



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA
AGRICULTURA**

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO AGROPECUARIO**

**TEMA: CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE
INFORMACIÓN AGROMETEOROLÓGICA DE LA ESTACIÓN MA-56**

AUTOR: SANGUCHO MONTENEGRO, JUAN FRANCISCO

DIRECTOR: Ing. ARCE CARRIEL, MARCELO RAÚL Mgs.

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE INFORMACIÓN AGROMETEOROLÓGICA DE LA ESTACIÓN MA-56*” fue realizado por el señor *Sangucho Montenegro, Juan Francisco*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 14 de marzo de 2018

Ing. Arce Carriel, Marcelo Raúl Mgs.

C. C. 170490201-2



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Sangucho Montenegro, Juan Francisco*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Cálculo de la evapotranspiración a partir de información agrometeorológica de la estación MA-56*, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 14 de marzo de 2018

.....
Sangucho Montenegro, Juan Francisco

C.C. 171819362-4



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORIZACIÓN

Yo, *Sangucho Montenegro, Juan Francisco*, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *Cálculo de la evapotranspiración a partir de información agrometeorológica de la estación MA-56*, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 14 de marzo de 2018

.....
Sangucho Montenegro, Juan Francisco

C.C. 171819362-4

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis queridos padres, Alfredo Sangucho y Rosalía Montenegro, mis primeros maestros, modelos de trabajo, sacrificio y dedicación. Porque con sus consejos, amor inagotable y paciencia, me motivan día a día para alcanzar mis metas.

Juan Francisco

AGRADECIMIENTO

A Dios Todopoderoso y la Santísima Virgen María, por ser mi fortaleza y guía, por estar a mi lado a toda hora y en todo lugar, por llenar mi vida con bendiciones durante mis años de estudio.

A mis padres y hermanos, que siempre están prestos a tenderme una mano; en especial a mi querida hermana Rocío, quién se ha convertido en mi ejemplo a seguir.

Al personal docente y administrativo de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por su distinguida labor formando profesionales para el país.

Al Ingeniero Marcelo Arce, por brindarme su conocimiento y confianza para llevar a cabo este trabajo de investigación; por su paciencia para tutelar el desarrollo y finalización del proyecto.

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron para el desarrollo del presente trabajo; donde debo resaltar la participación de la Ingeniera Soledad Aguirre, por su valiosa colaboración en la estructuración del perfil del proyecto y en los cimientos de la investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN i

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD ii

AUTORIZACIÓN iii

DEDICATORIA iv

AGRADECIMIENTO v

ÍNDICE DE CONTENIDOS vi

ÍNDICE DE TABLAS ix

ÍNDICE DE FIGURAS x

RESUMEN xi

ABSTRACT xii

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción 1

1.2 Objetivos 2

1.2.1 Objetivo general 2

1.2.2 Objetivos específicos 3

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1	Generalidades sobre el cálculo de la evapotranspiración en el Ecuador.....	4
2.2	Concepto de evapotranspiración	5
2.2.1	Determinación de la evapotranspiración de referencia (<i>ET_o</i>).....	7
2.3	Evapotranspiración de referencia calculada con datos meteorológicos	7
2.3.1	Método de Holdridge (Ho).....	8
2.3.2	Método de Papadakis (Pa).....	9
2.3.3	Método de Thornthwaite (Th).....	11
2.3.4	Método de Blaney y Criddle (B-C).....	16
2.3.5	Método de Christiansen y Yépez (C-Y).....	18
2.3.6	Método de FAO Penman-Monteith (P-M).....	19
2.4	Cálculo de evapotranspiración usando el Tanque Clase A	20

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Ubicación del lugar de investigación	22
3.1.1	Ubicación Política	22
3.1.2	Ubicación Geográfica	22
3.1.3	Ubicación Ecológica	23

3.2	Materiales	23
3.3	Métodos.....	23
3.3.1	Tabulaciones y análisis de la serie de datos climáticos	23
3.3.2	Homogeneidad de la serie de datos.....	25
3.3.3	Registro con datos faltantes	28
3.3.4	Selección del método óptimo de cálculo de evapotranspiración	29
3.3.5	Elaboración de diagramas de periodos secos y lluviosos	29

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Datos meteorológicos de la estación MA-56	30
4.2.	Método de cálculo de evapotranspiración.....	33

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones	38
5.2	Recomendaciones.....	39
5.3	Bibliografía	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Tensión de vapor de saturación e°, [mb] ó [hPa], en función de la temperatura</i>	11
Tabla 2 <i>Índice de calor mensual en función de la temperatura</i>	13
Tabla 3 <i>Valor coeficiente "a"</i>	13
Tabla 4 <i>Valor "fTh" para la corrección de la ETo (Latitud Norte)</i>	15
Tabla 5 <i>Valor "fTh" para la corrección de la ETo (Latitud Sur)</i>	15
Tabla 6 <i>Porcentaje de horas luz diarias en América del sur</i>	16
Tabla 7 <i>Criterio de Doorembos</i>	26
Tabla 8 <i>Análisis de doble masa para la temperatura media</i>	31
Tabla 9 <i>Serie de datos mensual multianual (1998-2015) de la Estación MA-56</i>	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Predicción de la ETo a partir del factor f de Blaney–Criddle</i>	17
Figura 2 <i>Imagen de la zona en estudio</i>	22
Figura 3 <i>Estaciones circundantes a MA-56</i>	24
Figura 4 <i>Ubicación de las estaciones analizadas</i>	28
Figura 5 <i>Análisis de doble masa para temperatura media</i>	31
Figura 6 <i>Análisis de doble masa para la heliofanía</i>	32
Figura 7 <i>Comparación de métodos de cálculo para evapotranspiración</i>	35
Figura 8 <i>Diagrama ombrotérmico de la estación MA-56</i>	36

RESUMEN

El presente trabajo fue realizado con la información climática de la estación agrometeorológica MA-56, de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, con el fin de identificar una ecuación que permita el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en la hacienda El Prado y su área de influencia. Se inició verificando la calidad de la información a partir de una revisión manual para posteriormente aplicar un análisis de dobles masas que permita identificar errores dentro de la serie de datos comparando la información de la estación MA-56 con dos estaciones homogéneas, M002 y M003. Las variables climáticas sometidas a control fueron: temperatura, precipitación, humedad relativa, heliofanía, velocidad del viento y evaporación. Una vez obtenida una base de datos depurada y homogénea, se calculó la ET_o por diferentes métodos utilizados comúnmente en estudios de ecología y agricultura: Holdridge, Papadakis, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Christiansen-Yépez, Penman-Montieth y tanque clase A. De estos, el método Penman-Monthiet mostró mejor comportamiento dentro de un análisis mensual-multianual de ET_o , comparándolo con el climograma ombrotérmico construido a partir de la precipitación y la temperatura; estableciendo al método Penman-Montieth como el más aplicable para la estimación de ET_o en la zona de estudio, por la cantidad de variables que utiliza dentro de su expresión matemática.

PALABRAS CLAVE:

- **VARIABLE CLIMÁTICA**
- **PENMAN-MONTIETH**
- **TANQUE CLASE A**
- **OMBROTÉRMICO**

ABSTRACT

The present work was developed with the climatic information of the agrometeorological station MA-56, of Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, in order to identify an equation that permits the estimation of reference evapotranspiration (ET_o) at Hacienda El Prado farm and its influence area. Verifying the information quality from a manual review to a double masses analysis, the study identified errors within the data series, comparing the information of the MA-56 station with two homogeneous stations, M002 and M003. Temperature, precipitation, relative humidity, insolation, wind speed and evaporation were the climatic variables under control. Once the data base was debugged, ET_o was calculated with different methods commonly used in ecology and agriculture studies: Holdridge, Papadakis, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Christiansen-Yépez, Penman-Montieth and class A pan. Penman-Monthiet method showed the best behavior within a monthly-multiannual ET_o analysis, comparing it results with an ombrothermic climogram obtained from precipitation and temperature data; proving that Penman-Montieth method is the most suitable for estimation of ET_o in the study area, due to the amount of variables used in its mathematical expression.

KEY WORDS:

- CLIMATE VARIABLE
- PENMAN-MONTIETH
- CLASS A PAN
- OMBROTHERMIC

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

El término evapotranspiración se refiere a la cantidad de agua que se pierde en un cultivo, por evaporación de la superficie y transpiración de la especie vegetal. Esta pérdida de humedad es de relevante importancia en modelos de producción primaria así como en proyectos relacionados con recursos hídricos y agricultura de precisión, ya sea para el análisis de cambio climático o en el fortalecimiento de la seguridad alimentaria de una zona (Rivas, 2004).

A pesar de que las fórmulas que estiman el valor de la evapotranspiración son sujetas a rigurosas calibraciones por parte de los investigadores que las generan, muchas son válidas únicamente para las condiciones agroclimáticas específicas y no es recomendable su aplicación en escenarios diferentes a las que fueron desarrolladas de manera preliminar (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). Adicionalmente, los métodos experimentales de campo para concebir una nueva fórmula de cálculo son en general costosos, exigen precisión en las mediciones y deben ser realizados y analizados sólo por personal capacitado. Por estos motivos, es común encontrar colecciones de formulas modificadas, para adaptar las ecuaciones de estimación de evapotranspiración a las condiciones propias de un país o región (Cobo, 1984).

En nuestro medio la obtención de información climática no es complicada, lo que facilita la utilización de ecuaciones que calculan el valor de evapotranspiración. Sin embargo, con frecuencia se usa indiscriminadamente cualquier fórmula sin una previa evaluación que confirme la fiabilidad de los resultados a obtenerse. Los errores que se presentan por una mala elección de

una expresión matemática nos generará errores ya sea en dimensionamiento de obras hidráulicas así como en eficiencia de producción agrícola, entre otros, dependiendo del tipo de estudio que se esté llevando (Cobo, 1984).

