



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS**

---

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

## **EVALUACIÓN DE METODOS PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRACIÓN EN DOS DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL NOROESTE DE MÉXICO**

**ESTEBAN PIMENTEL MANZANARES**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

**2014**

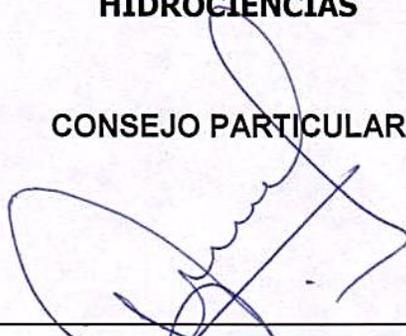
La presente tesis titulada: **Evaluación de métodos para estimar evapotranspiración en dos diferentes condiciones climáticas en el noroeste de México**, realizada por el alumno: **Esteban Pimentel Manzanares**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**HIDROCIENCIAS**

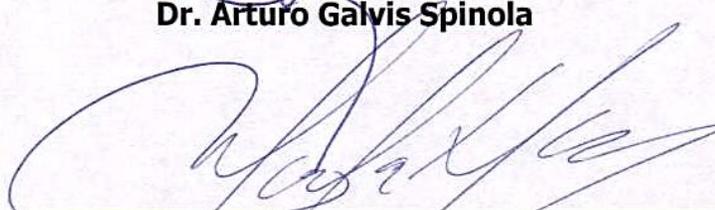
**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO



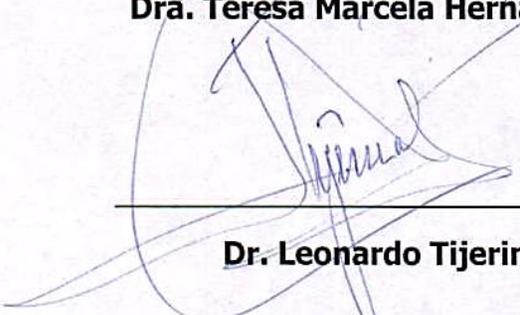
**Dr. Arturo Galvis Spinola**

ASESOR



**Dra. Teresa Marcela Hernández Mendoza**

ASESOR



**Dr. Leonardo Tijerina Chávez**

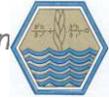
Montecillo, Texcoco, Estado de México, Octubre de 2014.



## RESUMEN

Para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos en la programación del riego es necesario contar con estimaciones de evapotranspiración precisas. Mediciones directas en campo están raramente disponibles. Estimaciones inexactas pueden conducir a usos ineficientes del agua. Con el paso del tiempo se han venido desarrollando muchos métodos para la estimación de la evapotranspiración utilizando diferentes variables meteorológicas y condiciones climáticas. El método de Penman-Monteith se ha evaluado extensamente con datos medidos con lisímetro en diferentes climas y es clasificado como el mejor método para determinar evapotranspiración para todas las condiciones climáticas.

En este estudio se determinó la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y se realizó la comparación de cuatro métodos: Hargreaves, Makkink, Priestley-Taylor y Turc, con el objetivo de obtener un método alternativo con un menor número de variables climáticas. El desempeño de estos métodos se compara con las estimaciones de ET<sub>o</sub> del método de Penman-Monteith FAO 56, para las estaciones meteorológicas Campo el Taxtes, Sinaloa y Mexicali, Baja California, con una serie de siete y diez años de datos meteorológicos diarios respectivamente. Para poder validar cual era el método más adecuado, se calcularon los siguientes índices y errores: raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), error absoluto medio (MAE), coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el índice de Willmott de correspondencia (d) para periodos de uno, 15 y 30 días, además se realizó la comparación gráfica a través de una regresión lineal simple. Se encontró que de acuerdo a los índices, errores y regresión lineal, arrojo que los mejores métodos alternativos, en el caso de la estación Campo el Taxtes, es el método de Turc y para le estación Mexicali, el método de Hargreaves.



## ABSTRACT

For the determination of the water requirements of crops in irrigation scheduling is necessary to have accurate estimates of evapotranspiration. Direct field measurements are rarely available. Inaccurate estimates may lead to inefficient use of water. Over time they have developed many methods for estimating evapotranspiration for different meteorological variables and climatic conditions. The Penman-Monteith method has been extensively evaluated with lysimeter data measured at different temperatures and is rated as the best method for determining evapotranspiration for all weather conditions.

In this study reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) is determined and the comparison of four methods is performed: Hargreaves, Makkink, Priestley-Taylor and Turc, with the aim of obtaining an alternative method with fewer climatic variables. The performance of these methods are compared with estimates of  $ET_0$  from Penman-Monteith FAO 56 weather stations for field the Taxtes, Sinaloa and Mexicali, Baja California, with a series of seven and ten years of daily weather data respectively. In order to validate what was the most appropriate method, the following indices were calculated and errors: root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), coefficient of determination ( $R^2$ ) and the Willmott index of correspondence ( $d$ ) for periods of one, 15 and 30 days, the comparison was made also through a graphical simple linear regression. It was found that according to the indices, and linear regression errors, throw the best alternative methods, in the case of the station field the Taxtes is Turc method, and to him Mexicali station, the method of Hargreaves.



## DEDICATORIA

*A dios por darme la vida y por brindarme la familia tan maravillosa que tengo.*

*A mi esposa Olga Lidia Reyes Ortega, a ti porque siempre has estado a mi lado en las buenas y en las malas, porque me has hecho el hombre más feliz y no cambiaría ni siquiera un segundo.*

*A mi hija María Jaretzy, mi pequeña flaquita porque eres el regalo más grande que dios me ha dado, porque eres el motor que me impulsa a seguir adelante día con día y porque me llenas de alegría.*

*A mis padres María Manzanares y Anselmo Pimentel<sup>†</sup> porque aunque estemos lejos siempre me han apoyado incondicionalmente sin importar nada.*

*A mis hermanos Pedro Anselmo, Vicenta, Araceli y Abraham por el apoyo que siempre me brindan.*



## AGRADECIMIENTOS

*Al Dr. Arturo Galvis Spinola, Dra. Teresa M. Hernández Mendoza y Dr. Leonardo Tijerina Chávez por su valiosa dirección, apoyo y paciencia, siempre dispuestos a desarrollar este trabajo. Muchas gracias por sus continuos e invaluable aportaciones profesionales.*

*Al Colegio de Postgraduados y al Posgrado de Hidrociencias, por darme la oportunidad y el apoyo para seguir formando mi vida profesional.*

*A todos los profesores del Posgrado de Hidrociencias por la inmensa enseñanza y experiencia que contribuyó a mi formación como profesional.*

*Al CONACYT quien apoyo financieramente mi estancia en esta casa de estudios y mi trabajo de investigación.*

*Un especial agradecimiento a un gran amigo que ha sido parte de este proyecto y que siempre ha estado apoyándome incondicionalmente, mil gracias M.C. Haniel Cordero Gonzales.*

*Al igual, agradezco a mis compañeros y amigos María del Rayo Rivera, Rosa del Carmen Campos, Nancy Toris, Cristóbal Hernández y Miguel Meneses que han formado parte de este logro.*





## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	2
2.1	Hipótesis .....	2
2.2	Objetivos .....	2
3	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
3.1	Antecedentes. ....	3
3.1.1	A nivel global. ....	3
3.1.2	A nivel local.....	5
3.2	PROCESO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	7
3.2.1	Evaporación.....	7
3.2.2	Transpiración.....	8
3.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN Y SU IMPORTANCIA .....	9
3.3.1	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	10
3.3.2	Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (ET <sub>c</sub> ).....	11
3.3.3	Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar (ET <sub>caj</sub> ) ..	11
3.4	FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	13
3.4.1	Factores climáticos .....	13
3.4.2	Factores edáficos .....	13
3.4.3	Factores del cultivo.....	14
3.4.4	Manejo y condiciones ambientales.....	14
3.5	MÉTODOS PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	14
3.5.1	Métodos directos .....	15
3.5.2	Métodos indirectos.....	15



4	MATERIALES Y METODOS .....	18
4.1	DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO .....	18
4.1.1	Distrito de Riego 075: Rio Fuerte, Sinaloa.....	18
4.1.2	Distrito de Riego 014: Rio colorado .....	19
4.2	MATERIALES .....	20
4.2.1	Selección de las estaciones meteorológicas .....	20
4.2.2	Software para el procesamiento de la información.....	21
4.3	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS METODOS .....	21
4.3.1	Ecuación de Penman-Monteith.....	22
4.3.2	Ecuación de Hargreaves .....	30
4.3.3	Método de Priestley-Taylor.....	32
4.3.4	Método de Makkink.....	33
4.3.5	Método de Turc.....	33
4.4	ÍNDICES ESTADÍSTICOS UTILIZADOS PARA EVALUAR LA BONDAD DE AJUSTE .....	34
4.4.1	Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) .....	34
4.4.2	Error absoluto medio (MAE) .....	35
4.4.3	Coefficiente de determinación ( $R^2$ ) .....	35
4.4.4	Índice Willmott de correspondencia (d).....	36
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	37
5.1	Estación meteorológica Campo el Taxtes .....	37
5.1.1	Análisis de cada método.....	37
5.1.2	Comparación de los métodos con el método de Penman-Monteith FAO 40	
5.1.3	Índices y errores de estimación .....	45



5.2	Estación meteorológica Mexicali .....	50
5.2.1	Análisis de cada método.....	50
5.2.2	Comparación de los métodos con el método de Penman-Monteith FAO	54
5.2.3	Índices y errores de estimación .....	59
6	CONCLUSIONES .....	67
7	RECOMENDACIONES .....	68
8	BIBLIOGRAFIA .....	69
9	ANEXOS .....	73
A.1.	Calculo de evapotranspiración con el método de Penman-Monteith FAO	56
	.....	73
A.2.	Calculo de evapotranspiración con el método de Hargreaves. ....	79
A.3.	Calculo de evapotranspiración con el método de Priestley-Taylor. ....	81
A.4.	Calculo de evapotranspiración con el método de Makkink.....	85
A.5.	Calculo de evapotranspiración con el método de Turc.....	87



## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 3.1.</b> Clasificación de métodos para estimar evapotranspiración. ....	16
<b>Cuadro 5.1.</b> Resumen estadístico para cada uno de los métodos en la estación Campo el Taxtes (2006-2012).....	37
<b>Cuadro 5.2.</b> Frecuencias relativas (%) de la ETo calculada con los métodos de Penman-Monteith FAO, Hargreaves, Makkink, Priestley-Taylor y Turc para abril de 2006 a diciembre de 2012.....	39
<b>Cuadro 5.3.</b> Índices y errores de estimación diarias de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Campo el Taxtes (2006-2012).....	45
<b>Cuadro 5.4.</b> Índices y errores de estimación para un periodo de 15 días de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Campo el Taxtes (2006-2012).....	46
<b>Cuadro 5.5.</b> Índices y errores de estimación para un periodo de 30 días de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Campo el Taxtes (2006-2012).....	47
<b>Cuadro 5.6</b> Resumen estadístico para cada uno de los métodos en la estación Mexicali (2001-2010).....	51
<b>Cuadro 5.7.</b> Frecuencias relativas (%) de la ETo calculada con los métodos de Penman-Monteith FAO, Hargreaves, Makkink, Priestley-Taylor y Turc para Enero de 2001 a Octubre de 2010.....	52
<b>Cuadro 5.8.</b> Índices y errores de estimación diarias de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Mexicali (2001-2010).....	60
<b>Cuadro 5.9.</b> Índices y errores de estimación para un periodo de 15 días de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Mexicali (2001-2010).....	61
<b>Cuadro 5.10.</b> Índices y errores de estimación para un periodo de 30 días de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Mexicali (2001-2010).....	62



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1.</b> Factores que afectan la evapotranspiración de referencia y conceptos relacionados a ET (Allen et al., 2006). .....	10
<b>Figura 3.2.</b> Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ), bajo condiciones estándar (ET <sub>c</sub> ) y bajo condiciones no estándar (ET <sub>caj</sub> ) (Allen et al, 2006). .....	12
<b>Figura 4.1</b> Localización de la estación meteorológica Campo el Taxtes. ....	19
<b>Figura 4.2.</b> Localización de la estación meteorológica Mexicali. ....	20
<b>Figura 5.1.</b> Grafica de caja y bigotes para cada método analizado. ....	38
<b>Figura 5.2.</b> Comparación grafica de la ET <sub>o</sub> con Penman-Monteith FAO Vs Hargreaves, estación Campo Taxtes .....	40
<b>Figura 5.3.</b> Comparación grafica de la ET <sub>o</sub> con Penman-Monteith FAO Vs Makkink, estación Campo Taxtes.....	41
<b>Figura 5.4.</b> Comparación grafica de la ET <sub>o</sub> con Penman-Monteith FAO Vs Priestley-Taylor, estación Campo Taxtes.....	41
<b>Figura 5.5.</b> Comparación grafica de la ET <sub>o</sub> con Penman-Monteith FAO Vs Turc, estación Campo Taxtes.....	42
<b>Figura 5.6.</b> Cociente entre el valor de ET <sub>o</sub> estimado con Penman-Monteith FAO y Hargreaves.....	43
<b>Figura 5.7</b> Cociente entre el valor de ET <sub>o</sub> estimado con Penman-Monteith FAO y Makkink. ....	43
<b>Figura 5.8</b> Cociente entre el valor de ET <sub>o</sub> estimado con Penman-Monteith FAO y Priestley-Taylor. ....	44
<b>Figura 5.9</b> Cociente entre el valor de ET <sub>o</sub> estimado con Penman-Monteith FAO y Turc. ....	44
<b>Figura 5.10.</b> Regresión lineal Penman-Monteith Vs Hargreaves de Abril, 2006 a Diciembre, 2012, estación Campo el Taxtes. ....	48
<b>Figura 5.11.</b> Regresión lineal Penman-Monteith Vs Makkink de Abril, 2006 a Diciembre, 2012, estación Campo el Taxtes. ....	49
<b>Figura 5.12.</b> Regresión lineal Penman-Monteith Vs Priestley-Taylor de Abril, 2006 a Diciembre, 2012, estación Campo el Taxtes. ....	49



