causa que los promedios para periodos largos no representen las condiciones reales del ambiente y se introduzcan errores en el cálculo. Esto supone que para el ecosistema en estudio se puede incurrir en un error significativo al estimar la ETo con datos promedios mensuales.

En base a lo observado en esta investigación y los errores que se revelan al calcular la ETo en periodos diarios y mensuales, se concluye que una estación meteorológica automática con una alta frecuencia de muestreo de las variables es de vital importancia para la correcta estimación de la ETo en cualquier aplicación hidrológica o de planificación agrícola. Para estudios futuros en los Andes se plantea la necesidad de disponer de un mayor número de estacio-

nes meteorológicas automáticas, diferentes frecuencias de muestreo de las variables, y la investigación a nivel espacio-temporal de la evapotranspiración en gradientes de páramo andino.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a los proyectos PIC-08-460 y PIC-11-715 financiados por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Ecuador y la Universidad de Cuenca a través de su Dirección de Investigación. Los autores agradecen a Ryan Padrón por el procesamiento de datos del disdrómetro laser. Los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos ayudaron a mejorar la versión inicial del artículo.

REFERENCIAS

- Alkaeed., O., F. Clariza, K. Jinno & A. Tsutsumi. 2006. Comparison of Several Reference Evapotranspiration Methods for Itoshima Peninsula Area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University* 66(1): 1-14.
- Allen, R.G., L. Pereira, D. Raes & M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Vol. 56, Food & Agriculture Org.
- Buytaert, W., R. Céleri, B. De Bievre, F. Cisneros, G. Wyseure, J. Deckers & R. Hoftede. 2006. Human Impact on the Hydrology of the Andean Páramos. *Earth-Science Reviews* 79(1-2): 53-72.
- Céleri, R. & J. Feyen. 2009. The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development* 29(4): 350-355.
- Droogers, P. & R. Allen. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16: 33-45.
- ElNesr, M., A.A. Alazba & M.T Amin. 2011. Modified Hargreaves' Method as an Alternative to the Penman-Monteith Method in the Kingdom of Saudi Arabia. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 5(6): 1058-1069.
- García, M., D. Raes, R. Allen, & C. Herbas. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology* 125(1-2): 67-82.
- Gunston, H. & C. H. Batchelor. 1983. A Comparison of the Priestley-Taylor and Penman Methods for Estimating Reference Crop Evapotranspiration in Tropical Countries. *Agricultural Water Management* 6(1): 65 - 77.
- Hargreaves, G. H. & R. G. Allen. 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equa-

tion. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(1): 53–63.

Hauviller, AP., H. Días, D. Pérez, & M. Rodríguez Loustau. 2006. Un aporte a la estimación de la evapotranspiración del cultivo juvenil de arándano utilizando metodología según FAO en localidades de la Mesopotamia argentina. www.riegoyfertiriego.com

Josse, C., F. Cuesta, G. Navarro, V. Barrena, E. Cabrera, E. Chacón-Moreno, W. Ferreira, M. Peralvo, J. Saito & A. Tovar. 2009. Atlas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAvH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL. Lima.

Kalthoff, N., M. Fiebig-Wittmaack, C. Meißner, M. Kohle, M. Uriarte, I. Bischoff-Gausß & E. Gonzales. 2006. The Energy Balance, Evapo-transpiration and Nocturnal Dew Deposition of an Arid Valley in the Andes. *Journal of Arid Environments* 65(3): 420–443.

Mohammadieh., M. Noori., M. Mohammadi, J. Helali, B. Nazari, B & T. Sohrabi. 2009. Evaluation of Hargreaves equation for calculating daily ETo (case study: North West of Iran). The Free Library.

Mosquera, G., P. Lazo, I. Cárdenas & P. Crespo. 2012. Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo: mediante el uso de los isótopos estables deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$). *Maskana* 3(2): 87–105.

Padrón, R. 2013. Análisis de la estructura de la lluvia del páramo. Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. 100 p.

Raghuwanshi, NS. & WW. Wallender., 1998. Converting from Pan Evaporation to Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 124(5): 275–277.

Stöckle, C., J. Kjelgaard, & G. Bellocchi. 2004. Evaluation of Estimated Weather Data for Calculating Penman-Monteith Reference Crop Evapotranspiration. *Irrigation Science* 23(1): 39–46.

Sumner, D. & J. Jacobs. 2005. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Reference Evapotranspiration, and Pan Evaporation Methods to Estimate Pasture Evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 308(1–4): 81–104.

Tokay, A., P. Bashor & V. McDowell. 2009. Comparison of Rain Gauge Measurements in the Mid-Atlantic Region. *Journal of Hydrometeorology* 11(2): 553–565.

Trajkovic, S. 2005. Temperature-based Approaches for Estimating Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(4): 316–323.

Vega, C. & J. Jara. 2009. Estimación de la Evapotranspiración de Referencia Para dos Zonas (Costa y Región Andina) del Ecuador. *Engenharia Agrícola* 29(3): 390–403.

Vuille, M., R.S. Bradley & F. Keimig. 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 105 (D10): 12447–12460

Xu, C.-Y. & V. P. Singh. 2001. Evaluation and Generalization of Temperature-based Methods for Calculating Evaporation. *Hydrological Processes* 15(2): 305–319.

Yoder, RE., LO. Odhiambo & WC. Wright. 2005. Evaluation of Methods for Estimating Daily Reference Crop Evapotranspiration at a Site in the Humid Southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture* 21(2): 197–202.