El estudio de evapotranspiración y cálculo de necesidades hídricas son punto de partida para varios procesos correlacionados, entre los cuales podemos destacar: El riego y drenaje de campos agrícolas, planificación y administración de recursos hídricos de una cuenca, predicción de rendimientos en cultivos, calendarización agrícola, predicción de eventos extremos, susceptibilidad a procesos erosivos, clasificaciones climáticas y agroclimáticas, lixiviación o lavado de nutrientes, entre otros (INAMHI, 2006).

En la Hacienda “El Prado” se cuenta con la estación agrometeorológica IASA (MA-56) de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, donde anteriormente no se han realizado estudios relacionados con la interpretación de factores climáticos para su correspondiente aplicación. Buscando completar este vacío, la presente investigación trabajará con ecuaciones comúnmente usadas en el país, para determinar el valor de la evapotranspiración a partir de información agrometeorológica; de esta manera, encontrar el método o expresión que mejor se ajuste a las condiciones de la zona de influencia de la estación MA-56.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar el valor de la evapotranspiración de referencia (ET_0), usando datos meteorológicos, para recomendaciones de riego en cultivos a campo abierto de la Hacienda El Prado y su área de influencia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Depurar los datos levantados por la estación MA-56 para una serie de variables climáticas de 18 años (1998 - 2015).
- Determinar el método de cálculo de evapotranspiración de referencia que mejor se adapte a las condiciones de la estación MA-56 y su zona de influencia.
- Elaborar hojas electrónicas de cálculo para el ordenamiento de datos climáticos y estimación de la evapotranspiración de referencia, que servirán de base para el análisis de necesidades hídricas en la zona en estudio.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades sobre el cálculo de la evapotranspiración en el Ecuador

Durante los últimos 50 años se han desarrollado diferentes métodos, a nivel mundial, para determinar el valor de la evapotranspiración; sin embargo, debido a la complejidad para medir directamente su valor, diferentes investigadores han generado ecuaciones que permiten calcular la evapotranspiración basándose en datos climáticos registrados por estaciones agrometeorológicas (Beltri, 2008).

En el Ecuador no se cuenta con una expresión matemática específica que integre las variables climáticas para el cálculo de la evapotranspiración, por lo que es generalizado el uso de ecuaciones emitidas a partir de investigaciones realizadas en el extranjero, para estudios de recursos hídricos dentro del territorio nacional. Entre las fórmulas más utilizadas, en los primeros estudios sobre evapotranspiración del país, se encuentran: Holdridge, Budyko, Blaney-Criddle, Ivanov, Lowry-Jhonson, Papadakis, Thornthwaite, Linacre, Makkink, Turc, Hargreaves, Christiansen, Penman, entre otros.

El “Estudio e investigación sobre evapotranspiración en el Ecuador”, 1984, denota al método Christiansen, modificado en 1976 por Yépez, como el que mejor se acopla a la zona de Pichincha para el cálculo de evapotranspiración (Cobo, 1984). Si bien este resultado marcó un precedente importante para posteriores estudios relacionados con recursos hídricos, son pocas las investigaciones que pusieron en práctica las recomendaciones emitidas por dicho estudio.

La obra “Cálculo de la necesidad de agua de las plantas con datos meteorológicos”, 1994, recopila diferentes fórmulas para el cálculo de evapotranspiración, y las aplica en la provincia de Chimborazo (Pérez, 1992); resaltando la importancia de seleccionar un eficaz método de cálculo de evapotranspiración para una zona específica.

Investigaciones posteriores al año 2006, en Latinoamérica, realizan las estimaciones de evapotranspiración de referencia siguiendo los lineamientos planteados por las “Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”, propuestos por la FAO en su serie de estudios sobre riego y drenaje; donde se recomienda a la ecuación Penman-Monteith como el método más fiable a ser utilizado por la cantidad de variables climáticas usadas en su expresión.

2.2 Concepto de evapotranspiración

El total de agua consumida en un cultivo es la suma de la Evaporación y la Transpiración, desde la superficie del suelo y la planta, respectivamente. La suma de estos dos procesos es lo que se conoce como evapotranspiración (Beltri, 2008).

Es común encontrar, en textos de riego, los términos *Evapotranspiración Potencial* y *Evapotranspiración real*; la primera se refiere a la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas; la segunda es la evapotranspiración que se produce realmente en las condiciones específicas existentes (Sánchez, 2006). Según el manual 56 de la FAO “Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”, estos conceptos son difusos, pues cada tipo de planta evapotranspira una cantidad de agua diferente, por lo cual se propone que el concepto de evapotranspiración incluya tres diferentes definiciones (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006):

- **Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o):** Es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. Los únicos factores que afectan la evapotranspiración de referencia son los parámetros climáticos, por lo tanto, esta es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).
- **Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c):** Se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes. La relación ET_c/ET_o puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente del Cultivo (K_c) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).
- **Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_c aj$):** Se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ET_c debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ET_c . La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico K_s o ajustando K_c a todos los otros

tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

2.2.1 Determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o)

Existen dos vías para determinar el valor de ET_o ; por una parte, los métodos que se pueden denominar de *medición* o *directos*, y por otra, los métodos de *estimación* o *indirectos* (Sánchez M. , 2001).

Los métodos directos controlan ingresos y salidas de agua en el suelo que sustenta una cubierta vegetal; por ello cuantifican directamente la ET_o en cualquier cultivo para las condiciones de suelo, clima y disponibilidad de agua del lugar en estudio (González, 2003). Los métodos indirectos correlacionan medidas obtenidas por métodos directos y datos meteorológicos, permitiendo derivar fórmulas empíricas que estimen la capacidad evaporativa de un ambiente determinado (Sánchez M. , 2001).

2.3 Evapotranspiración de referencia calculada con datos meteorológicos

Si bien, la ecuación Penman-Monteith es la que mejor comportamiento demuestra al utilizarla en diferentes zonas del planeta, esta requiere de varios datos climáticos medidos por las estaciones agrometeorológicas. En lugares donde la información climática sea limitada, estamos obligados a utilizar ecuaciones más sencillas que nos permitan obtener rápidamente una estimación del valor de ET_o . Con este referente, presentamos a continuación un grupo de expresiones de cálculo para la ET_o , considerando un orden ascendente en cuanto a su complejidad.

2.3.1 Método de Holdridge (Ho)

Este método utiliza la biotemperatura (0 a 30 °C), donde la temperatura del aire establece la intensidad de los procesos de fotosíntesis, respiración y transpiración en las plantas, y la evaporación del agua contenida en el suelo (Pérez, 1992).

Según la Guía Explicativa del Mapa Ecológico del Perú (1995), en latitudes bajas y elevaciones bajas (<1000 m), donde la temperatura media mensual es mayor a 24 °C, la biotemperatura se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$Biotemperatura = T_{med} - \left(\frac{3 \times \text{Latitud en grados}}{100} \right) \times (T_{med} - 24)^2$$

En latitudes bajas y alturas mayores de 3500 m, con temperatura promedio menor a 6 °C, donde se presentan temperaturas mínimas diarias menores que 0°C, se recurre a la expresión:

$$Biotemperatura = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} \times \frac{T_{max}}{2}$$

En latitudes bajas y elevaciones medias (1000 a 3000 m), con temperaturas promedio entre 6 y 24 °C, se debe considerar a la biotemperatura de manera análoga con la media de la temperatura del aire. Tomando en cuenta ésta consideración, el cálculo de la evapotranspiración según el método de Holdridge se puede escribir como (Vega & Jara, 2009):

$$ET_{O_{Ho}} = k_{Ho} * T_{med}$$

Donde:

$ET_{O_{Ho}}$ evapotranspiración de referencia según Holdridge [mm],

T_{med} temperatura (biotemperatura) media anual, mensual o diaria [°C],

k_{Ho} constante [-], que toma los valores siguientes:

	365 días	366 días
k_{Ho} anual	58,93	58,93
k_{Ho} 31 días	5,01	4,99
k_{Ho} 30 días	4,84	4,83
k_{Ho} 29 días		4,67
k_{Ho} 28 días	4,52	
k_{Ho} 1 día	0,161	0,161

2.3.2 Método de Papadakis (Pa)

El método de Papadakis está basado en el déficit de saturación de vapor (diferencia entre la presión de saturación y la presión real de vapor del aire), y este déficit a su vez depende de la cuantificación de la humedad relativa y las temperaturas (Almorox, 2007).

La presión real de vapor, ejercida por el vapor de agua en el aire, corresponde a la presión de saturación de vapor en temperatura de punto de rocío. De esto podemos afirmar que mientras más seco este el aire, más grande será la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura del punto de rocío (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La temperatura de punto de rocío o punto de condensación es la temperatura a la cual el aire necesita ser enfriado para saturarse. Generalmente esta temperatura de punto de rocío es muy cercana a la temperatura mínima, por lo que se recomienda, para el cálculo de evapotranspiración según Papadakis, reemplazar a la temperatura de punto de rocío por la temperatura mínima

menos dos (este valor puede variar según la zona), ya que no se presentaran grandes errores al calcular evapotranspiración sobre la base de la temperatura máxima (Pérez, 1992).

Partiendo de lo anteriormente expuesto, se utiliza la siguiente expresión para el cálculo de la evapotranspiración según el método Papadakis:

$$ET_{oPa} = 5,625 * [e^{\circ}(T_{max}) - e^{\circ}(T_{min} - 2)]$$

Donde:

ET_{oPa} evapotranspiración de referencia según Papadakis [mm],

$e^{\circ}(T_{max})$ presión de saturación de vapor para la temperatura media de las máximas del mes considerado [mb] o [hPa],

$e^{\circ}(T_{min} - 2)$ presión de saturación de vapor para la temperatura media de las mínimas del mes considerado, menos 2°C [mb] o [hPa].

La presión de vapor de saturación $e^{\circ}(T)$, se expresa como (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006):

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \times T}{T + 237,3}\right)$$

Donde:

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

T temperatura del aire [°C],

$\exp^{(\cdot)}$ 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia (..).