<b>Figura 5.13.</b> Regresión lineal Penman-Monteith Vs Turc de Abril, 2006 a Diciembre, 2012, estación Campo el Taxtes.....	50
<b>Figura 5.14.</b> Grafica de caja y bigotes para cada método analizado.....	52
<b>Figura 5.15.</b> Comparación grafica de la ETo con Penman-Monteith FAO Vs Hargreaves, estación Mexicali.....	55
<b>Figura 5.16.</b> Comparación grafica de la ETo con Penman-Monteith FAO Vs Makkink, estación Mexicali.....	55
<b>Figura 5.17.</b> Comparación grafica de la ETo con Penman-Monteith FAO Vs Priestley-Taylor, estación Mexicali.....	56
<b>Figura 5.18.</b> Comparación grafica de la ETo con Penman-Monteith FAO Vs Turc, estación Mexicali.....	56
<b>Figura 5.19.</b> Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Hargreaves.....	57
<b>Figura 5.20.</b> Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Makkink.....	58
<b>Figura 5.21.</b> Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Priestley-Taylor.....	58
<b>Figura 5.22.</b> Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Turc.....	59
<b>Figura 5.23.</b> Comportamiento de la humedad relativa media mensual.....	63
<b>Figura 5.24.</b> Comportamiento de la radiación solar media mensual.....	64
<b>Figura 5.25.</b> Regresión lineal Penman-Monteith Vs Hargreaves de Enero, 2001 a Octubre, 2010, estación Mexicali.....	65
<b>Figura 5.26.</b> Regresión lineal Penman-Monteith Vs Makkink de Enero, 2001 a Octubre, 2010, estación Mexicali.....	65
<b>Figura 5.27.</b> Regresión lineal Penman-Monteith Vs Priestley-Taylor de Enero, 2001 a Octubre, 2010, estación Mexicali.....	66
<b>Figura 5.28.</b> Regresión lineal Penman-Monteith Vs Priestley-Taylor de Enero, 2001 a Octubre, 2010, estación Mexicali.....	66



## 1 INTRODUCCIÓN

La superficie con riego prácticamente no ha crecido en los últimos cuarenta años y su infraestructura presenta deterioro que provoca serias deficiencias en la conducción y uso. No obstante, el 60% del valor de la producción se genera en las áreas de riego, en tanto que las de temporal cada vez están más expuesta a los efectos del cambio climático (sequías, inundaciones, heladas, entre otros), lo que representa una limitación natural para la productividad (SAGARPA, 2013).

La estimación de la evapotranspiración es el primero y el paso más importante hacia el diseño, la planificación y la gestión de los diferentes sistemas de riego, sistemas de distribución de agua, la aplicación de agua, y las prácticas de gestión del agua (Landras et al, 2008).

Para determinar las necesidades hídricas de los cultivos en la programación de calendarios de riegos, es necesario contar con estimaciones de evapotranspiración (ET) precisas; estimaciones inexactas pueden conducir a un uso ineficiente del agua y la baja producción del productor.

Mediciones de ET directa sobre el terreno no están disponibles, cuantificar la ET es muy difícil dada la complejidad del proceso y de los factores que intervienen en dicho proceso, por tal motivo, con los años muchos métodos se han desarrollado, revisado y recomendado para la estimación de ET para diferentes tipos de datos meteorológicos y condiciones climáticas.

La ecuación de Penman-Monteith se ha evaluado extensamente y se ha comparado con medidas de lisímetro en diferentes condiciones climáticas. A raíz de esto, el método de Penman-Monteith FAO fue adoptado como el método estándar para la definición y el cálculo de ETo (Allen et al., 1998).

Una de las desventajas que tiene la ecuación de Penman-Monteith FAO es el número de variables que requiere (radiación neta, temperatura del aire, humedad del aire, velocidad del viento), la poca disponibilidad de alguna de estas limita el uso del método. Por tal razón muchas de las ecuaciones empíricas para determinar ETo han



permanecido en uso debido a su simplicidad y menor número de parámetros de entrada necesarios para el cálculo.

## **2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

### **2.1 Hipótesis**

Se puede determinar un método alternativo confiable, mediante un análisis comparativo de metodologías para estimar evapotranspiración en dos condiciones climáticas.

### **2.2 Objetivos**

#### **Objetivo general**

Investigar cuál de los métodos de Hargreaves, Priestley-Taylor, Makkink y Turc, es el que mejor estima la evapotranspiración de referencia en comparación con la ecuación de FAO Penman-Monteith, en dos climas diferentes.

#### **Objetivos específicos**

- Estimar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) con los métodos de Penman-Monteith, Hargreaves y Priestley-Taylor, Makkink y Turc para dos condiciones climáticas.
- Realizar con diferentes índices estadísticos una comparación del valor de evapotranspiración de referencia estimado con el método de FAO Penman-Monteith, con los calculados mediante los métodos de Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, Makkink y Turc.



### 3 REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Antecedentes.

Allen *et al.*, (2006) mencionan que durante los últimos 50 años se han desarrollado una gran cantidad de métodos empíricos por numerosos científicos y especialistas en todo el mundo, con el fin de estimar la evapotranspiración a partir de diferentes variables climáticas. A menudo las ecuaciones estaban sujetas a rigurosas calibraciones locales pero demostraron tener limitada validez global. Por otra parte, probar la exactitud de los métodos bajo nuevas condiciones es laborioso y necesita mucho tiempo y dinero. A pesar de ello, los datos de evapotranspiración son necesarios con antelación al planeamiento de proyectos o para programar calendarios de riego.

##### 3.1.1 A nivel global.

Xu & Ssngh (2002) evaluaron cinco métodos empíricos para calcular evapotranspiración usando datos meteorológicos de la estación Changins en suiza: métodos basados en la temperatura (Hargreaves y Blaney-Criddle), métodos basado en la radiación (Makkink y Priestley-Taylor) y un método basado en la transferencia de masa (Rohwer). El método de FAO-56 Penman-Monteith fue tomada como un estándar en la evaluación de los cinco métodos. La comparación de métodos se realizó en dos etapas, en la primera etapa se utilizaron los valores constantes originales involucrados en cada ecuación y en la segunda etapa los cinco métodos fueron calibrados contra el método de FAO-56 Penman-Monteith para determinar los mejores parámetros de cada región. En este estudio se llegó a la conclusión que los cinco métodos empíricos dieron resultados de estimaciones aceptables de evapotranspiración, cuando se establecieron los mejores parámetros determinados localmente.

Landon (2004) evaluó siete modelos de evapotranspiración (FAO-24 de radiación, FAO-24 Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor, Makkink y Turc) han sido probados con los datos de evapotranspiración de referencia calculados por la FAO-56 Penman-Monteith para evaluar la precisión de cada método en la estimación



de la evapotranspiración de referencia en Louisiana. Los modelos fueron comparados en ocho estaciones del Sistema de Información Agroclimática de Louisiana con datos de diciembre 2002 a noviembre 2003. En el interior y en la región costera, el método de Turc fue el método más exacto para el cálculo diario. En el interior, el método de FAO-24 Blaney-Criddle y Makkink fueron los métodos más precisos, aunque esto puede cambiar con un registro más largo de datos.

Lu et al (2005) contrastaron seis métodos de uso común para determinar evapotranspiración potencial y cuantificar la evapotranspiración potencial anual a través de un gradiente fisiográfico de 36 cuencas boscosas en el sureste de Estados Unidos. Tres métodos basados en la temperatura (Thornthwaite, Hamon y Hargreaves-Samani) y tres basados en la radiación (Turc, Makkink y Priestley-Taylor). Se observó que existen mayores diferencias entre los métodos basados en la temperatura que los basados en la radiación. Se concluyó que en general, los métodos de Priestley-Taylor, Turc y Hamon se desempeñaron mejor que los otros métodos.

Trezza (2008) analizó varias metodologías disponibles para realizar estimaciones de ETo a nivel mensual en Venezuela a partir de la información de estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes regiones del País. Se encontró que los procedimientos más aplicables para estas condiciones climáticas son los incluidos en la publicación de la FAO-56, especialmente el método de FAO Penman-Monteith. La ecuación de Thornthwaite no resultó apropiada, ni tampoco las ecuaciones de la publicación FAO-24 como son la de Radiación y la de Penman modificada, debido a que sobreestiman considerablemente los valores de ETo. El método de Blaney-Criddle puede aplicarse en zonas de baja altitud cuando solo se cuente con datos de temperatura media del aire. El método de Hargreaves presentó potencial para su aplicación debido a que solo utiliza información de temperatura máxima y mínima del aire, aunque requiere el cálculo de parámetros de ajuste climático para cada zona.

Tabari (2009) evaluó cuatro modelos (Makkink, Turc, Priestley-Taylor y Hargreaves), comúnmente utilizados para estimar la evapotranspiración de referencia mensual. Los resultados mostraron que el método de Turc es el más adecuado para estimar la



evapotranspiración para climas frío-húmedos y áridos. El método de Hargreaves resultó ser el método más preciso en condiciones climáticas cálido-húmedo y semiárido. En general, los resultados obtenidos de este estudio revelaron muy claramente que los modelos Makkink y Priestley-Taylor estimaron los valores de ETo con menos precisión que los modelos Turc y Hargreaves para los todos los climas.

### **3.1.2 A nivel local.**

Villaman et al (1999) compararon los métodos Thornthwaite-Holzman, Aerodinámico, Balance de energía (Relación de Bowen), Sistema de Bowen y Penman-Monteith, con la evapotranspiración medida en el lisímetro de pesada como referencia. El estudio se realizó en el lote experimental del Colegio de Postgraduados. Los resultados indican que la evapotranspiración calculada por el método de Penman-Monteith, el Balance de energía y la medida con el Sistema de Bowen fueron los que mejor estimaron la evapotranspiración.

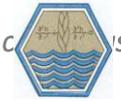
Vázquez et al, (2011) estimaron la evapotranspiración de referencia con ocho métodos diferentes (Penman 1948, Romanenko 1961, Jensen y Haise 1963, Hargreaves y Samani 1982, Kimberly-Penman 1982, Penman-Monteith 1998 y Oudin 2005) y los resultados estimados se compararon con datos medidos de un ET gage Company, instrumento calibrado y probado de estar estrechamente asociado a los datos de evapotranspiración de referencia. Dicho estudio se llevó acabo en Cadereyta de Montes, Querétaro, en un ambiente semiárido típico del Centro de México (clima BS, en la clasificación de Köppen). Los métodos Oudin, Jensen y Haise, Romanenko, mostraron valores altos para raíz del error de la media cuadrática y error medio absoluto. El poco desempeño de estos modelos no cambió con el análisis para diferentes escalas de tiempo. En consecuencia, no se recomienda su uso para las condiciones climáticas similares a las dominantes en el sitio de estudio, a menos que se realice un análisis específico. El método Hargreaves y Samani tuvo un mejor desempeño a nivel mensual que el grupo anterior de modelos y el uso para estimaciones diarias no fue adecuado. Los modelos tipo Penman (Penman-Monteith y Penman) mostraron el mejor desempeño para las



diferentes escalas de tiempo, con valores bajos de raíz del error de la media cuadrática y error medio absoluto. El desempeño de este tipo de modelos mejoró a escala semanal y mensual.

González et al, (2012) determinaron la evapotranspiración de referencia para nogal pecanero y se realizó la comparación de tres métodos de Penman-Monteith, Doorembos-Pruit y Hargreaves-Samani a partir del monitoreo de las variables meteorológicas con estaciones agroclimáticas automatizadas en red, ubicadas en dos subregiones de la Cuenca del Nazas. Los resultados, con base en la comparación de métodos, indican que el modelo de Penman-Monteith presenta mejor correlación de la evapotranspiración de referencia con respecto al método basado en la evaporación del tanque tipo A y por lo tanto, determina mejor la evapotranspiración del cultivo, seguido del modelo de Doorembos-Pruit y, por último, el de Hargreaves-Samani. Estos modelos, indican que el consumo hídrico del nogal pecanero es ligeramente superior en la cuenca baja con respecto al de la cuenca media del Río Nazas.