Otra forma de calcular la presión de vapor de saturación e° , en función de la temperatura en $^{\circ}\text{C}$, es mediante la fórmula de Bossen, donde el valor de e° estará dado en milibares o hectopascales (1mb = 1hPa) (Almorox, 2007):

$$e^{\circ} = 33,8639 * [(0,00738 * T + 0,8072)^8 - 0,000019 * (1,8 * T + 48) + 0,001316]$$

Los valores de e° , en mb ó hPa, en función de la temperatura, también se pueden hallar directamente a partir de la Tabla 1.

Tabla 1

Tensión de vapor de saturación e° , [mb] ó [hPa], en función de la temperatura

T[$^{\circ}\text{C}$]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
5	8,74	8,80	8,86	8,92	8,98	9,04	9,11	9,17	9,23	9,30
6	9,36	9,43	9,49	9,56	9,63	9,69	9,76	9,83	9,89	9,96
7	10,03	10,10	10,17	10,24	10,31	10,38	10,45	10,52	10,60	10,67
8	10,74	10,81	10,89	10,96	11,04	11,11	11,19	11,26	11,34	11,42
9	11,49	11,57	11,65	11,73	11,81	11,89	11,97	12,05	12,13	12,21
10	12,29	12,37	12,46	12,54	12,62	12,71	12,79	12,88	12,97	13,05
11	13,14	13,23	13,31	13,40	13,49	13,58	13,67	13,76	13,85	13,94
12	14,04	14,13	14,22	14,32	14,41	14,51	14,60	14,70	14,79	14,89
13	14,99	15,09	15,18	15,28	15,38	15,48	15,59	15,69	15,79	15,89
14	15,99	16,10	16,20	16,31	16,41	16,52	16,63	16,73	16,84	16,95
15	17,06	17,17	17,28	17,39	17,50	17,62	17,73	17,84	17,96	18,07
16	18,19	18,31	18,42	18,54	18,66	18,78	18,90	19,02	19,14	19,26
17	19,38	19,50	19,63	19,75	19,88	20,00	20,13	20,26	20,38	20,51
18	20,64	20,77	20,90	21,03	21,17	21,30	21,43	21,57	21,70	21,84
19	21,97	22,11	22,25	22,39	22,53	22,67	22,81	22,95	23,09	23,24
20	23,38	23,53	23,67	23,82	23,97	24,11	24,26	24,41	24,56	24,71
21	24,87	25,02	25,17	25,33	25,48	25,64	25,80	25,95	26,11	26,27
22	26,43	26,59	26,76	26,92	27,08	27,25	27,41	27,58	27,75	27,92
23	28,09	28,26	28,43	28,60	28,77	28,95	29,12	29,30	29,47	29,65
24	29,83	30,01	30,19	30,37	30,55	30,73	30,92	31,10	31,29	31,48

Fuente: (Almorox, 2007)

2.3.3 Método de Thornthwaite (Th)

El cálculo de la evapotranspiración, según Thornthwaite, ha obtenido resultados valederos en regiones semiáridas y semilluviosas (Pérez, 1992). El método es muy utilizado en estimaciones

de balance hídrico para Climatología e Hidrología a nivel de cuencas, así como también en índices y clasificaciones climáticas (Almorox, 2007).

Según esta fórmula, dentro de ciertos límites, existe una relación directa entre el logaritmo de la temperatura y el logaritmo de la evapotranspiración sin ajustar (Pérez, 1992):

$$et = 16 \left(\frac{10 * T_{med}}{I} \right)^a$$

Donde:

et evapotranspiración sin ajustar para un mes de 30 días [mm],

T_{med} temperatura media de cada mes para todos los años [°C],

I índice de calor anual [-],

a parámetro [-] que se calcula en función del índice de calor anual, según la expresión:

$$a = 0,000000675 * I^3 - 0,0000771 * I^2 + 0,01792 * I + 0,49239$$

$$I = \sum i_j; \quad j = 1, \dots, 12$$

$$i = \left(\frac{T_{med}}{5} \right)^{1,514}$$

Donde:

i índice térmico o índice de calor mensual [-],

T_{med} temperatura media mensual para todos los años [°C].

El índice calórico mensual, i, puede ser determinado utilizando el valor de la temperatura media mensual en la Tabla 2 de transformación; se obtiene a partir de una temperatura

determinada, entrando con el valor entero por el eje vertical y con el decimal por el horizontal.

Consecuentemente, el parámetro “a” puede ser determinado en la Tabla 3, a partir del valor de índice calórico anual.

Tabla 2

Índice de calor mensual en función de la temperatura


Tm(°C)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
7	1.66	1.7	1.74	1.77	1.81	1.85	1.88	1.92	1.96	2
8	2.04	2.08	2.11	2.15	2.19	2.23	2.27	2.31	2.35	2.39
9	2.43	2.48	2.52	2.56	2.6	2.64	2.68	2.73	2.77	2.81
10	2.86	2.9	2.94	2.99	3.03	3.07	3.12	3.16	3.21	3.25
11	3.3	3.34	3.39	3.44	3.48	3.53	3.58	3.62	3.67	3.72
12	3.76	3.81	3.86	3.91	3.96	4	4.05	4.1	4.15	4.2
13	4.25	4.3	4.35	4.4	4.45	4.5	4.55	4.6	4.65	4.7
14	4.75	4.8	4.86	4.91	4.96	5.01	5.07	5.12	5.17	5.22
15	5.28	5.33	5.38	5.44	5.49	5.55	5.6	5.65	5.71	5.76
16	5.82	5.87	5.93	5.98	6.04	6.1	6.15	6.21	6.26	6.32
17	6.38	6.43	6.49	6.55	6.61	6.66	6.72	6.78	6.84	6.9
18	6.95	7.01	7.07	7.13	7.19	7.25	7.31	7.37	7.43	7.49
19	7.55	7.61	7.67	7.73	7.79	7.85	7.91	7.97	8.03	8.1
20	8.16	8.22	8.28	8.34	8.41	8.47	8.53	8.59	8.66	8.72
21	8.78	8.85	8.91	8.97	9.04	9.1	9.16	9.23	9.29	9.36
22	9.42	9.49	9.55	9.62	9.68	9.75	9.81	9.88	9.95	10.01
23	10.08	10.15	10.21	10.28	10.35	10.41	10.48	10.55	10.61	10.68
24	10.75	10.82	10.89	10.95	11.02	11.09	11.16	11.23	11.3	11.37
25	11.44	11.5	11.57	11.64	11.71	11.78	11.85	11.92	11.99	12.06
26	12.13	12.21	12.28	12.35	12.42	12.49	12.56	12.63	12.7	12.78

Fuente: (Pérez, 1992)

Tabla 3

Valor coeficiente “a”

I	a	I	a	I	a	I	a
21	0.84	52	1.31	83	1.83	114	2.53
22	0.86	53	1.33	84	1.85	115	2.56
23	0.87	54	1.34	85	1.87	116	2.59
24	0.89	55	1.36	86	1.89	117	2.61
25	0.9	56	1.37	87	1.91	118	2.64
26	0.92	57	1.39	88	1.93	119	2.67
27	0.93	58	1.4	89	1.95	120	2.7
28	0.95	59	1.42	90	1.97	121	2.73
29	0.96	60	1.44	91	1.99	122	2.76
30	0.98	61	1.45	92	2.01	123	2.79
31	0.99	62	1.47	93	2.04	124	2.82
32	1.01	63	1.48	94	2.06	125	2.85
33	1.02	64	1.5	95	2.08	126	2.88
34	1.04	65	1.52	96	2.1	127	2.91

CONTINÚA 

I	a	I	a	I	a	I	a
35	1.05	66	1.53	97	2.12	128	2.94
36	1.07	67	1.55	98	2.14	129	2.97
37	1.08	68	1.57	99	2.17	130	3
38	1.1	69	1.58	100	2.19	131	3.03
39	1.11	70	1.6	101	2.21	132	3.07
40	1.13	71	1.62	102	2.23	133	3.1
41	1.14	72	1.63	103	2.26	134	3.13
42	1.16	73	1.65	104	2.28	135	3.17
43	1.17	74	1.67	105	2.31	136	3.2
44	1.19	75	1.69	106	2.33	137	3.24
45	1.2	76	1.71	107	2.35	138	3.27
46	1.22	77	1.72	108	2.38	139	3.31
47	1.23	78	1.74	109	2.4	140	3.34
48	1.25	79	1.76	110	2.43	141	3.38
49	1.26	80	1.78	111	2.45	142	3.42
50	1.28	81	1.8	112	2.48	143	3.45
51	1.3	82	1.82	113	2.51	144	3.49

Fuente: (Pérez, 1992)

Para el cálculo de la Evapotranspiración de un mes determinado será preciso corregir la evapotranspiración no ajustada "et" mediante un coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y la duración máxima posible de insolación de cada día, en función de la latitud (Pérez, 1992); para lo cual se introduce el índice de iluminación mensual, en unidades de 12 horas, que multiplicará a la evapotranspiración no corregida para obtener la evapotranspiración según Thornthwaite (Almorox, 2007).

$$ET_{oTh} = et * f_{Th}$$

Donde:

ET_{oTh} evapotranspiración de referencia según Thornthwaite [mm],

et evapotranspiración mensual sin ajustar [mm],

f_{Th} factor de corrección [-] del número de días del mes (d_{mes}) y la duración máxima de la insolación durante el día N (horas de sol):

$$f_{Th} = \frac{d_{mes}}{30} * \frac{N}{12}$$

Los valores de “N” para todos los meses del año, en zonas cercanas a la latitud cero, corresponden a 12 horas teóricas de permanencia del sol sobre el horizonte (INAMHI, 2006), esto es comprobable utilizando la metodología de cálculo de la duración máxima posible de la insolación.

El valor de "f_{Th}" se puede obtener, así mismo, de las Tablas 4 y 5, coeficientes para la corrección de la evapotranspiración debida a la duración media de la luz solar en latitud norte y sur, respectivamente.