Cervantes et al, (2013) realizaron una comparación de modelos empíricos como el de Hargreaves, Hargreaves calibrado y Priestley-Taylor, con el modelo de redes neuronales artificiales función de base radial (RNABR), con las mismas variables de entrada, en la estimación de la ETo FAO-56 Penman-Monteith. Las estimaciones de ETo se evaluaron en cuatro estaciones climáticas del Distrito de Riego 075, Valle del Fuerte, Sinaloa, México. Las RNABR3 y RNABR7 utilizaron las mismas variables de entrada (o menos) que los métodos convencionales de Hargreaves calibrado y Priestley-Taylor, respectivamente. Los resultados indican que al comparar las RNABR3 y RNABR7 con igual (o menos) número de variables de entrada que sus respectivos modelos convencionales, se determinó que ambas fueron mejores en la estimación de la evapotranspiración de referencia calculada con Penman-Monteith FAO-56.



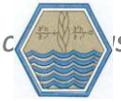
## **3.2 PROCESO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN**

### **3.2.1 Evaporación**

El flujo de calor latente de evaporación del agua del suelo es un componente importante del balance de energía superficial. El tipo y la cantidad de evaporación de la superficie del suelo es un proceso complejo afectado por muchas de las características del suelo, la labranza y las interacciones ambientales. La evaporación también afecta a la planta ya que dispone del contenido de agua del suelo y provoca la salinización de las tierras de regadío. Se sabe que la energía y la disponibilidad de agua dominan en gran medida el proceso de evaporación, por tanto, en promedio estos principios generales se pueden utilizar para estimar la evaporación directa del agua del suelo (Lal, 2004).

La evaporación es el proceso de cambio del estado del agua de líquido a la fase gaseosa. La evaporación de un paisaje puede ocurrir a partir de dosel de las plantas, la superficie de agua libre, o en la superficie del suelo. La evaporación del agua del suelo desnudo (es decir, en ausencia de la vegetación) es el proceso por el cual el agua se pierde desde el suelo a la atmósfera. Si el proceso de evaporación no se controla mediante una práctica de manejo del agua en el suelo, una cantidad considerable de agua se puede perder de un riego o una tierra de cultivo de temporal. Durante el período de la siembra y la germinación, la evaporación puede reducir el contenido de agua del suelo de manera significativa y puede obstaculizar el crecimiento de la planta (Lal, 2004).

La evaporación se produce básicamente por el aumento de la energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferencias de presión de vapor. Este aumento de energía cinética provoca que algunas moléculas de agua sean transferidas de manera continua a la atmósfera. Al mismo tiempo, algunas de las moléculas que ya se encuentran en la atmósfera se condensan y regresan al cuerpo de agua (Aparicio, 1992).



La mayoría del agua se evapora de las superficies de las plantas es el agua que ha pasado a través de la planta, entrar en las raíces, pasa a través del tejido vascular para las hojas u otros órganos y que sale al aire circundante principalmente a través de los estómas, pero también a veces a través de la cutícula. La evaporación del agua ha pasado a través de las plantas se llama transpiración (Rosenberg, 1983).

### **3.2.2 Transpiración**

Allen, R. (2006) describe la transpiración como el proceso de vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración (Allen, 2006).

Como es difícil de medir por separado la evaporación y la transpiración, y además, en la mayor parte de los casos, lo que interesa es la cantidad total de agua que se



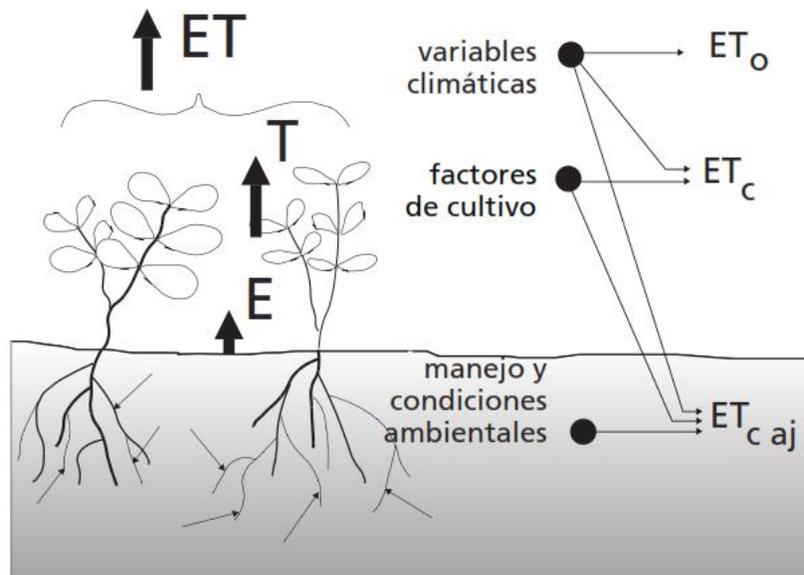
pierde a la atmósfera, sea del modo que sea, se consideran conjuntamente bajo el concepto mixto de evapotranspiración (Sánchez, 2010).

### 3.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN Y SU IMPORTANCIA

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

La evapotranspiración es una variable clave en el cálculo del balance de energía superficial, en el balance hídrico, en la detección de estrés hídrico vegetal y también en la estimación de los rendimientos agrícolas, por nombrar solo algunos de los aspectos en los que interviene o pueda ser útil. No obstante, su medición directa o, en su defecto, su estimación es muy difícil dada la diversidad y complejidad de los factores que intervienen en el proceso (meteorológicos, fisiológicos, edafológicos) (Sánchez, 2002).

En la Figura 1.1 se observa que la transpiración, igual que la evaporación, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de manejo del cultivo (Allen *et al.*, 2006).



**Figura 3.1.** Factores que afectan la evapotranspiración de referencia y conceptos relacionados a ET (Allen et al., 2006).

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones según Allen et al., 2006:

- ✓ Evapotranspiración del cultivo de referencia,  $ET_0$
- ✓ Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar,  $ET_c$

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

donde,  $K_c$  es el factor de cultivo bien regado en condiciones agronómicas óptimas

- ✓ Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar,  $ET_{caj}$

Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar  $ET_c$  ( $ET_{caj}$ ). Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo.

### 3.3.1 Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ )

La Evapotranspiración de Referencia ( $ET_0$ ) se define como la tasa de evapotranspiración de una cubierta vegetal de referencia en óptimas condiciones de



crecimiento y bajo suministro adecuado de agua. La cubierta vegetal es un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0,23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo. La resistencia superficial fija de  $70 \text{ s m}^{-1}$  implica un suelo moderadamente seco que recibe riego con una frecuencia semanal aproximadamente (Allen et al, 2006).

### **3.3.2 Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (ET<sub>c</sub>)**

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ET<sub>c</sub>, y 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 (Allen et al, 2006).

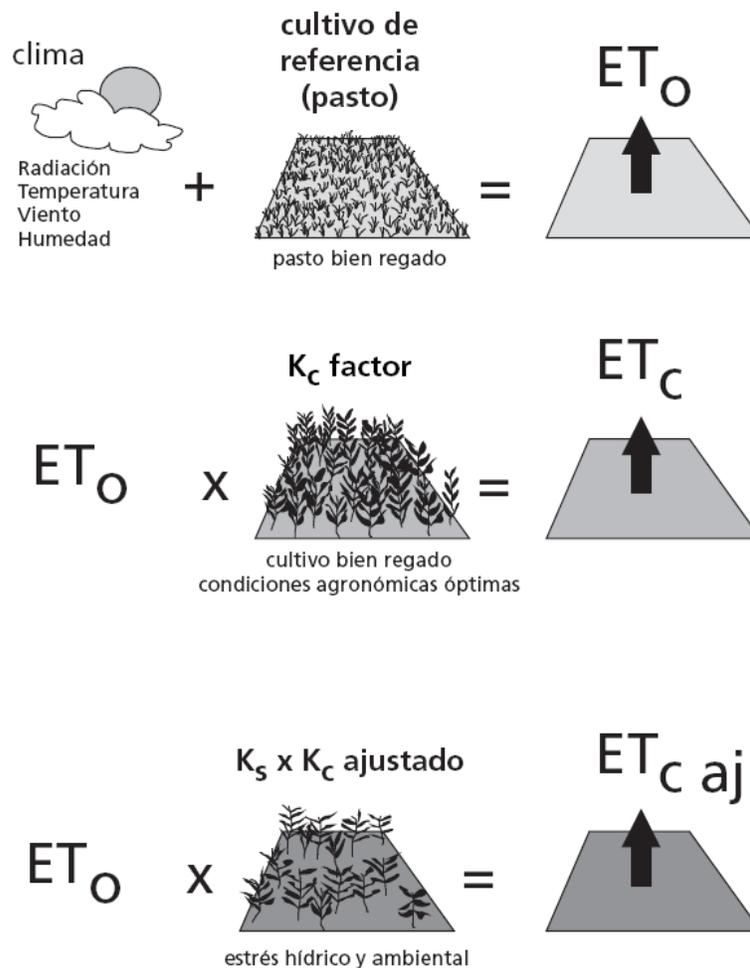
La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo. A pesar de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva. El requerimiento de agua de riego también incluye agua adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación de agua.

### **3.3.3 Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar (ET<sub>caj</sub>)**

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET<sub>caj</sub>) 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  $ET_c$  (Allen et al, 2006)

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. En la figura 1.2 se muestra gráficamente los conceptos de evapotranspiración.



**Figura 3.2.** Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y bajo condiciones no estándar ( $ET_{caj}$ ) (Allen et al, 2006).



### **3.4 FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN**

Sánchez (2001) menciona que la evapotranspiración es un fenómeno complejo afectado por varios factores, por una parte las condiciones ambientales imperantes en el momento en que se desea cuantificar su intensidad, las cuales se pueden agrupar bajo el concepto de factores climáticos, o meteorológicos según el caso; pero también son muy importantes las relativas a las características de la vegetación que cubre el suelo, dado que cada vegetal tiene requerimientos hídricos distintos, con lo cual la tasa de transpiración será diferente según la planta. Finalmente la condición de humedad del suelo es un factor que también es decisivo en la magnitud del proceso, pues constituye la fuente de suministro hídrico, tanto para la transpiración vegetal como para la evaporación directa del agua del suelo

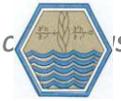
#### **3.4.1 Factores climáticos**

Los principales factores que tienen gran influencia en la evapotranspiración desde el punto de vista de los factores atmosféricos son: radiación, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento; estos parámetros se agrupan también frecuentemente bajo el nombre de factores climáticos o meteorológicos.

#### **3.4.2 Factores edáficos**

Influyen principalmente en el contenido de humedad del suelo y a la facilidad por parte de éste para cederla, es decir, la transmisibilidad del agua a la superficie evaporante.

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir



su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración. (Allen et al, 2006).

### **3.4.3 Factores del cultivo**

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas (Allen et al, 2006).

### **3.4.4 Manejo y condiciones ambientales**

Cuando se evalúa la tasa de ET, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo.

## **3.5 METODOS PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN**

A causa de la gran dificultad que existe en la medida directa de la evapotranspiración, se han desarrollado numerosos modelos para estimar esta magnitud. Algunos de ellos son muy realistas físicamente, pero a expensas de una gran complejidad: necesitan demasiadas medidas o estimaciones de parámetros, que hacen que éstos sean de difícil aplicación. Por otra parte, hay ecuaciones que sólo precisan datos meteorológicos, habitualmente disponibles, pero que fueron derivadas haciendo suposiciones que limitan significativamente la aplicación de las mismas (Sánchez, 2008)

En la medida en que se considere simultáneamente el mayor número de factores intervinientes, mejor será el conocimiento del funcionamiento del proceso de



evapotranspiración y consecuentemente también su determinación. Efectivamente, este aspecto permite establecer ciertas diferencias entre los métodos actualmente utilizados para determinar la evapotranspiración. Algunos consideran las condiciones reales del ambiente y del momento en que se quiere dimensionar la magnitud del proceso; otros, en cambio, sólo toman en cuenta algunas de ellas (Sánchez, 2001).

Desde este punto de vista se puede hablar de tres grandes categorías de métodos: por una parte, los métodos que se pueden denominar de medición o directos, por otra, los métodos de estimación o indirectos y por último los de balance de agua en el suelo (Castillo, 2001).

### **3.5.1 Métodos directos**

Una forma para medir la evapotranspiración con precisión, es la utilización de los lisímetros; que son bloques de suelo aislados, donde se controla su nivel de humedad. El lisímetro se ha utilizado como método de referencia a la hora de calibrar los distintos métodos de estimación de la evapotranspiración. Hay diferentes tipos de lisímetros, los lisímetros de pesada son los más utilizados y de mayor precisión.

El método de balance de agua en el suelo permite estimar la evapotranspiración en un periodo de tiempo determinado a partir de las entradas y salidas de agua, en donde se involucra la precipitación, la cantidad de agua aportada por el riego, la variación del contenido de agua en el suelo, la escorrentía superficial y el drenaje fuera de la zona radicular. La precisión del método depende principalmente del método que se utilice para cuantificar cada uno de los componentes del balance.

### **3.5.2 Métodos indirectos**

Estos métodos se basan en la utilización de fórmulas para realizar estimaciones de la capacidad evaporativa de un ambiente determinado a partir de datos obtenidos en una estación meteorológica. Estas ecuaciones predicen la evapotranspiración potencial o de referencia. Es importante destacar que estos métodos se basan únicamente en el efecto del clima (de las condiciones meteorológicas) sobre la tasa de evapotranspiración.



Dentro de los métodos climatológicos se encuentran los métodos basados en la temperatura del aire, los cuales estiman la tasa de evapotranspiración a partir de la temperatura del aire únicamente. Otros métodos están basados en la radiación, en las cuales la evapotranspiración está relacionada directamente con la radiación solar.

La evapotranspiración se estima a partir de un coeficiente de tanque, que se establece para diferentes condiciones de ubicación del tanque y condiciones meteorológicas. Este método se ha utilizado ampliamente por su fácil instalación y simplicidad.

En el cuadro 3.1 Elias (2001) cita la clasificación de los métodos de estimación de la evapotranspiración dada por Pruitt (1986).

**Cuadro 3.1.** Clasificación de métodos para estimar evapotranspiración.

	Thornthwaite, 1948
	Fórmula original de Blaney-Criddle, 1950
<b>Métodos altamente empíricos</b>	SCS Blaney-Criddle, 1970
	Blaney-Criddle (FAO24)
	Atmómetros
	Makkink, 1957
	Jensen-Haise, 1963, 1974
<b>Métodos empírico - teóricos</b>	Método de radiación (FAO24), 1977
	Tanque evaporímetro
<b>Métodos teórico - empíricos</b>	Penman, 1948, 1952
<b>Métodos teóricos</b>	Técnica del balance de energía – Relación de Bowen



---

### Ecuación de Penman-Monteith

---

Correlación de turbulencia (Eddy correlation)

---

Hay modelos que utilizan la información climatológica histórica y se aplican para calcular la ETo con fines de planeación. Mientras que los modelos que se alimentan con información meteorológica en cierto intervalo de tiempo se utilizan para determinar la ETo en tiempo real con fines de operación.



## **4 MATERIALES Y METODOS**

### **4.1 DESCRIPCION DE LAS ZONAS DE ESTUDIO**

Según la clasificación climática de Köppen, en el noroeste del territorio mexicano son predominantes climas del tipo BW y BS, o sea climas áridos y semiáridos. En estas zonas el riego es indispensable para la realización de la actividad agrícola, ya que el agua de lluvia no es suficiente para el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Se ha estimado que en el 63 % del territorio mexicano el riego es indispensable y que solo el 1.5% no es necesario (Soto, 2003). El crecimiento del sector agrícola ha sido satisfactorio, este desarrollo ha tenido lugar en áreas donde se practica una agricultura comercial altamente productiva, especialmente en los distritos de riego del noroeste y norte de México.

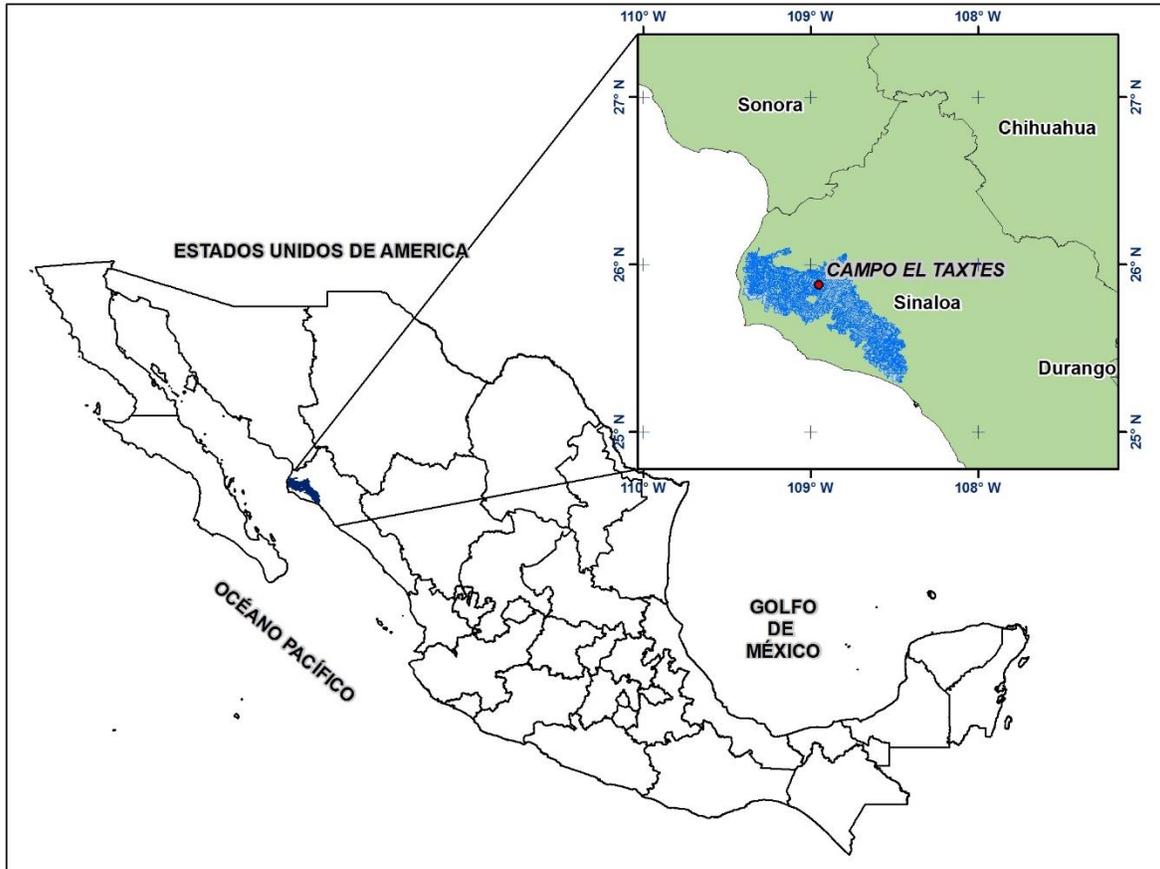
Tomando en cuenta lo anterior, se tomó la decisión de trabajar con estaciones climatológicas ubicadas en dos de los más grandes distritos de riego del noroeste de México, el Distrito de Riego 014: Río Colorado y el Distrito de Riego 075: Río Fuerte, Sinaloa.

#### **4.1.1 Distrito de Riego 075: Río Fuerte, Sinaloa**

El Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, se encuentra situado en la porción norte del estado de Sinaloa y comprende parte de los municipios de El Fuerte, Ahome, Guasave y Sinaloa.

El clima en la zona de influencia del Distrito de Riego 075 Río Fuerte se caracteriza por tener un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano en la mayor parte de su superficie así como semiseco muy cálido y cálido; son los dos tipos de climas más predominantes. La temperatura media anual es de 24.9 °C; las temperaturas máximas y mínimas son de 18.1 °C y 30.7 °C, respectivamente. La precipitación media anual oscila en los 346 mm.

La estación meteorológica Campo el Taxtes se localiza al norte del distrito a una latitud  $25^{\circ} 52' 49''$  y una longitud de  $108^{\circ} 57' 49''$ , a una elevación de 19 msnm (ver Figura 4.1).



**Figura 4.1** Localización de la estación meteorológica Campo el Taxtes.

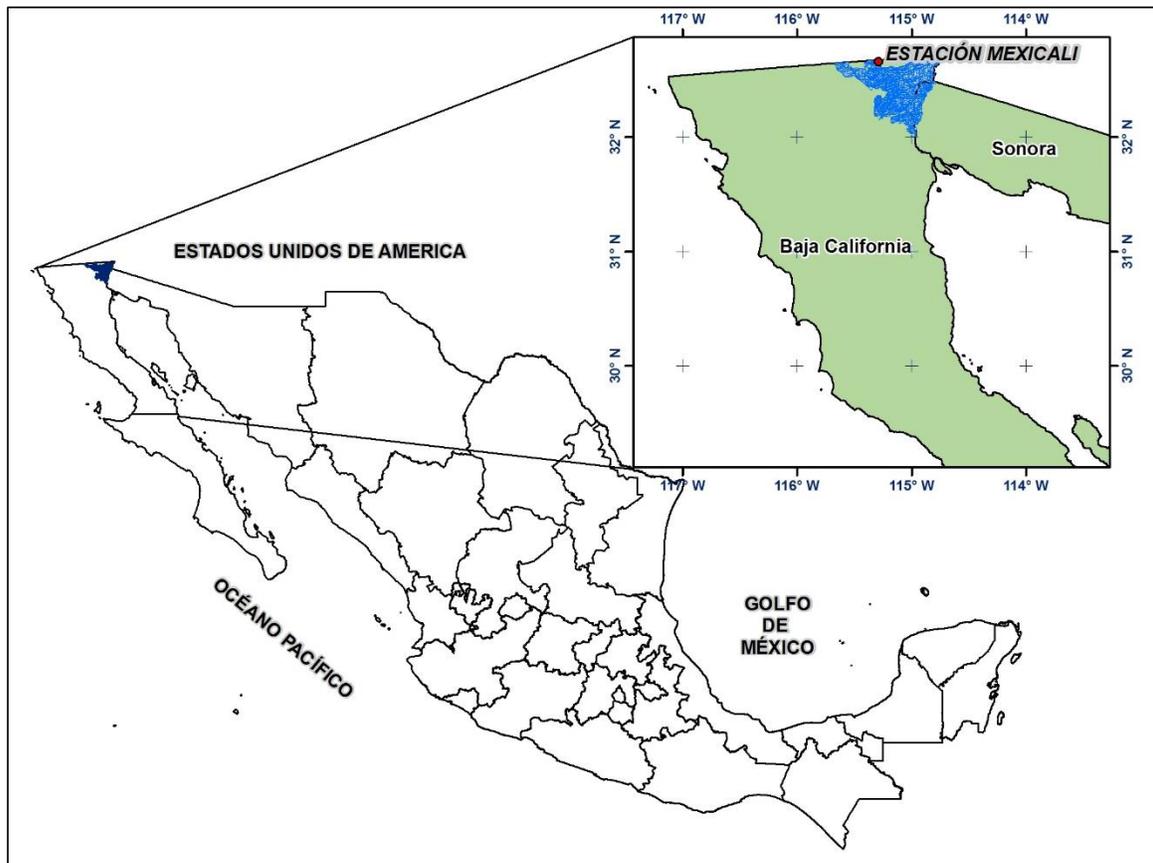
#### 4.1.2 Distrito de Riego 014: Río Colorado

El Distrito de Riego del Río Colorado es uno de los más grandes distritos de riego en el noroeste de México. Se localiza en el extremo noroeste de la República Mexicana; en la porción noreste del Estado de Baja California y noroeste de Sonora. Políticamente, comprende los Municipios de Mexicali, Baja California y San Luis Río Colorado, Sonora; cerca de la frontera con los Estados Unidos de América (EUA).

De acuerdo al Sistema de Clasificación Climática de Köppen modificado por Enriqueta García en 1964, en el área de influencia del Distrito de Riego 014 Río Colorado el clima predominante es un clima desértico seco extremoso, con

temperatura media anual superior a 22°C, la del mes más frío de 14.1°C, régimen de lluvias en invierno con precipitación menor de 36 mm. Las temperaturas máximas y mínimas oscilan entre 14.1°C y 33.3 °C, respectivamente.

La estación meteorológica Mexicali se ubica al norte del distrito a una latitud de 32° 40' 01" N y una longitud de 115° 17' 27" W, a una elevación de 50 msnm (ver Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Localización de la estación meteorológica Mexicali.

## 4.2 MATERIALES

### 4.2.1 Selección de las estaciones meteorológicas

Se procedió a buscar las estaciones ubicadas dentro de los Distritos de Riego 014 y 075, posteriormente todas las estaciones que tengan influencia a los alrededores de



los límites de los distritos, esto último para tener una mayor representación de la zona de estudio.

Las estaciones utilizadas para la investigación fueron seleccionadas primordialmente por los siguientes criterios:

- Antigüedad, consistencia y homogeneidad. Se seleccionaron estaciones que tuvieran como mínimo 5 años de información consecutiva.
- Información disponible. Datos de: Temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ ), velocidad del viento (km/h), presión atmosférica (mbar), humedad relativa máxima (%), humedad relativa mínima (%) y datos de radiación solar ( $\text{Wm}^{-2}$ ).
- Localización de las estaciones. Seleccionadas por su cercanía a la zona de estudio o que estuviesen dentro de ella.

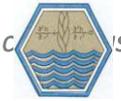
#### **4.2.2 Software para el procesamiento de la información.**

Para el manejo, procesamiento, análisis y presentación de la información, debido a la gran cantidad de la misma, se tuvo que hacer uso de equipo de cómputo y software siguientes:

- Microsoft Office 2013: Microsoft Word, Microsoft Excel y Microsoft Power Point.
- Esri ArcMap 10.1. ArcGis 10.1 SP1: Manejo y procesamiento de información geográfica y elaboración de mapas.
- ERIC III (Extractor Rápido de Información Climatológica) facilita la extracción de la información meteorológica (Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua).