Tabla 4

Valor "fTh" para la corrección de la ETo (Latitud Norte)

LAT N.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.03	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94

Fuente: (Pérez, 1992)

Tabla 5

Valor "fTh" para la corrección de la ETo (Latitud S)

LAT S.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.03	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.06	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15

Fuente: (Pérez, 1992)

2.3.4 Método de Blaney y Criddle (B-C)

Su expresión considera que la Evapotranspiración de referencia está en función de la temperatura y el porcentaje de horas de luz (Brower & Heibloem, 1986):

$$ET_{o_{B-C}} = f_{B-C} * (45,72 * T_m + 812,8)$$

Donde:

- $ET_{o_{B-C}}$ evapotranspiración de referencia según Blaney-Criddle [mm],
- T_{med} temperatura media mensual [°C],
- f_{B-C} factor [-] correspondiente a el producto entre el número de días del mes (d_{mes}) y el máximo número de horas de sol durante el día (N); dividido para el número de horas del año.

El valor de f_{B-C} puede ser sustituido por un porcentaje presentado en la Tabla 6 para distintas latitudes (Erazo, 2008), que debe ser pasado a tanto por uno o dividir por 100 la expresión para aplicar la fórmula de Blaney-Criddle (Pérez, 1992).

Tabla 6
Porcentaje de horas luz diarias en América del sur

LAT S.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	8.66	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
5	8.68	7.76	8.51	8.15	8.34	8.05	8.33	8.38	8.19	8.56	8.37	8.68
10	8.86	7.87	8.53	8.09	8.18	7.06	8.14	8.27	8.17	8.62	8.53	8.88
15	9.05	7.98	8.55	8.02	8.02	7.65	7.95	8.15	8.15	8.68	8.70	9.10
20	9.24	8.09	8.57	7.94	7.85	7.43	7.76	8.03	8.13	8.76	8.87	9.33
25	9.46	8.21	8.60	7.84	7.66	7.20	7.54	7.90	8.11	8.86	9.04	9.58
30	9.70	8.33	8.62	7.73	7.45	6.96	7.31	7.76	8.07	9.97	9.24	9.85
32	9.81	8.39	8.63	7.68	7.36	6.85	7.21	7.70	8.06	9.01	9.33	9.96

Fuente: (Pérez, 1992)

Los efectos del clima sobre la Evapotranspiración, no están del todo definidos por la temperatura y la duración del día que nos brinda el método Blaney y Criddle; por lo que para definir mejor el efecto del clima sobre las necesidades, se puede considerar el valor de $ET_{O_{B-C}}$ como un factor f a ser corregido a partir de las condiciones de humedad relativa mínima, horas de insolación diarias y vientos diarios mostrados en la Figura 1 (Erazo, 2008); y de esta manera predecir un valor de ET_o .

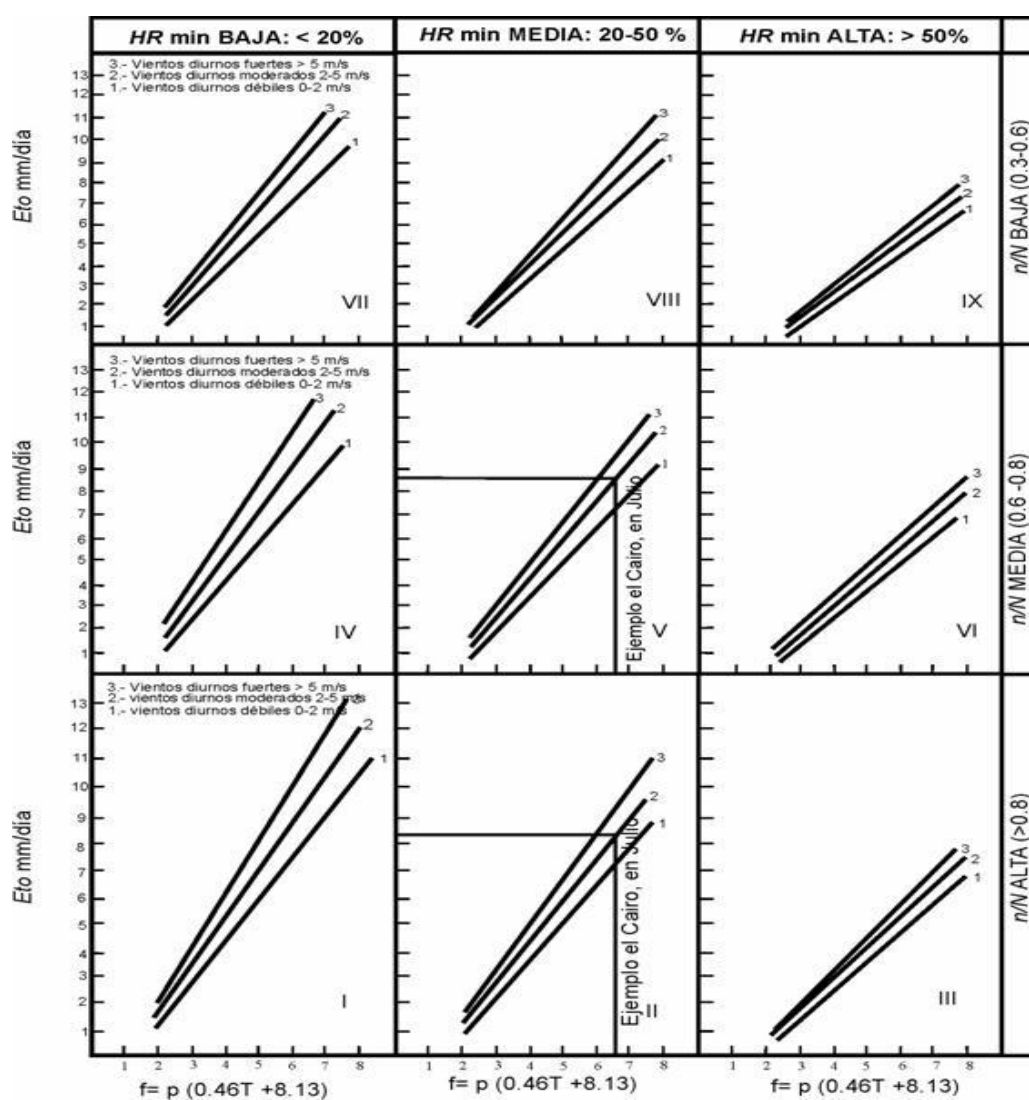


Figura 1 Predicción de la ET_o a partir del factor f de Blaney–Criddle

Fuente: (Erazo, 2008)

2.3.5 Método de Christiansen y Yépez (C-Y)

Este método relaciona la evaporación del tanque clase A, Temperatura media, Humedad relativa, velocidad del viento, elevación de la estación, y radiación extraterrestre.

$$ETo_{C-Y} = 0,36 * R_a * C_T * C_H * C_u * C_z$$

Donde:

ETo_{C-Y} evapotranspiración de referencia según Christiansen-Yépez [mm día⁻¹],

R_a radiación extraterrestre computada [cal cm⁻² día⁻¹], considerando una constante solar de 2 calorías, por centímetro cuadrado y por minuto,

C coeficientes calculados:

$$C_T = 0,23 + 0,77 * \left(\frac{T_{med}}{25}\right)$$

$$C_H = \frac{(1,00 - HR_{med})}{0,30}$$

$$C_u = 0,80 + 0,20 * \left(\frac{u_z}{8}\right)$$

$$C_z = 1,00 + \left(\frac{z}{1000}\right)$$

Donde:

T_{med} temperatura media mensual [°C],

HR_{med} humedad relativa en décimos [-],

u_z velocidad del viento a una altura z (10 m) sobre la superficie del suelo [km h⁻¹],

z altitud, altura sobre el nivel del mar [m].

2.3.6 Método de FAO Penman-Monteith (P-M)

Debido a su amplio uso de parámetros climáticos y a la relativa exactitud demostrada en climas áridos y húmedos, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), recomienda al método FAO Penman-Monteith, como único procedimiento estándar para el cálculo de evapotranspiración de referencia (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

$$ET_{Op-M} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Donde:

ET_{Op-M}	evapotranspiración de referencia según Penman-Monteith [mm día ⁻¹],
R_n	radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m ⁻² día ⁻¹],
R_a	radiación extraterrestre [MJ m ⁻² día ⁻¹],
G	flujo del calor de suelo [MJ m ⁻² día ⁻¹],
T	temperatura media del aire a 2 m de altura [°C],
u_2	velocidad del viento a 2 m de altura [m s ⁻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 [kPa °C ⁻¹],

γ constante psicrométrica [kPa °C⁻¹].

El método Penman-Monteith determina la evapotranspiración de una superficie hipotética de referencia (altura asumida de 0,12 m, resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y albedo de 0,23); y proporciona un valor estándar de evapotranspiración, comparable entre cultivos provenientes de diferentes zonas y en diferentes épocas del año (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

2.4 Cálculo de evapotranspiración usando el Tanque Clase A

El Tanque evaporímetro proporciona una medida del efecto combinado de la temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua (Brower & Heibloem, 1986). Este valor de evaporación permite estimar la evapotranspiración para períodos de 10 o más días y puede ser considerado confiable si se usa correctamente (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Debido a que la pérdida de agua de una superficie libre evaporante difiere a la de una superficie cultivada, es necesaria la utilización de un coeficiente que relacione la evaporación del tanque con la evapotranspiración. Este coeficiente es empírico y se deriva del mismo tanque donde se mide la evaporación (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006):

$$ET_{O_{pan}} = K_p * E_{pan}$$

Donde:

$ET_{O_{pan}}$ evapotranspiración de referencia según el Tanque evaporímetro clase A [mm].

K_p coeficiente del tanque evaporímetro [-],

E_{pan} evaporación del tanque evaporímetro [mm].

Dependiendo del tipo de tanque, tamaño y estado del área circundante, el coeficiente del tanque evaporímetro tendrá valores diferentes. Cuanto más grande es la zona circundante, más rápidamente el aire que se mueve sobre el tanque estará en equilibrio con ella. El valor de K_p se obtiene en función de la velocidad media del viento, humedad relativa media y la distancia al cultivo más cercano en la dirección del viento dominante (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Para el caso de la estación MA-56, el valor de K_p se proviene de la premisa de que el Tanque Clase A se halla situado en cultivo verde circundante:

$$K_p = 0,108 - 0,0286 u_2 + 0,0422 \ln(\text{BORDE}) + 0,1434 \ln(\text{HRm}) - 0,000631 [\ln(\text{BORDE})]^2 \ln(\text{HRm})$$

donde:

K_p	coeficiente del tanque
u_2	velocidad promedio diaria del viento a 2 m altura (m/s)
HRm	humedad relativa media diaria [%] = $(\text{HRmax} + \text{HRmin})/2$
BORDE	distancia al borde de la superficie identificada (pasto o cultivo verde corto y suelo en barbecho o cultivo seco en dirección del viento)

Rango de las variables (estos límites deben ser respetados)

$$1 \text{ m} \leq \text{BORDE} \leq 1\,000 \text{ m}$$

$$30\% \leq \text{HRmedia} \leq 84\%$$

$$1 \text{ m/s} \leq u_2 \leq 8 \text{ m/s}$$

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del lugar de investigación

3.1.1 Ubicación Política

El estudio se llevará a cabo en la Hacienda “El Prado”, situada en la provincia de Pichincha, cantón Rumiñahui, parroquia Sangolquí, sector San Fernando.

3.1.2 Ubicación Geográfica

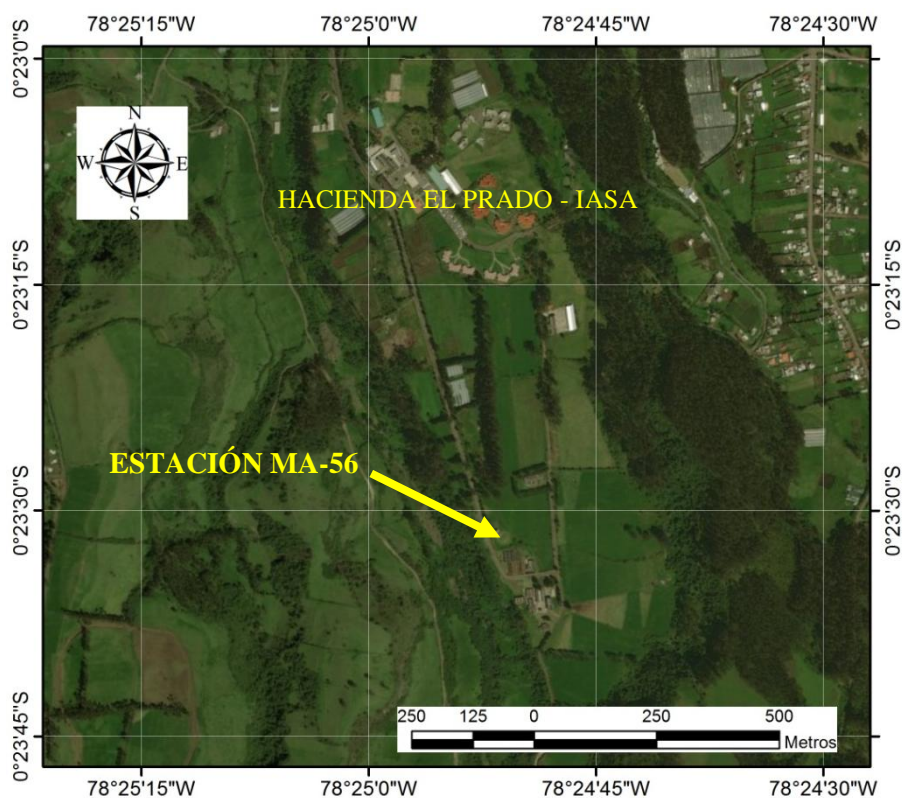


Figura 2 Imagen de la zona en estudio

Fuente: (Google, 2016)

La Hacienda “El Prado” posee un área de 554,66 ha; y se encuentra a $78^{\circ}24'44''$ de longitud oeste y $0^{\circ}23'20''$ de latitud sur, uso horario GMT-5. Limita al norte con la población de San Fernando, al sur con el cerro Pasochoa, al este con la población de Loreto y al oeste con el río Pita.

3.1.3 Ubicación Ecológica

La Hacienda “El Prado” se encuentra a una altitud de 2748 m.s.n.m., correspondiendo al piso altitudinal montano bajo; región latitudinal templado, zona de vida bosque húmedo, clima húmedo temperado. La vegetación encontrada corresponde al Bosque primario andino (árboles, arbustos y pastos) con una temperatura promedio de 14.02°C ; siendo la pluviosidad anual de 1317,58 mm y la humedad relativa promedio del 67,99%.

3.2 Materiales

Instrumental para la medición de datos meteorológicos de la Estación MA-56 (psicrómetro, pluviómetro, tanque evaporímetro clase A, heliógrafo), registros físicos de la serie de datos meteorológicos (1998 – 2015) de la estación MA-56; registros digitales de la serie de datos meteorológicos (1998 – 2015) de estaciones meteorológicas circundantes.

3.3 Métodos

3.3.1 Tabulaciones y análisis de la serie de datos climáticos

De la información climática registrada desde el año 1998 hasta el 2015 en la estación Agrometeorológica MA-56 Hacienda el Prado, de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, denominada anteriormente por el INAMHI como estación “Instituto Agropecuario Superior Andino”, se tabularon los parámetros de: temperaturas,

precipitación, heliofonía, humedad relativa, presión atmosférica, evaporación y velocidad del viento; mismos que se usaron de base para el cálculo de evapotranspiración de referencia en la zona de estudio. El análisis de los datos se realizó a nivel mensual-multianual, debido que no se cuentan con mediciones diarias en la estación MA-56.

La tabulación, corrección y análisis de datos meteorológicos, recolectados en la estación MA-56, fue realizada bajo la supervisión del Ingeniero Agrónomo Marcelo Arce, encargado de la mencionada y actual docente de la cátedra de Agrosistemas de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Adicionalmente, se colectó información de estaciones circundantes a la Hacienda El Prado, con la finalidad de seleccionar estaciones meteorológicas que contengan igual o mayor cantidad de datos con respecto a la serie 1998-2015, analizada en la estación MA-56. De este análisis se identificaron 43 estaciones en un radio de 20 km alrededor de la zona en estudio.

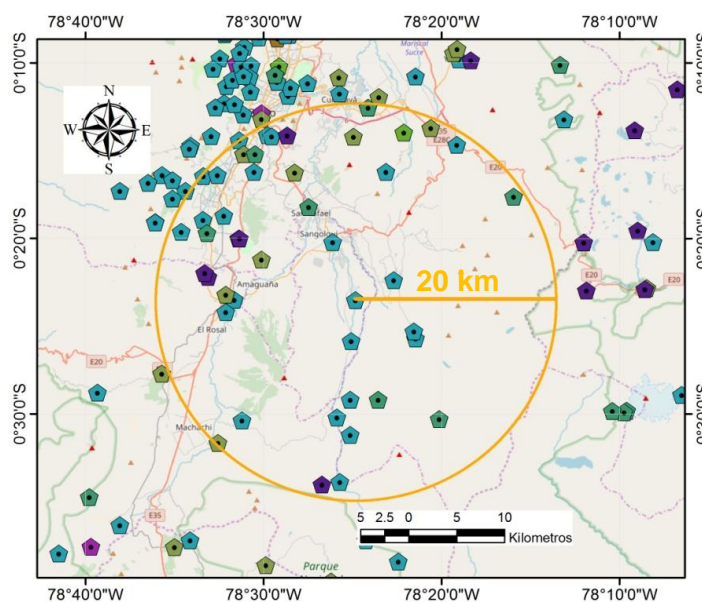


Figura 3 Estaciones circundantes a MA-56

Fuente: (Openstreetmap, 2017)

3.3.2 Homogeneidad de la serie de datos

Los datos climáticos recogidos por una estación meteorológica durante varios años pueden no ser homogéneos; es decir, el registro de una variable climática en particular puede presentar un cambio repentino y por tanto una variación en lo referente a los valores previos. Este fenómeno puede ocurrir debido a varias causas, algunas de las cuales se relacionan con los cambios en el manejo y observación de los instrumentos, y otras que se relacionan con la modificación de las condiciones ambientales del sitio de recolección de datos, tales como urbanización o el rápido desarrollo del riego en el área.

Los cambios provocan que las observaciones hechas antes de las modificaciones pertenezcan a una población estadísticamente diferente a la de los datos recogidos después del cambio. Es por lo tanto necesario aplicar técnicas apropiadas para evaluar si un registro dado se puede considerar homogéneo y, si no, introducir las correcciones necesarias. Para tal efecto se requiere la identificación de cual sub-serie de datos debe ser corregida y para ello se necesita contar con información local.

Con esta pauta, se aplicó la denominada *Prueba del recorrido* a las series de datos meteorológicos colectados. Esta prueba no presupone nada acerca de la distribución de la serie y comprende las siguientes etapas:

- Estimación del valor medio de la serie.
- Cálculo de los desvíos de cada elemento respecto al valor medio. Para este fin se asignó a cada valor de la serie el signo correspondiente, (+) si está el valor de la serie por encima de la media y (-) si está por debajo.

- Cálculo del número de cambios de signo que presenta la serie, y según la Tabla 7 (Criterio de Doorembos), donde, si el número de cambios está dentro del rango admitido, la serie analizada es homogénea, en caso contrario no es homogénea.

Tabla 7
Criterio de Doorembos

Número de observaciones	Intervalo
12	5-8
14	5-10
16	6-11
18	7-12
20	8-13
22	9-14
24	9-16
26	10-17
28	11-18
30	12-19
32	13-20
34	14-21
36	15-22
38	16-23
40	16-25
50	22-30
60	26-36
70	31-41
80	35-47
90	40-52
100	45-57

Fuente: (Cruz, 2013)

La *prueba de recorrido* no es condiciones única y suficiente para afirmar que una serie sea homogénea, sin embargo, debido al comportamiento errático de las series de datos climatológicos, se considerarán homogéneas a todas las series de datos, a menos que una prueba muestre lo contrario (Cruz, 2013).