### **4.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS MÉTODOS**

La ecuación de Penman-Monteith se ha evaluado extensamente y se compara con lisímetro medida ET en diferentes condiciones climáticas. A raíz de estos estudios, el



56 FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998) fue clasificado como el mejor método para todas las condiciones climáticas y adoptadas como el método estándar para la definición y el cálculo de ETo a partir de un cultivo de referencia. A pesar de las ventajas de los métodos de Penman, ecuaciones empíricas para estimar ETo han permanecido en uso popular debido a la simplicidad y el menor número de parámetros de entrada (datos meteorológicos y otras constantes) necesarios para el cálculo (Yoder et al, 2005).

La ecuación de Hargreaves-Samani 1985 es uno de los métodos empíricos de uso común. Hargreaves (2003) presentó una buena revisión de algunos antecedentes y la historia abreviada del desarrollo del método de Hargreaves-Samani 1985. El método es muy popular en los casos en que la disponibilidad de datos es limitada, ya que sólo requiere medidas de la temperatura máxima y mínima, con radiación extraterrestre calculada en función de la latitud y día del año.

Los métodos de Priestley-Taylor 1972, el Makkink 1957 y Turc 1961 son otros métodos empíricos comúnmente utilizados y requieren sólo la temperatura del aire y radiación solar como datos de entrada (Allen, citado por Yoder et al, 2005).

A continuación se presenta el procedimiento de cada uno de los métodos a utilizar para estimar la evapotranspiración.

#### **4.3.1 Método de Penman-Monteith**

Un panel de expertos e investigadores en riego fue organizado por la FAO en mayo de 1990, en colaboración con la Comisión Internacional para el Riego y Drenaje y con la Organización Meteorológica Mundial, con el fin de revisar las metodologías previamente propuestas por la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y para elaborar recomendaciones sobre la revisión y la actualización de procedimientos a este respecto. El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de la referencia y aconsejó sobre los procedimientos para el cálculo de los varios parámetros que la fórmula incluye (Allen et al, 2006).



$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

donde:

$ET_0$	Evapotranspiración de referencia (mm día <sup>-1</sup> )
$R_n$	Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )
$R_a$	Radiación extraterrestre (mm día <sup>-1</sup> )
$G$	Flujo de calor del suelo (MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )
$T$	Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
$u_2$	Velocidad del viento a 2 m de altura (m s <sup>-1</sup> )
$e_s$	Presión de vapor de saturación (kPa)
$e_a$	Presión real de vapor (kPa)
$e_s - e_a$	Déficit de presión de vapor (kPa)
$\Delta$	Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C <sup>-1</sup> )
$\gamma$	Constante psicométrica (kPa °C <sup>-1</sup> )

### a) Presión atmosférica

Para el cálculo de la presión atmosférica se emplea una simplificación de la ley de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de 20 °C.

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (3)$$

donde:

$P$	Presión atmosférica (kPa)
$z$	Elevación sobre el nivel del mas (m)



### b) Constante psicométrica

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3} P \quad (4)$$

donde:

$\gamma$  Constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

$P$  Presión atmosférica (kPa)

$\lambda$  Calor latente de vaporización, 2.45 MJ kg<sup>-1</sup>

$c_p$  Calor específico a presión constante, 1.013 x 10<sup>-3</sup> MJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>

$\varepsilon$  Cociente del peso molecular de vapor de agua / aire seco = 0.622

### c) Temperatura media del aire

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (5)$$

donde:

$T_{media}$  Temperatura media del aire (°C)

$T_{max}$  Temperatura máxima del aire (°C)

$T_{min}$  Temperatura mínima del aire (°C)

### d) Presión media de vapor a saturación ( $e_s$ )

La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del aire.

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

donde:

$e_s$  Presión media de vapor de saturación (kPa)

$e^\circ(T_{max})$  Presión de vapor a saturación a la temperatura máxima del aire (kPa)

$e^\circ(T_{min})$  Presión de vapor a saturación a la temperatura mínima del aire (kPa)

La presión de vapor a saturación a temperatura del aire máxima y mínima se calcula con la siguiente ecuación.

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) \quad (7)$$

**e) Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ )**

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27 * T_{media}}{T_{media} + 273.3}\right)\right]}{(T + 237.3)^2} \quad (8)$$

donde:

$\Delta$  Pendiente de la curva de la presión de vapor a saturación a temperatura media del aire T (kPa °C<sup>-1</sup>)

$T_{media}$  Temperatura media del aire (°C)

exp[..] 2.7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

**f) Presión de vapor ( $e_a$ ) derivada de la temperatura del bulbo húmedo**

$$e_a = e^{\circ}(T_{húmedo}) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27 * T_{húmedo}}{T_{húmedo} + 237.3}\right] \quad (9)$$

donde:

$e_a$  Presión de vapor a saturación (kPa)

$T_{rocío}$  Temperatura del bulbo húmedo (°C)

exp[..] 2.7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

**g) Presión real de vapor ( $e_a$ ) derivada de datos psicrométricos**

La presión real de vapor puede determinarse de la diferencia entre las temperaturas del bulbo seco y húmedo conocida como la depresión del bulbo húmedo.



$$e_a = e^\circ(T_{\text{húmedo}}) - \gamma_{psi}(T_{\text{seco}} - T_{\text{húmedo}}) \quad (10)$$

donde:

$e_a$	Presión real de vapor (kPa)
$e^\circ(T_{\text{húmedo}})$	Presión de saturación de vapor a la temperatura del bulbo húmedo (kPa)
$\gamma_{psi}$	Constante psicrométrica (kPa °C <sup>-1</sup> )
$T_{\text{seco}} - T_{\text{húmedo}}$	Depresión del bulbo húmedo, con $T_{\text{seco}}$ la temperatura del termómetro de bulbo seco y $T_{\text{húmedo}}$ la temperatura del termómetro de bulbo húmedo (°C)

#### h) Presión real de vapor ( $e_a$ ) derivada de datos de humedad relativa.

La presión real de vapor se puede también derivar de la humedad relativa. Dependiendo de la disponibilidad de datos de humedad, se pueden utilizar diversas ecuaciones, en este caso es con datos de humedad relativa máxima y mínima.

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{\text{min}}) \frac{HR_{\text{max}}}{100} + e^\circ(T_{\text{max}}) \frac{HR_{\text{min}}}{100}}{2} \quad (11)$$

$e_a$	Presión real de vapor (kPa)
$e^\circ(T_{\text{min}})$	Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima (kPa)
$e^\circ(T_{\text{max}})$	Presión de saturación de vapor a la temperatura máxima (kPa)
$HR_{\text{min}}$	Humedad relativa mínima (%)
$HR_{\text{max}}$	Humedad relativa máxima (%)

#### i) Radiación extraterrestre para periodos diarios ( $R_a$ )

La radiación extraterrestre, para cada día del año y para diversas latitudes se puede estimar a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año.



$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [ \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) ] \quad ( 12 )$$

donde:

- $R_a$  Radiación extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
- $G_{sc}$  Constante solar =  $0.082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$
- $d_r$  Distancia relativa inversa Tierra-Sol
- $\omega_s$  Angulo de radiación a la puesta del sol (rad)
- $\varphi$  Latitud (rad)
- $\delta$  Declinación solar (rad)

**j) Distancia relativa inversa Tierra-Sol ( $d_r$ )**

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad ( 13 )$$

donde:

- $d_r$  Distancia relativa inversa Tierra-Sol
- $J$  Número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre)

**k) Declinación solar ( $\delta$ )**

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad ( 14 )$$

donde:

- $d_r$  Declinación solar
- $J$  Número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre)

**l) Angulo de radiación a la hora de la puesta de sol ( $\omega_s$ )**

$$\omega_s = \arccos[- \tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad ( 15 )$$

donde:



- $\omega_s$  Angulo de radiación a la puesta del sol (rad)  
 $\varphi$  Latitud (rad)  
 $\delta$  Declinación solar (rad)

**m) Radiación solar en un día despejado ( $R_{so}$ )**

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (16)$$

donde:

- $R_{so}$  Radiación solar en un día despejado ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )  
 $z$  Elevación de la estación sobre el nivel del mar (m)  
 $R_a$  Radiación extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

**n) Radiación neta solar o de onda corta ( $R_{ns}$ )**

La radiación neta de onda corta resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada es calculada con:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (17)$$

- $R_{ns}$  Radiación neta solar o de onda corta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )  
 $\alpha$  Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0.23 para el cultivo hipotético de referencia (adimensional)  
 $R_s$  Radiación solar entrante ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

**o) Radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ )**

La cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia. Esta relación se expresa cuantitativamente por la ley de Stefan-Boltzmann. Se debe tener en cuenta que el flujo de energía neta que sale de la superficie terrestre es menor que la calculada y dada por la ley de Stefan-Boltzmann debido a la absorción y radiación devuelta del cielo. El vapor de agua, las nubes, el dióxido de carbono y el polvo absorben y emiten radiación de onda larga. Por ello se deben conocer sus concentraciones para



determinar el flujo saliente neto. Como la humedad y la nubosidad tienen un papel importante, la ley de Stefan-Boltzmann se corrige por estos dos factores cuando se estima el flujo saliente neto de la radiación de onda larga. De tal modo que se asume que las concentraciones de los otros factores de absorción de radiación son constantes:

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (18)$$

donde:

- $R_{nl}$  Radiación neta de onda larga ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
- $\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann ( $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
- $T_{max,K}$  Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas  
( $\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$ )
- $T_{min,K}$  Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas  
( $\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$ )
- $e_a$  Presión de vapor real (kPa)
- $R_s / R_{so}$  Radiación relativa de onda corta (valores  $\leq 1.0$ )
- $R_s$  Radiación solar medida o calculada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
- $R_{so}$  Radiación en un día despejado ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

#### p) Radiación neta ( $R_n$ )

La radiación neta ( $R_n$ ) es la diferencia entre la radiación neta de onda corta ( $R_{ns}$ ) y la radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ ):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (19)$$

#### q) Flujo de calor del suelo ( $G$ )

Para periodos diarios la magnitud de flujo de calor bajo la superficie de referencia es relativamente pequeña, esta puede ser ignorada y entonces:

$$G_{day} \approx 0 \quad (20)$$

### r) Velocidad de viento ( $u_2$ )

La velocidad del viento a diversas alturas sobre la superficie del suelo tiene valores diferentes. La fricción superficial tiende a reducir la velocidad del viento que atraviesa la superficie. La velocidad del viento es menor cerca de la superficie y aumenta con altura. Por esta razón los anemómetros se colocan en una altura estándar elegida, 10 m en meteorología y 2 o 3 m en agrometeorología. Para el cálculo de la evapotranspiración, se requiere la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie. Para ajustar los datos de velocidad del viento obtenido de instrumentos situados a elevaciones diferentes a la altura estándar de 2 m, se puede usar una relación logarítmica:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 z - 5.42)} \quad (21)$$

donde:

$u_2$  Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie ( $m s^{-1}$ )

$u_z$  Velocidad del viento medida a z m sobre la superficie ( $m s^{-1}$ )

z Altura de medición sobre la superficie (m)

#### 4.3.2 Método de Hargreaves

El método de Hargreaves-Samani 1985 se utiliza a menudo para proporcionar estimaciones de ETo, y se ha demostrado para proporcionar estimaciones de ETo que se comparan favorablemente con los de la 56-la FAO ecuación de Penman-Monteith en algunas localizaciones áridas y semiáridas (Hargreaves, 2003).

Hargreaves, utilizando datos medidos en un lisímetro de pesada de precisión y datos meteorológicos en Davis, California, durante un periodo de ocho años, observa que a través de regresiones y que por intervalos de tiempo de cinco días, la variación en la medida de la evapotranspiración se puede explicar a través de la temperatura media



y la radiación solar global ( $R_s$ ). Como resultado, en 1975 se publicó una ecuación para predecir  $ET_o$  basado solo en estos parámetros:

$$ET_o = 0.0135 R_s (T + 17.8) \quad (22)$$

donde

$ET_o$  Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$R_s$  Radiación solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

$T$  Temperatura media ( $^{\circ}\text{C}$ )

Hargreaves y Samani (1982) recomienda una ecuación simple para estimar la radiación solar usando la diferencia de temperatura:

$$R_s = K_{RS} R_a (T_{max} - T_{min})^{0.50} \quad (23)$$

donde:

$K_{RS}$  Coeficiente de ajuste basado en el promedio mensual de la humedad relativa.

$R_a$  Radiación extraterrestre

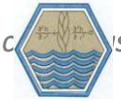
$T_{max}$  Temperatura máxima

$T_{min}$  Temperatura mínima

El coeficiente empírico  $K_{RS}$  estaba fijado inicialmente en 0,17 para Salt Lake City y otras regiones semiáridas, y más tarde Hargreaves (1994) recomienda el uso de 0.162 para las regiones del interior donde la masa de la tierra domina, y 0.190 para las regiones costeras, donde están influenciados masas de aire por un cuerpo de agua cercano.