Posteriormente se utilizó la denominada *Prueba de simples masas* para la verificación de la homogeneidad de datos de las variables meteorológicas de la estación MA-56: temperaturas máximas, temperaturas mínimas, temperaturas medias, heliofanía, humedad relativa y

evaporación. Para el desarrollo de la *prueba de simples masas*, solamente se requiere de la información de la estación meteorológica analizada, y no de otras estaciones circundantes. La utilización de esta prueba es primordial para zonas en estudio que no cuentan con estaciones meteorológicas circundantes completas (que registren todas las variables climatológicas) (Serrano, 2011).

La *prueba de simples masas* tiene la ventaja de encontrar todos los periodos en los cuales la media ha sido afectada de manera significativa. Esta prueba se utiliza para detectar errores graves y dejar el diagnóstico final para corrección de heterogeneidad usando la metodología de *dobles masas* (Serrano, 2011).

La *Prueba de Dobles Masas* requiere al menos 2 registros información, de la estación en evaluación y de una estación homogénea circundante a la zona en estudio; de esta manera a partir de un análisis de regresión se rellenará los segmentos de datos erróneos o faltantes en la serie meteorológica en evaluación. En caso de contar con más de una estación homogénea, se trabajará con la media de las estaciones homogéneas identificadas (INAMHI, 2006).

Los procedimientos necesarios para el análisis de homogeneidad se realizaron según los lineamientos del Manual 56 de la FAO para Riego y Drenaje (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

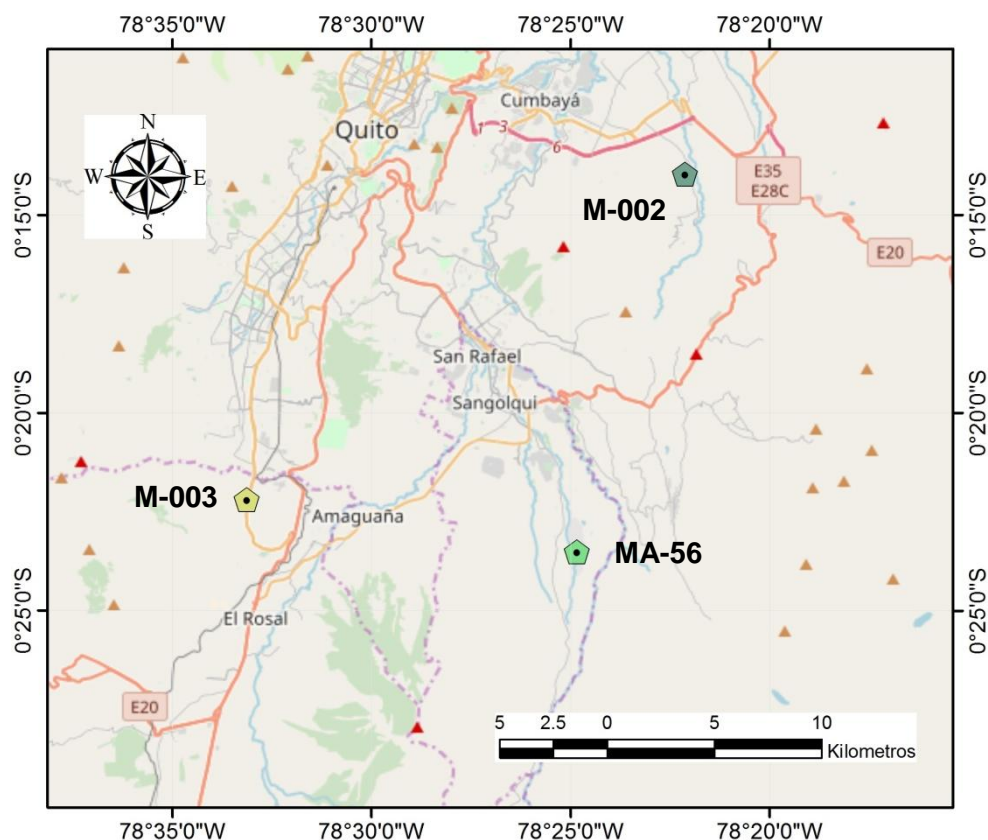


Figura 4 Ubicación de las estaciones analizadas

Fuente: (Openstreetmap, 2017)

3.3.3 Registro con datos faltantes

Los datos climáticos que contienen una variable Y_i observada en una estación dada, son a menudo incompletos debido a interrupciones más o menos cortas en las observaciones. Las interrupciones pueden ocurrir debido a muchas causas; entre las más frecuentes están el malfuncionamiento o el daño de los instrumentos durante cierto período. En caso de tropezar con registros que incluyan datos faltantes, se puede completar estos registros a partir de observaciones X_i de otra estación próxima y confiable. Sin embargo, para utilizar el registro que contiene los datos X_i y así completar el registro que contiene las observaciones Y_i , ambos

registros deben ser homogéneos, es decir que necesitan representar las mismas condiciones (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

El procedimiento para completar los registros con datos faltantes se aplicó después de una prueba de homogeneidad y de que se haya realizado cualquier corrección necesaria, en caso de identificarse que ambos registros de datos no son homogéneos. El método de sustitución propuesto en el Manual 56 de la FAO para Riego y Drenaje, consiste en aplicar un análisis de regresión (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

3.3.4 Selección del método óptimo de cálculo de evapotranspiración

Los valores determinados de la ETo con los distintos métodos indirectos, se graficaron en un sistema de coordenadas X y Y, donde X es el tiempo en meses en un periodo de un año y Y representa ETo (mm/mes). Las curvas resultantes se compararon con la representación gráfica del ETo del Tanque Clase A para identificar el método o métodos óptimos para el cálculo de la ETo, aquel cuya tendencia de curva sea la más parecida a la curva de ETo del Tanque Clase A.

3.3.5 Elaboración de diagramas de periodos secos y lluviosos

Como una aplicación se elaboraron diagramas ombrotérmicos y su correspondiente cálculo de índice xerotérmico, los cuales permitieron establecer la duración en días del periodo seco que comprende la época de déficit hídrico resultante. Estos servirán como base para la selección y corroboración de él método de cálculo que establecerá la evapotranspiración y el correspondiente balance hídrico válido en la zona de influencia.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Datos meteorológicos de la estación MA-56

Junto al análisis de datos de la estación MA-56, se evaluó la homogeneidad de las series de datos de las 43 estaciones seleccionadas previamente. Cabe indicar que un 80% de las estaciones evaluadas fueron descartadas debido a que se encuentran inactivas y ya no registran medición de datos desde hace varios años al año de inicio de análisis (1995). Del 20% restante, 2 estaciones (M-002 y M-003) cumplieron con el parámetro de homogeneidad propuesto por el Criterio de Doorembos. Igual proceso fue aplicado a los datos de las variables meteorológicas medidas por la estación MA-56; teniendo en cuenta que tanto para la estación MA-56 como para M-002 y M-003, se trabajó a nivel mensual multianual, para el análisis de homogeneidad.

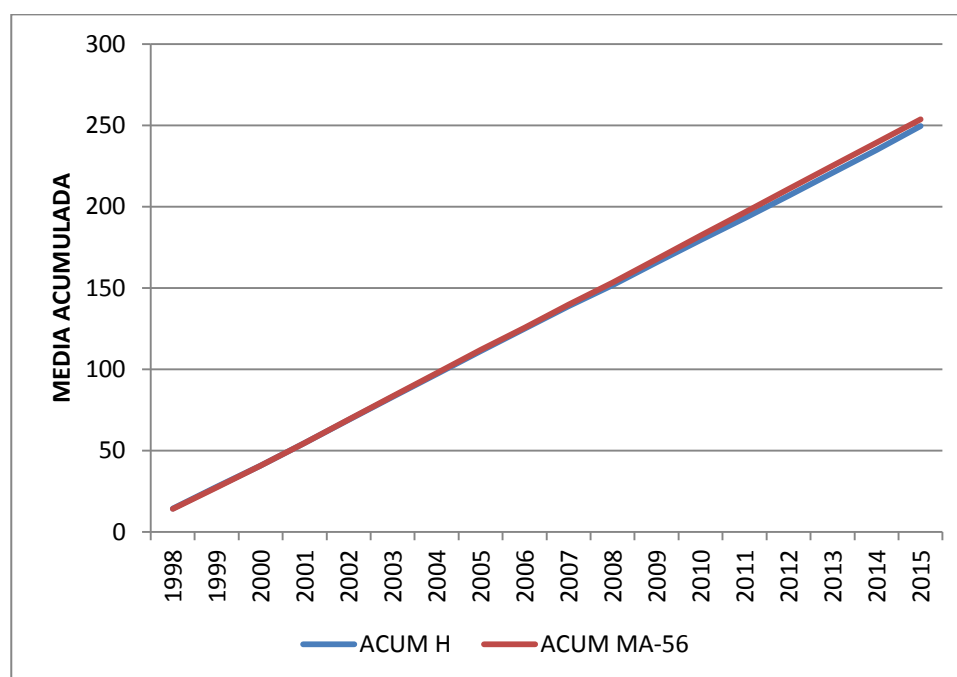
La técnica de *simples masas* mostró, en la estación MA-56, homogeneidad para las variables de precipitación, viento, presión atmosférica, evaporación y humedad relativa.

La técnica de *doble masa* se utilizó para determinar la homogeneidad de los parámetros de temperatura y heliofanía, de la estación MA-56, requiriendo las series de las estaciones M-002 y M-003 para su análisis.

La Tabla 8 muestra la información de temperatura de dos estaciones homogéneas comparadas con los datos levantados por la estación MA-56. Los valores de temperatura que ocurren en diferentes puntos de esa zona, en períodos anuales, guardan una relación de proporcionalidad que puede representarse gráficamente (Figura 5).