Combinando las ecuaciones 22 y 23, y utilizando un  $K_{RS}=0.16$  resulta:

$$ET_o = 0.0022(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (24)$$



Sin embargo, para los meses de mayor demanda, Hargreaves y Samani (1985) recomienda que el coeficiente se incremente a 0,0023. Este ajuste dio lugar a la denominada ecuación de Hargreaves 1985:

$$ET_0 = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}R_a \quad (25)$$

### 4.3.3 Método de Priestley-Taylor

El modelo propuesto en 1972 por G.H.B. Priestley y R.J. Taylor corresponde a un método combinado-simplificado, pues el término relacionado con el déficit de presión de vapor, presente en todos los modelos de combinación, se encuentra aquí también, aunque reemplazado por un coeficiente empírico equivalente (Jensen et al. 1990).

Según la fórmula original de Priestley-Taylor  $\alpha$  es un término constante adimensional. Un valor promedio de  $\alpha = 1.26$  fue encontrado por los autores para la estimación de la evapotranspiración de referencia. La literatura muestra que puede variar de 1.08 a más de 1.60 en función de la advección del medio ambiente. La constante se debe aumentar para los climas áridos y semiáridos hasta  $\alpha = 1.70$  a 1.75. Los valores más bajos se utilizan para las zonas húmedas (Agricultural Research Council, 2009).

Conforme a Jensen et al. (1990), la ecuación adquiere la siguiente forma:

$$ET_o = \alpha \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G) \quad (26)$$

donde:

- $ET_o$  Evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>)
- $\alpha$  Constante adimensional Priestley-Taylor
- $\Delta$  Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>)
- $\gamma$  Constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)



- $R_n$  Radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{mm día}^{-1}$ )  
 $G$  Flujo de calor del suelo ( $\text{mm día}^{-1}$ )

#### 4.3.4 Método de Makkink

El método Makkink puede ser visto como una forma simplificada del método de Priestley-Taylor y fue desarrollado para las tierras con pastizales en Holanda. La diferencia es que el método de Makkink utiliza la radiación de onda corta entrante ( $R_s$ ) y temperatura, en lugar de utilizar la radiación neta ( $R_n$ ) y la temperatura. La ecuación se puede expresar como:

$$ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (27)$$

Donde

- $ET_o$  Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ )  
 $R_s$  Radiación Solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )  
 $\lambda$  Calor latente de vaporización,  $2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$   
 $\Delta$  Pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )  
 $\gamma$  Constante psicométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

#### 4.3.5 Método de Turc

También se conoce como la ecuación de Turc-radiación, este método fue presentado por Turc en 1961, con datos del clima húmedo de Europa Occidental (Francia). Este método sólo utiliza dos parámetros, la radiación media diaria y la temperatura. Es uno de los métodos clásicos de mayor uso en el mundo debido a sus buenos resultados. Para humedad relativa  $>50\%$  se puede expresar como:



$$ET_p = 0.01333 \left( \frac{T}{T + 15} \right) (23.9001R_s + 50) \quad (28)$$

Y para humedad relativa < 50 % se escribe:

$$ET_p = 0.01333 \left( \frac{T}{T + 15} \right) (23.9001R_s + 50) \left[ 1 + \left( \frac{50 - HR}{70} \right) \right] \quad (29)$$

donde:

- $ET_o$  Evapotranspiración potencial media diaria (mm día<sup>-1</sup>)
- $R_s$  Radiación Solar (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)
- $T$  Temperatura media diaria (°C)
- $HR$  Humedad relativa (%)

#### 4.4 ÍNDICES ESTADÍSTICOS UTILIZADOS PARA EVALUAR LA BONDAD DE AJUSTE

Una vez estimada la evapotranspiración diaria para todos los años mediante los diferentes métodos se calcularon los promedios para diferentes periodos y se compararon con los promedios de igual rango de tiempo obtenidos con Penman-Monteith. El proceso de validación fue comparando los valores obtenidos con el método de Penman-Monteith y los estimados mediante los distintos métodos utilizando índices estadísticos para proporcionar un análisis cuantitativo de resultados. Existen varias pruebas para analizar la estadística de la diferencia, para este trabajo se utilizaron los siguientes:

##### 4.4.1 Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE)

El RMSE es una medida de uso frecuente de la diferencia entre los valores pronosticados por el modelo y los valores realmente observados desde el entorno que se está modelando. Para el cálculo de RMSE se presenta la siguiente ecuación (Cai et al., 2007; Alexandris and Kerkides, 2003):



$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{yi} - ET_{PM})^2}{n}} \quad (30)$$

donde  $n$  es el número de observaciones,  $ET_{PM}$  y  $ET_{yi}$  son, respectivamente, el  $i$ -ésimo dato observado (calculado con el método de la FAO-PM) y los estimados con uno de los métodos.

#### 4.4.2 Error absoluto medio (MAE)

Para calcular el error absoluto medio se utiliza la siguiente ecuación:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{yi} - ET_{PM}|}{n} \quad (31)$$

donde:

MAE: Error absoluto medio

#### 4.4.3 Coeficiente de determinación ( $R^2$ )

El coeficiente de determinación está dado por la ecuación siguiente:

$$R^2 = \frac{[\sum (ET_{yi} - \overline{ET}_{yi}) (ET_{PM} - \overline{ET}_{PM})]^2}{\sum (ET_{yi} - \overline{ET}_{yi})^2 \sum (ET_{PM} - \overline{ET}_{PM})^2} \quad (32)$$

donde:

$ET_{yi}$  Dato  $i$ -ésimo estimado con uno de los métodos

$\overline{ET}_{yi}$  Promedio del arreglo de datos estimados

$ET_{PM}$  Dato  $i$ -ésimo calculado con FAO-PM

$\overline{ET}_{PM}$  Promedio del arreglo de datos calculados con FAO-PM

Este estadístico es un indicador menos flexible que el coeficiente de correlación, ya que al elevar al cuadrado un valor menor que la unidad el resultado es un valor más pequeño. Para aprobar un modelo mediante este estadístico se debe cumplir  $R^2 \geq 0.8$  y lo más cercano a la unidad (Cai et al., 2007)



#### 4.4.4 Índice Willmott de correspondencia (d)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{yi} - ET_{PM})^2}{\sum_{i=1}^n (|ET'_{yi}| + |ET'_{PM}|)^2} \quad (33)$$

donde

$$ET'_{yi} = ET_{yi} - \overline{ET_{PM}}$$

$$ET'_{PM} = ET_{PM} - \overline{ET_{PM}}$$

El desempeño del modelos es aceptable cuando  $d \geq 0.95$ , pero debe ser lo más cercano a la unidad. Con esto se busca que los errores elevados al cuadrado entre la suma elevada al cuadrado de las desviaciones de los valores estimados y observados con respecto a la media de los valores observado sea lo más aproximada a cero (Cai *et al.*, 2007).



## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1 Estación meteorológica Campo el Taxtes

#### 5.1.1 Análisis de cada método

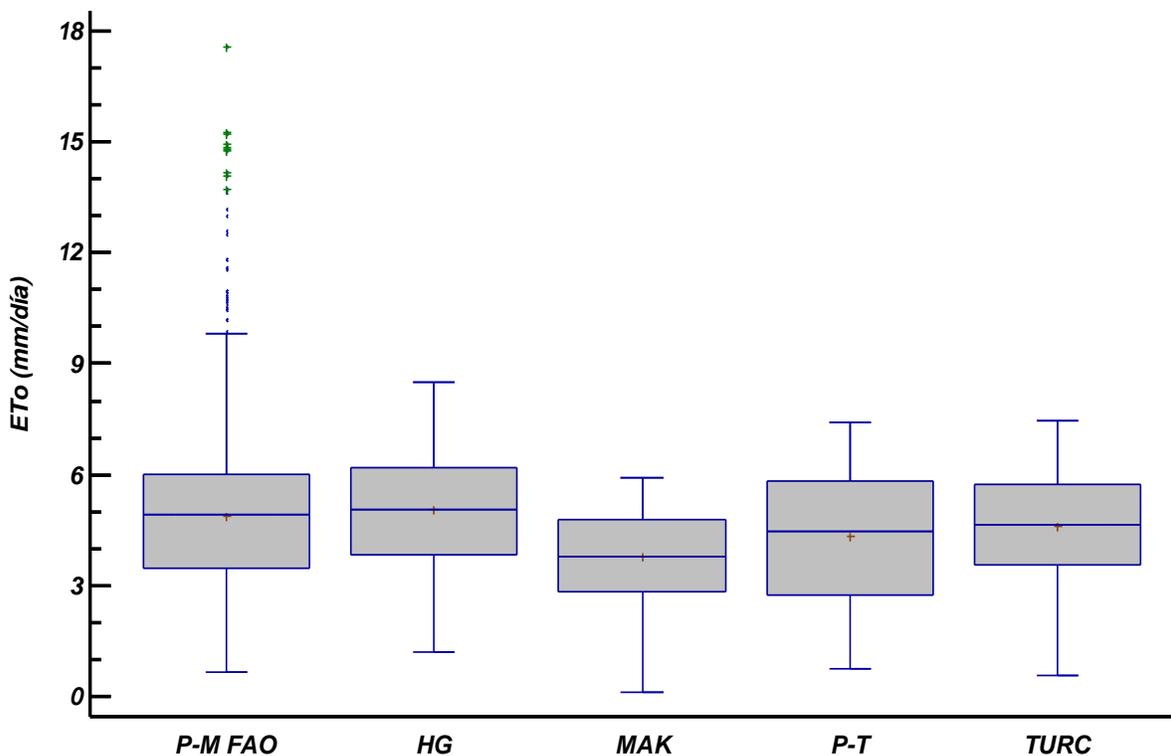
Se realizó un análisis estadístico, resaltando las características individuales de cada método, en el cuadro 5.1 se muestran las estadísticas más representativas obtenidas de cada método. Haciendo un resumen del cuadro, para esta estación en particular se analizaron 2,467 datos, correspondientes a siete años de información para la estimación de la ETo (Abril, 2006 – Diciembre, 2012); el intervalo en la cual se encuentra la media de evapotranspiración estimada para todos los métodos esta entre 3.7 y 5.1 mm/día, así mismo se observa que el valor máximo se obtuvo con el método de Penman-Monteith FAO con un valor de 18.51 mm/día y el valor mínimo fue de 0.153 mm/día que corresponde al método de Makkink; además, la desviación estándar con respecto a la media la presenta el método de Makkink con un valor de 1.165 mm/día, de igual manera la varianza para este método es mínima. El coeficiente de variación mínimo le corresponde al método de Hargreaves-Samani con 27.99 %. En el cuadro anterior también se observa que, el rango de variación entre la diferencia del valor de ETo máximo y mínimo, lo presenta el método de Penman-Monteith FAO con un valor de 17.84 mm/día.

**Cuadro 5.1.** Resumen estadístico para cada uno de los métodos en la estación Campo el Taxtes (2006-2012).

METODO	P-M FAO	HG	MAK	P-T	TURC
<b>Total de datos</b>	2467	2467	2467	2467	2467
<b>Media (mm/día)</b>	4.884	5.069	3.791	4.366	4.631
<b>Mediana (mm/día)</b>	4.917	5.093	3.806	4.503	4.681
<b>Máximo (mm/día)</b>	18.510	8.526	5.919	7.420	7.494
<b>Mínimo (mm/día)</b>	0.670	1.217	0.153	0.788	0.567
<b>Varianza (mm/día)</b>	3.450	2.011	1.357	2.789	1.718
<b>Desviación estándar (mm/día)</b>	1.858	1.418	1.165	1.670	1.311
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	38.04	27.99	30.74	38.26	28.31

P-M FAO: Penman-Monteith FAO, HG: Hargreaves, MAK: Makkink, P-T: Priestley-Taylor, Turc: Turc

En la Figura 5.1 se muestran gráficamente los resultados de las estadísticas obtenidas en el Cuadro 5.1 mediante un diagrama de caja y bigotes, donde se puede observar que el método de Priestley-Taylor presenta la mayor dispersión de sus valores, en un rango que va de 2.6 a 6.0 mm/día; el método que presenta menor dispersión en sus valores es el método de Makkink, con un rango de 2.6 a 5.4 mm/día. Una de las cosas relevantes que se observa, el método de Penman-Monteith FAO es el único método que presenta valores atípicos, por tal motivo, es importante mencionar que para análisis posteriores se tiene que tomar en cuenta dichos valores.



**Figura 5.1.** Grafica de caja y bigotes para cada método analizado.

En el Cuadro 5.2 se muestran las frecuencias relativas para distintos intervalos de ETo de los valores obtenidos con los diferentes métodos. En términos generales, se observa que los valores más frecuentes de ETo diaria en los diferentes métodos indica que están entre 2 y 8 mm/día. Así mismo, se observa en 2009 un aumento importante de los valores en el intervalo >8 mm/día; esto debido la presencia del



huracán Rick. El método de Makkink refleja una concentración de valores de ETo en los intervalos 2 - 4 y 4 - 6 mm/día. También, se observa que las frecuencias indican que la concordancia entre valores calculados con Penman-Monteith FAO y los estimados con los demás métodos fue mayor en 2007, 2008 y 2011, en comparación con los otros años.