Tabla 8*Análisis de doble masa para la temperatura media*

AÑO	M002	M003	MEDIA	ACUM H	MA56	ACUM MA-56
1998	16.3	12.6	14.4	14.4	14.08	14.08
1999	15.2	11.3	13.3	27.7	13.32	27.39
2000	15.0	11.3	13.2	40.8	13.38	40.77
2001	15.8	12.0	13.9	54.8	13.89	54.66
2002	16.0	12.2	14.1	68.9	14.40	69.06
2003	16.0	12.4	14.2	83.0	14.29	83.35
2004	15.9	12.3	14.1	97.1	14.31	97.66
2005	15.7	12.2	14.0	111.1	14.23	111.89
2006	15.6	12.1	13.9	125.0	13.74	125.63
2007	15.4	12.0	13.7	138.7	14.00	139.64
2008	14.7	11.4	13.1	151.7	13.75	153.39
2009	15.6	12.2	13.9	165.6	14.35	167.74
2010	15.5	12.1	13.8	179.4	14.43	182.16
2011	15.2	11.7	13.4	192.9	14.13	196.30
2012	15.5	12.0	13.7	206.6	14.49	210.79
2013	15.8	12.4	14.1	220.7	14.25	225.04
2014	15.9	12.3	14.1	234.8	14.20	239.24
2015	16.6	12.9	14.7	249.5	14.51	253.75

**Figura 5** *Análisis de doble masa para temperatura media*

Para la temperatura, los registros no han sufrido variaciones, los puntos se alinean en una recta de pendiente única, por lo tanto no será necesario efectuar correcciones. Por el contrario, para heliofanía se mostraron variaciones en la pendiente de la recta, en el segmento que contiene valores erróneos por lo cual el registro de datos debe ser corregido a partir del año en el que cambia la pendiente de la recta (Figura 6).

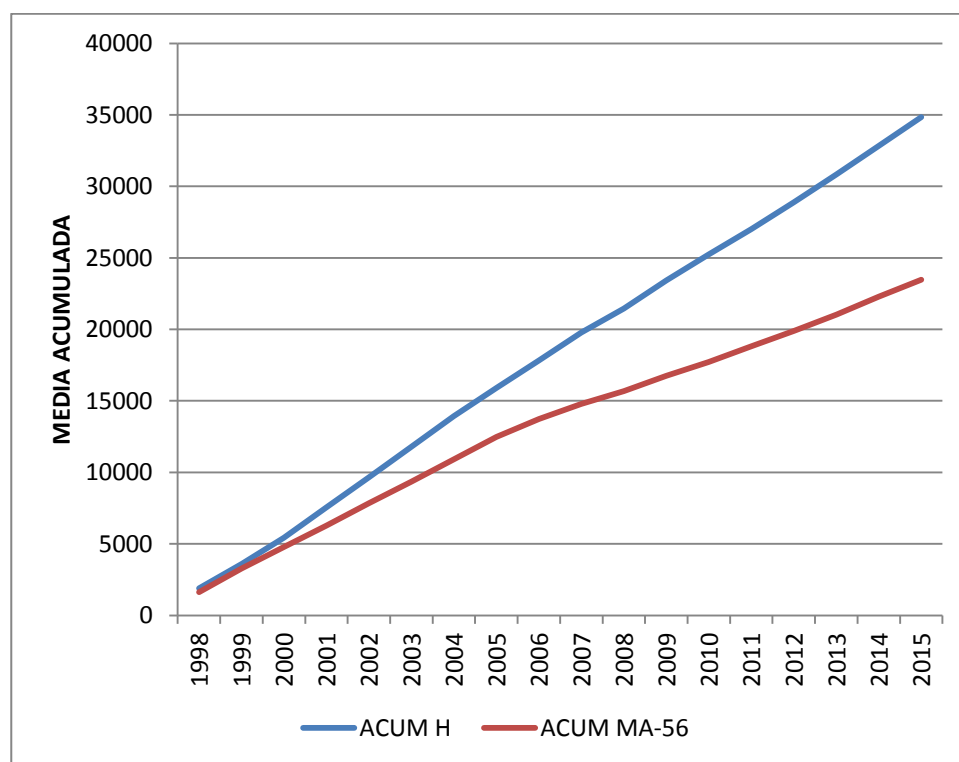


Figura 6 *Análisis de doble masa para la heliofanía*

Una vez corregidos los datos de todas las variables analizadas, se procedió a consolidar una base de información, a partir de la cual se realizarán todos los cálculos de evapotranspiración para la serie de 18 años de la estación MA-56. Dichos cálculos se realizarán a nivel mensual multianual.

Tabla 9*Serie de datos mensual multianual (1998-2015) de la Estación MA-56*

MES	Tmin	Tmax	Tmed	HR	Precip	Helio	PA	Viento	Evap
	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[mm/mes]	[horas/día]	[Hpa]	[m/s]	[mm/mes]
ENE	7.9	20.3	14.1	69.7	130.9	3.4	735.5	2.2	74.9
FEB	8.2	20.6	14.2	69.5	146.9	3.2	736.0	2.2	58.8
MAR	8.2	19.7	14.0	67.6	158.0	3.0	735.6	2.2	58.0
ABR	8.2	20.0	14.1	68.6	143.9	2.8	736.0	2.4	33.2
MAY	8.3	20.0	14.1	68.9	104.7	3.4	735.8	2.3	77.4
JUN	7.5	20.5	14.0	66.2	46.0	3.9	736.0	2.7	90.4
JUL	7.0	20.9	14.0	64.7	24.9	4.2	735.9	3.2	112.8
AGO	7.2	21.1	14.1	62.7	28.0	4.5	735.9	3.7	118.8
SEP	7.0	21.2	14.1	65.1	44.7	3.9	736.0	3.1	110.0
OCT	7.6	20.6	14.1	68.7	145.9	3.3	735.8	2.1	57.8
NOV	7.7	20.4	14.1	68.8	164.6	3.5	735.9	2.3	48.2
DIC	7.9	20.3	14.1	69.1	159.7	3.7	736.0	2.2	40.2

4.2. Método de cálculo de evapotranspiración

Para la Evapotranspiración se realizaron hojas de cálculo para cada uno de los métodos evaluados. Estas hojas de cálculo poseen la información requerida para cada uno de las ecuaciones utilizadas, así como el proceso secuencial seguido para el encontrar el valor de evapotranspiración buscado. Las hojas de cálculo se encuentran como anexos digitales a este documento, diferenciadas por el nombre del método utilizado.

Los resultados de evapotranspiración obtenidos de cada uno de los métodos analizados se resumen en la figura 7.