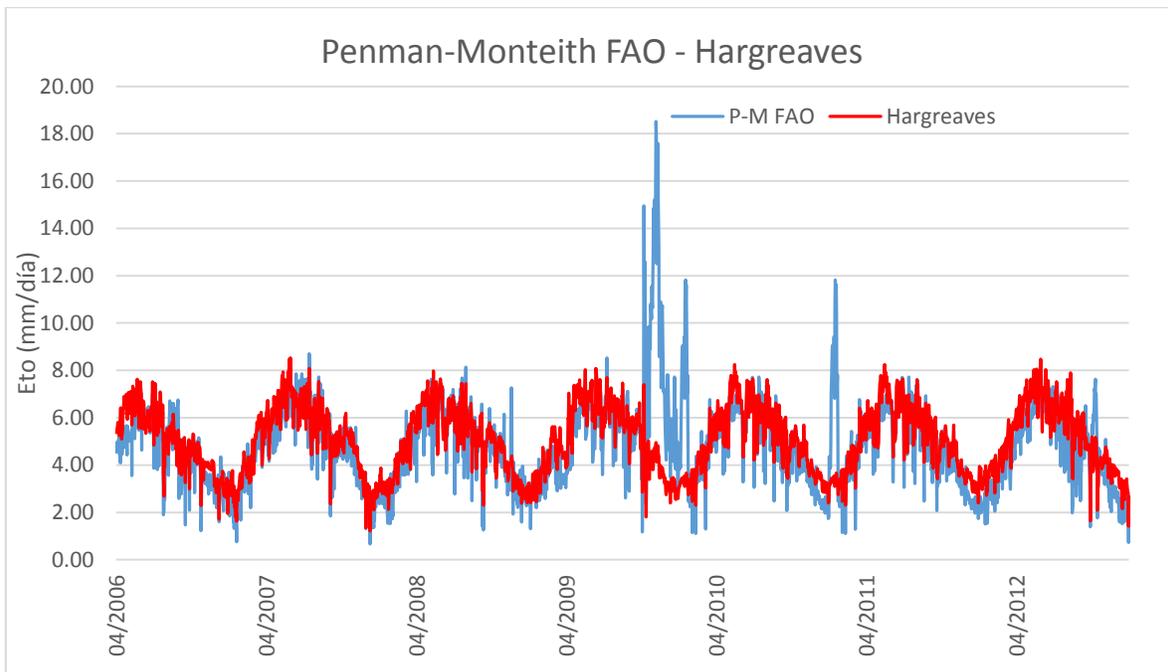
**Cuadro 5.2.** Frecuencias relativas (%) de le ETo calculada con los métodos de Penman-Monteith FAO, Hargreaves, Makkink, Priestley-Taylor y Turc para abril de 2006 a diciembre de 2012.

Año	Intervalo mm/día	P-M FAO	Hargreaves	Makkink	Priestley-Taylor	Turc
2006	< 2	1.8	0.7	4.7	9.1	2.2
	2 - 4	30.9	23.3	43.3	22.9	24.7
	4 - 6	50.5	49.1	52.0	42.5	59.3
	6 - 8	16.7	26.9	-	25.5	13.8
	> 8	-	-	-	-	-
2007	< 2	5.2	1.4	7.4	11.8	4.9
	2 - 4	27.9	25.8	45.5	32.1	26.0
	4 - 6	43.3	41.1	47.1	33.7	46.8
	6 - 8	23.3	30.4	-	22.5	22.2
	> 8	0.3	1.4	-	-	-
2008	< 2	2.5	-	6.3	6.8	2.5
	2 - 4	32.8	28.4	49.5	38.3	33.9
	4 - 6	42.9	44.5	44.3	38.0	48.9
	6 - 8	21.6	27.0	-	16.9	14.8
	> 8	0.3	-	-	-	-
2009	< 2	0.5	0.3	5.5	6.6	2.2
	2 - 4	23.8	27.7	54.0	38.6	34.0
	4 - 6	38.4	40.0	40.5	32.9	44.9
	6 - 8	26.8	31.5	-	21.9	18.9
	> 8	10.4	0.5	-	-	-
2010	< 2	1.6	-	2.7	4.4	1.1
	2 - 4	31.0	28.5	51.0	40.8	32.3
	4 - 6	40.5	41.1	46.3	30.7	45.8
	6 - 8	24.1	30.1	-	24.1	20.8
	> 8	2.7	0.3	-	-	-
2011	< 2	3.6	-	4.1	11.2	2.5

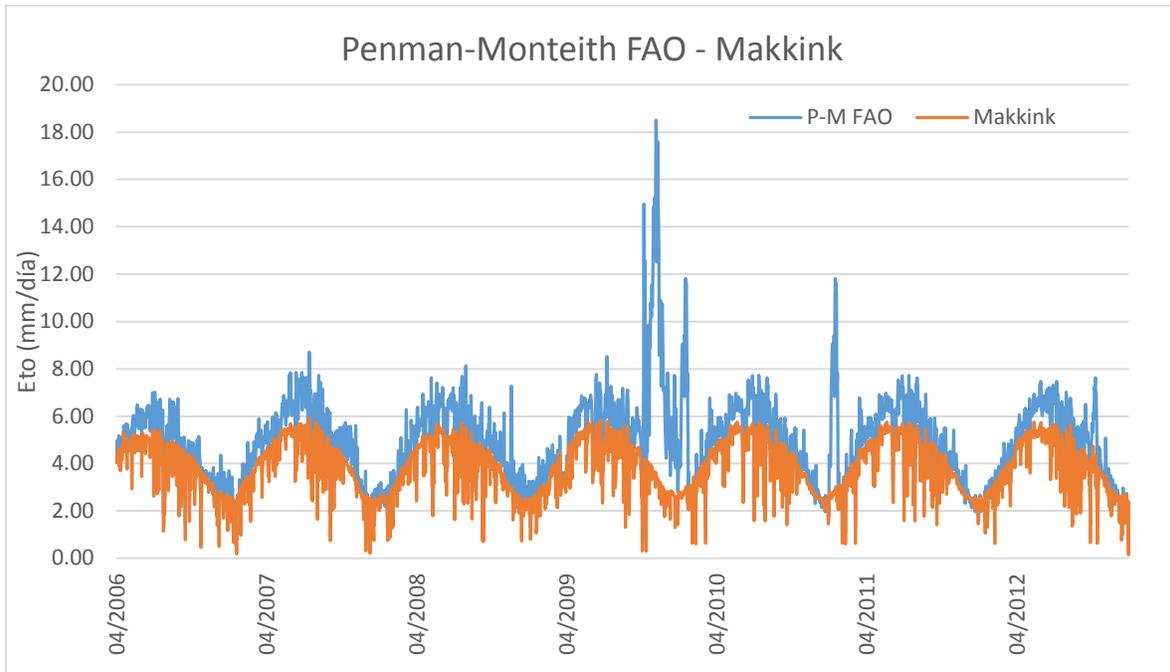
Año	Intervalo mm/día	P-M FAO	Hargreaves	Makkink	Priestley-Taylor	Turc
	2 - 4	33.4	25.2	49.9	33.4	32.6
	4 - 6	44.4	41.4	46.0	33.4	47.1
	6 - 8	18.6	33.4	-	21.9	17.8
	> 8	-	-	-	-	-
2012	< 2	4.1	0.5	6.3	8.2	2.5
	2 - 4	37.4	29.0	51.6	36.6	35.5
	4 - 6	32.2	40.2	42.1	35.8	41.5
	6 - 8	26.2	28.7	-	19.4	20.5
	> 8	-	1.6	-	-	-

### 5.1.2 Comparación de los métodos con el método de Penman-Monteith FAO

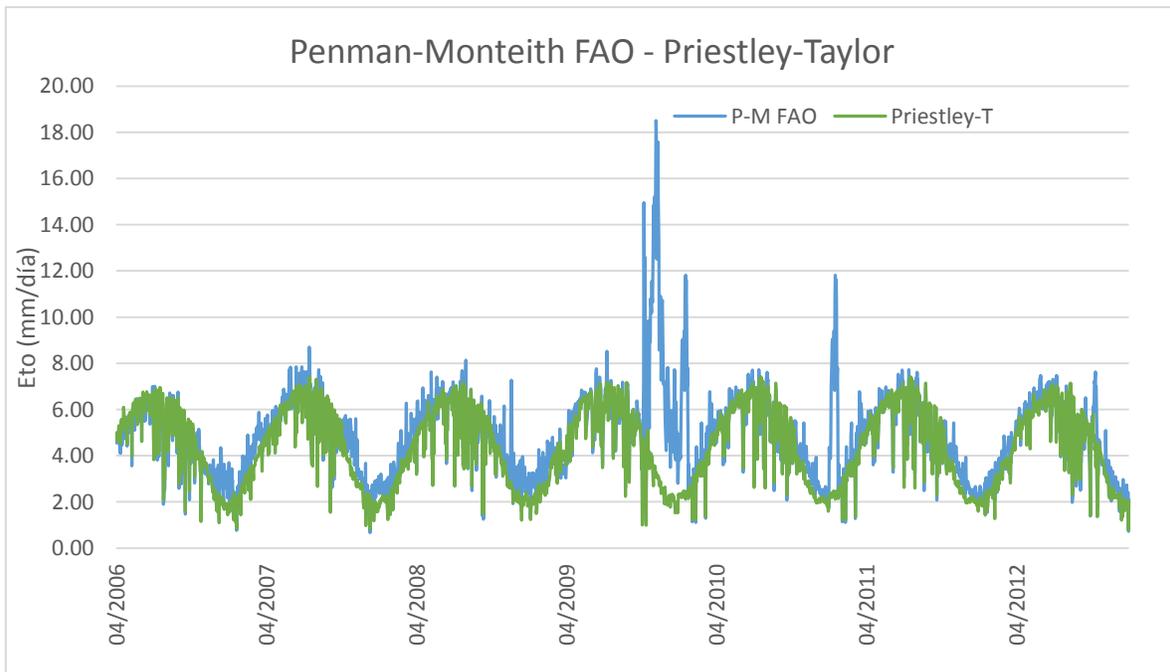
Para hacer la comparación se realizó tomando la evapotranspiración estimada con cada método contra el método de Penman-Monteith FAO, en las Figuras 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se presenta a nivel general el comportamiento de cada método en comparación con el método de Penman-Monteith FAO.



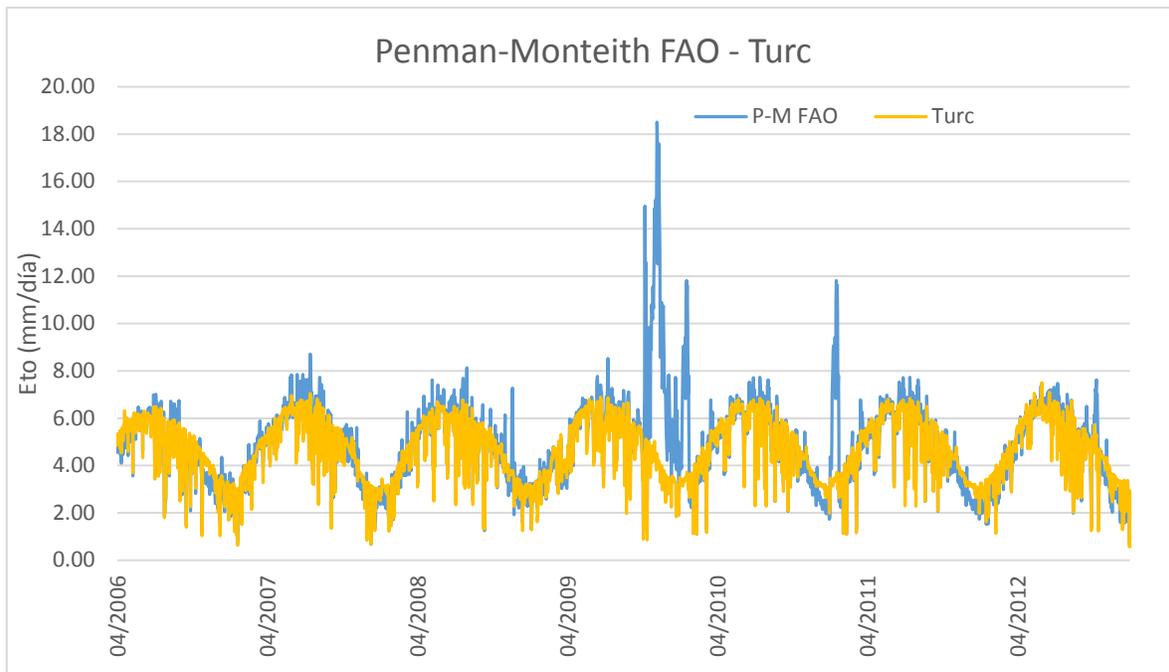
**Figura 5.2.** Comparación grafica de la ETo con Penman-Monteith FAO Vs Hargreaves, estación Campo Taxtes