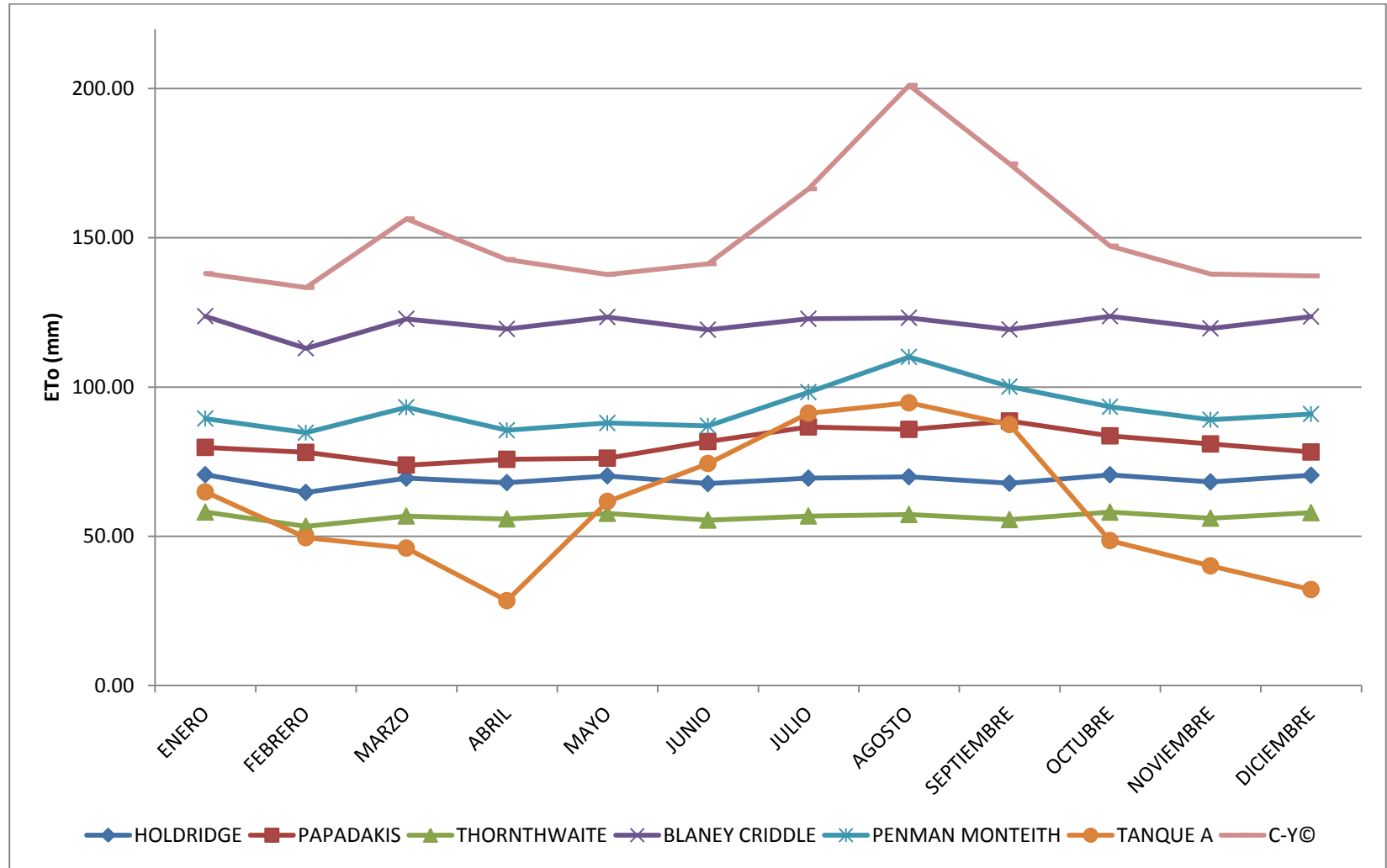


Figura 7 Comparación de métodos de cálculo para evapotranspiración

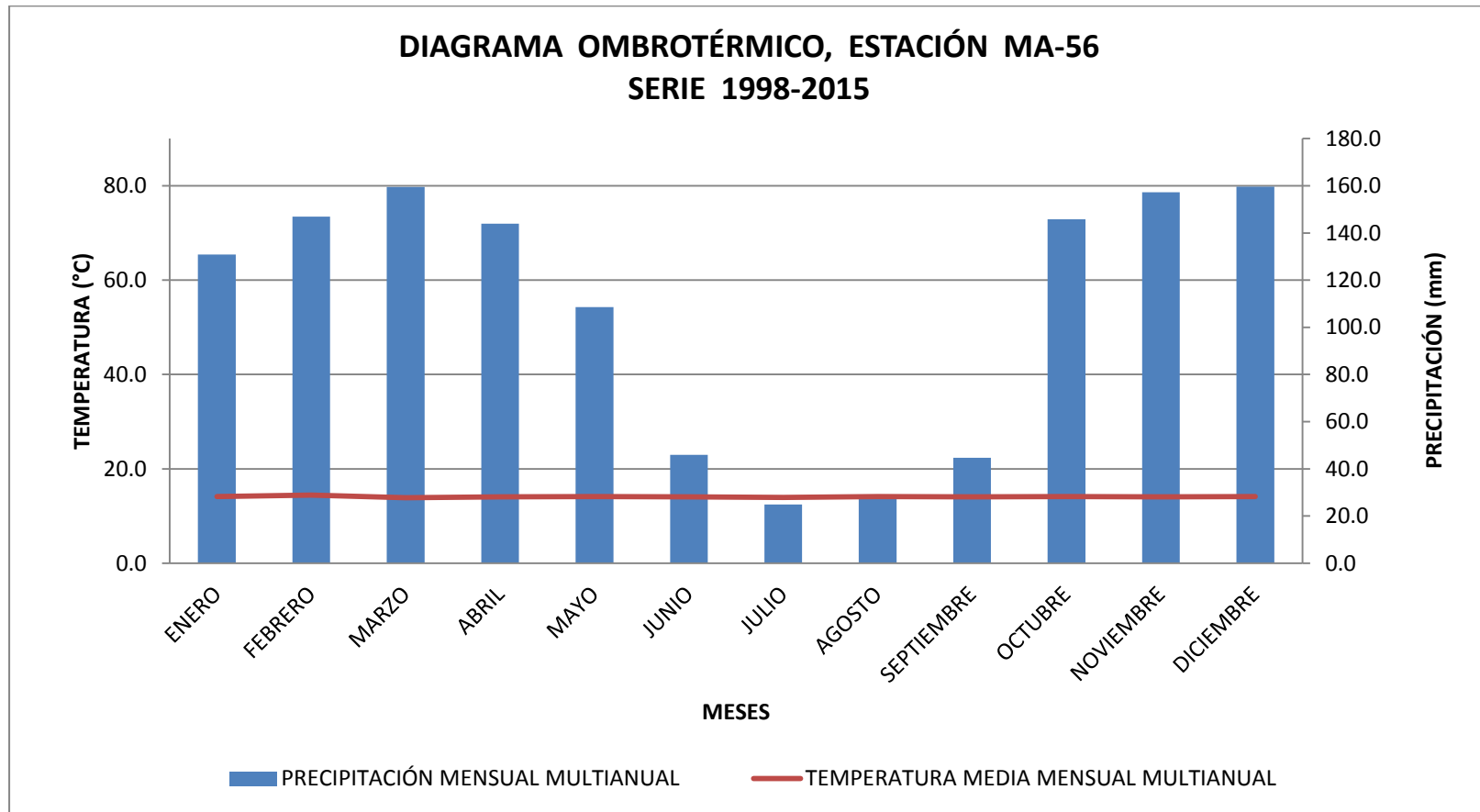


Figura 8 Diagrama ombrotérmico de la estación MA-56

La Figura 7 muestra que los valores ET_o calculados a partir de tanque clase A, a pesar de haber sido corregidos se presentan mayor disparidad con respecto a las demás ecuaciones. Las ecuaciones de Penman-Montieth y Christiansen-Yépez son las que mejor asemejan su distribución dentro del acumulado mensual-multianual; además, su comportamiento tiene relación con lo expresado en el diagrama ombrotérmico de la estación MA-56 (Figura 8), donde los meses de julio, agosto y septiembre son los meses con menor precipitación y por ende mayor evapotranspiración.

Los métodos Holdridge, Papadakis, Thornthwaite y Blaney-Criddle, no presentan correspondencia con lo mostrado por el diagrama ombrotérmico.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los valores de ETo obtenidos a partir del tanque clase A no se homogeneizaron a pesar de contar con información de dos estaciones circundantes, La Tola (M002) e Izobamba (M003).
- Las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial indican que los estudios de variables climatológicas deben realizarse con series de 30 años a 50 años, y se debe evitar el relleno de datos faltantes en vacíos superiores al 20% de la serie a ser analizada. En nuestro caso, se contó con una serie de 18 años (1998-2015), por lo que el presente estudio debe ser considerado como preliminar y necesita ser retroalimentado cada año venidero, hasta completar el mínimo exigido por la norma. Por este motivo, anexo a este documento, están los archivos digitales que permiten actualizar la información climática para futuras investigaciones relacionadas con evapotranspiración.
- En el presente estudio se logró identificar a la ecuación Penman-Montieth, como la fórmula que mejor comportamiento presentó al momento de realizar el cálculo de evapotranspiración a partir de la información meteorológica de la estación MA-56; esto se debe a la cantidad de variables climáticas que utiliza dentro de su expresión, corroborando lo indicado por los investigadores de la FAO en su serie de estudios sobre riego y drenaje.

- La ecuación Christiansen-Yépez presenta valores superiores a los generados por la ecuación Penman-Montieth, sin embargo, su comportamiento en el análisis mensual-multianual es muy acercado a la realidad ya que también se trata de una fórmula que trabaja con una amplia cantidad de variables climáticas.
- Las ecuaciones Holdridge, Papadakis, Thornthwaite y Blaney-Criddle, no generan picos en su distribución anual, debido a que estas fórmulas están basadas principalmente en los valores de temperatura media, y esta variable climática se mantiene relativamente constante durante todo el año en la zona de estudio.
- A partir de la homogeneización de series de temperatura y precipitación, así como con la aplicación del climograma ombrotérmico, se logró identificar a julio y agosto como los meses de sequía fuerte durante el año, lo cual es consecuente con los picos más altos de evapotranspiración determinados por la ecuación Penman-Montieth.

5.2 Recomendaciones

- Los valores de evapotranspiración calculados, aunque difieran de una fórmula a otra, permiten obtener resultados muy representativos en estudios relacionados con necesidades hídricas. Lo más recomendable es utilizar todos los métodos disponibles y escoger el que brinde los mejores resultados en la zona de análisis, como lo es el método Penman-Montieth para la hacienda el Prado y el área de influencia de la estación MA-56.
- No se recomienda el uso de otra ecuación diferente a la Penman-Montieth, para el cálculo de evapotranspiración en la Hacienda el Prado, a menos que se trate de

estudios relacionados con ecología, como es el caso de la clasificación de zonas de vida de Holdridge.

- Las estimaciones y cálculos tienen la misma calidad y precisión que los datos climáticos sobre los cuales están basadas. Por ello, antes de que los datos meteorológicos sean utilizados, su integridad y calidad deben ser evaluadas. Cuando sea necesario y posible, se realizarán correcciones de datos para reducir el efecto de malas calibraciones de los sensores, basándose en la metodología sugerida por la FAO en el boletín 56 relacionado con riego y drenaje.

5.3 Bibliografía

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Recuperado el 21 de Enero de 2016, de sitio Web FAO: <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/idp56s.pdf>
- Almorox, J. (2007). *Métodos de estimación de las evapotranspiraciones ETp y ETr*. Obtenido de <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones/metodosevapotranspiraciones.pdf>
- Beltri, E. (2008). Recuperado el 2017 de enero de 06
- Brower, C., & Heibloem, M. (1986). *Irrigation water management. FAO. Training manual No. 3*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/S2022E/s2022e00.htm#Contents>
- Cobo, E. (1984). *Estudio e investigación sobre evapotranspiración en el Ecuador*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Cruz, E. (2013). *Homogeneización de series*. Bogotá.
- Erazo, B. (2008). *Análisis y Revalorización de sistemas de Riego Tradicionales Andinos, para aplicación en la Comunidad Santa Rosa de la Parroquia Ayora, Cantón Cayambe*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- González, M. (2003). Recuperado el 19 de enero de 2017, de <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/hidrologia-de-superficies-y-conservacion-de-suelos/ocw-marta-pdf/Tema7.pdf>
- Google. (2016). *Google Maps*. Obtenido de www.googlemaps.com
- INAMHI. (2006). *Anuario Meteorológico*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología.
- Openstreetmap. (2017). *Wikimapia*. Obtenido de www.wikimapia.com

- Pérez, S. (1992). *Cálculo de la necesidad de agua de las plantas con datos meteorológicos*. Riobamba: Editorial Pedagógica Freire.
- Rivas, E. (2004). *Propuesta de un modelo operativo para la estimación de la evapotranspiración*. Recuperado el 10 marzo 2015, de http://www.tesisenxarxa.net/TDX/TDX_UV/TESIS/AVAILABLE/TDX-0613105-171221//rivas.pdf
- Sánchez, J. (2006). (U. Salamanca, Ed.) Recuperado el 2017 de enero de 05, de <http://web.usal.es/javisan/hidro>
- Sánchez, M. (2001). Recuperado el 05 de enero de 2017, de http://www.geo.puc.cl/html/revista/PDF/RGNG_N28/art01.pdf
- Serrano, J. (2011). *Regionalización espacial de series climáticas mensuales. Caso de estudio: Cuenca del Río Guayllabamba*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Vega, E., & Jara, J. (2009). *Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (Costa y Región Andina) del Ecuador*. Recuperado el 20 de 02 de 2017, de <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v29n3/a06v29n3.pdf>