**Figura 5.3.** Comparación grafica de la ETo con Penman-Monteith FAO Vs Makkink, estación Campo Taxtes

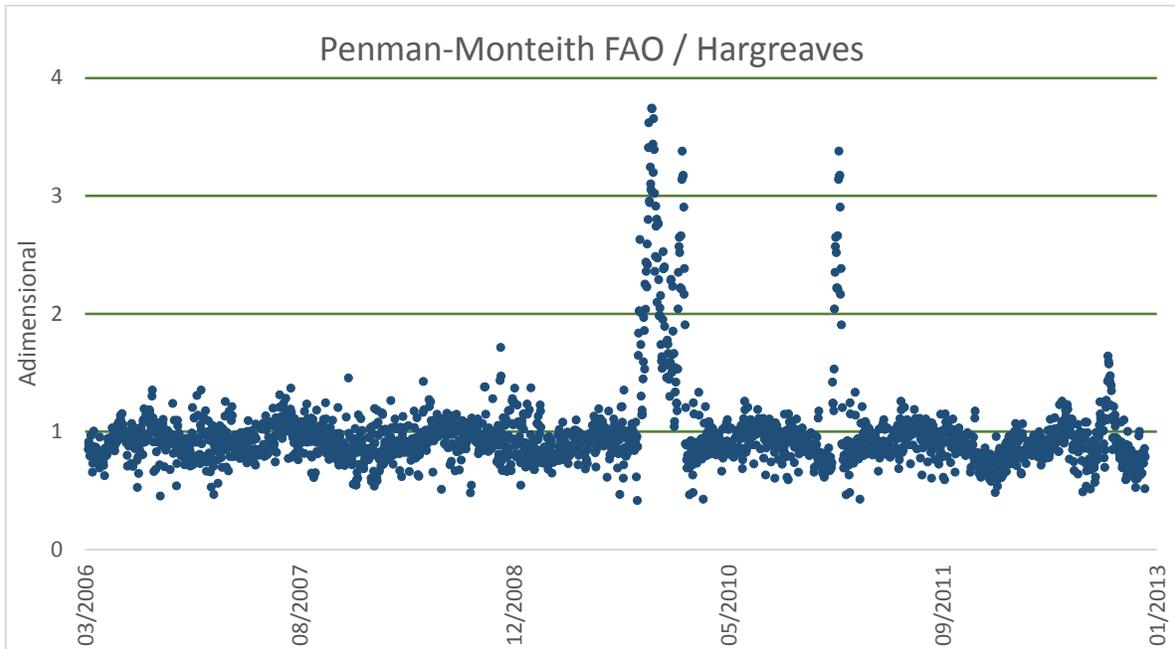


**Figura 5.4.** Comparación grafica de la ETo con Penman-Monteith FAO Vs Priestley-Taylor, estación Campo Taxtes

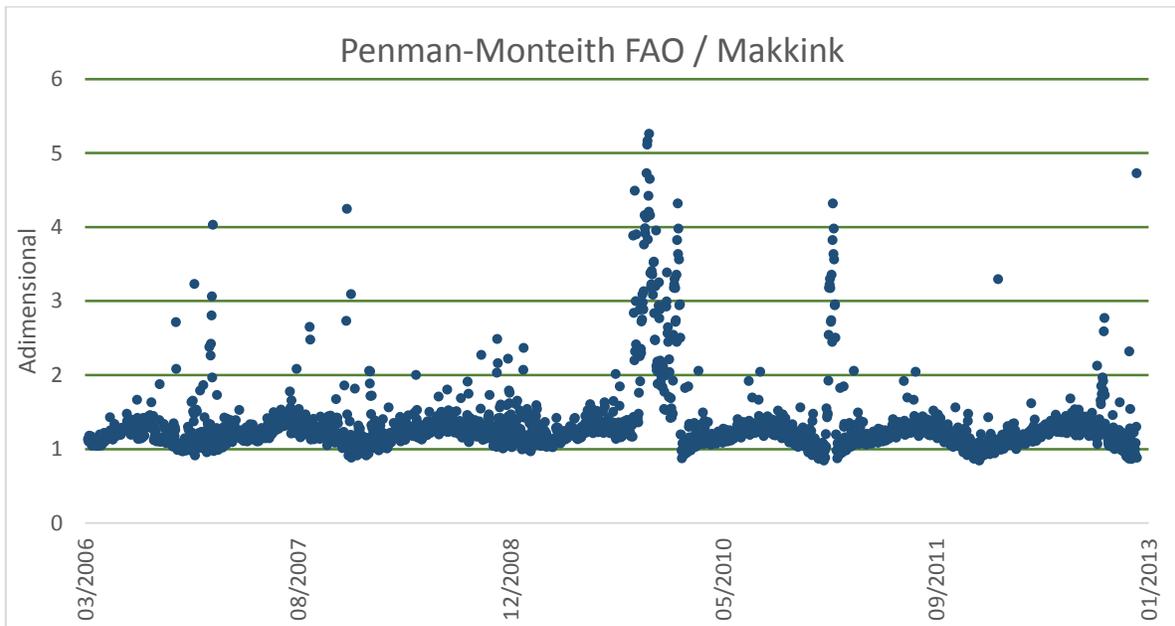


**Figura 5.5.** Comparación grafica de la E<sub>to</sub> con Penman-Monteith FAO Vs Turc, estación Campo Taxtes

Como se observa en las figuras anteriores, con el método de Penman-Monteith de octubre a diciembre del año 2009, se eleva la evapotranspiración, esto debido al Huracán Rick que se presentó en dicho año. Además se puede observar que el método de Hargreaves sobrestima el valor de evapotranspiración, comparado con el calculado con Penman-Monteith FAO; en comparación con los métodos de Makkink y Priestley-Taylor que subestiman dicho valor de evapotranspiración. En las Figuras 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 se presenta gráficamente el cociente entre el método de Penman-Monteith FAO con cada uno de los métodos (P-M FAO/Hargreaves, Penman-Monteith FAO/Makkink, Penman-Monteith FAO/Priestley-Taylor y Penman-Monteith FAO/Turc).



**Figura 5.6.** Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Hargreaves.



**Figura 5.7** Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Makkink.

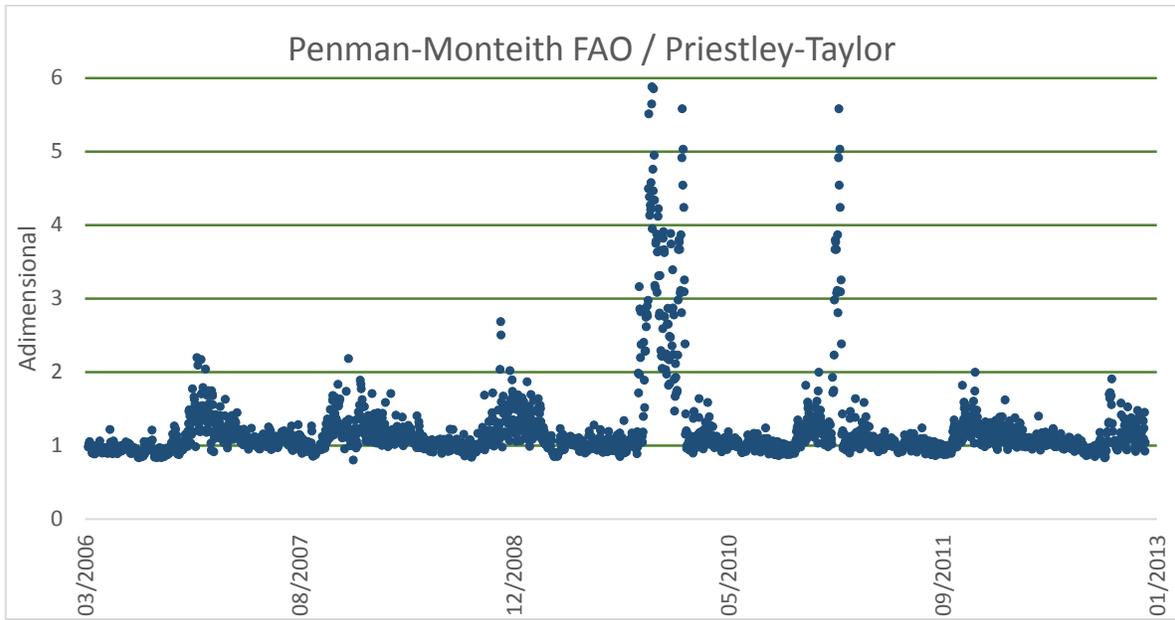


Figura 5.8 Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Priestley-Taylor.

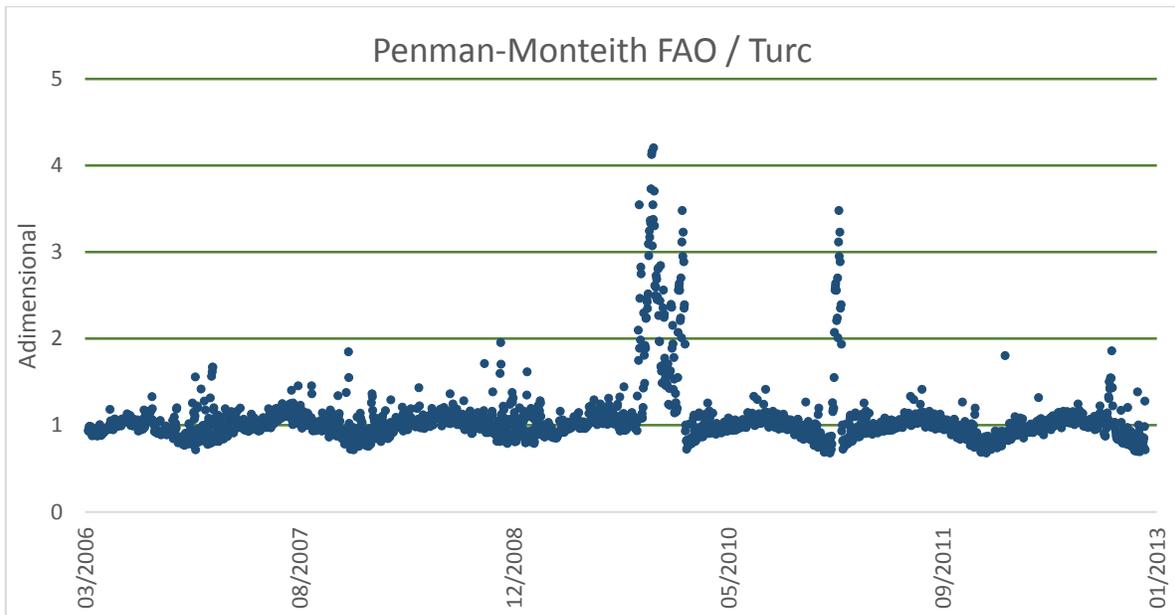


Figura 5.9 Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Turc.

### 5.1.3 Índices y errores de estimación

En esta sección se presentará y se discuten los resultados obtenidos de los cálculos de índices y errores de estimación, al hacer la comparación de la evapotranspiración diaria estimada con el método de Penman-Monteith FAO contra los valores diarios obtenidos con los métodos de Hargreaves, Makkink, Priestley-Taylor y Turc.

En los cuadros 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 se presentan los valores de los índices y errores de RMSE, MAE,  $d$  y  $R^2$  que se obtuvieron al hacer la comparación de los diferentes métodos alternativos con el método de Penman-Monteith FAO para los periodos de 1, 15 y 30 días, para cada año.

**Cuadro 5.3.** Índices y errores de estimación diarias de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Campo el Taxtes (2006-2012).

AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	$d$	$R^2$
2006	Hargreaves	0.795	0.474	0.907	0.755
	Makkink	0.871	0.556	0.880	0.875
	Priestley-Taylor	0.599	0.358	0.957	0.880
	Turc	0.461	0.907	0.966	0.883
2007	Hargreaves	0.762	0.624	0.942	0.834
	Makkink	1.122	0.962	0.869	0.910
	Priestley-Taylor	0.693	0.540	0.959	0.905
	Turc	0.503	0.391	0.973	0.923
2008	Hargreaves	0.789	0.626	0.920	0.766
	Makkink	1.123	0.961	0.839	0.773
	Priestley-Taylor	0.741	0.524	0.942	0.881
	Turc	0.529	0.378	0.962	0.905
2009	Hargreaves	2.877	1.643	0.467	0.039
	Makkink	3.312	2.060	0.500	0.089
	Priestley-Taylor	3.251	1.647	0.497	0.032
	Turc	2.869	1.402	0.518	0.097
2010	Hargreaves	1.424	0.855	0.775	0.374
	Makkink	1.643	1.051	0.724	0.457
	Priestley-Taylor	1.552	0.698	0.795	0.403
	Turc	1.300	0.616	0.807	0.458
2011	Hargreaves	0.884	0.732	0.906	0.832
	Makkink	0.901	0.778	0.887	0.910
	Priestley-Taylor	0.601	0.453	0.963	0.901



AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R <sup>2</sup>
	<b>Turc</b>	0.413	0.325	0.977	0.930
2012	<b>Hargreaves</b>	0.999	0.852	0.897	0.762
	<b>Makkink</b>	1.047	0.833	0.877	0.776
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.597	0.404	0.967	0.883
	<b>Turc</b>	0.561	0.431	0.965	0.896

RMSE: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error; MAE: Error absoluto medio; d: Índice de Willmott; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación.

**Cuadro 5.4.** Índices y errores de estimación para un periodo de 15 días de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Campo el Taxtes (2006-2012).

AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R <sup>2</sup>
2006	<b>Hargreaves</b>	0.746	0.635	0.626	0.477
	<b>Makkink</b>	0.797	0.742	0.697	0.739
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.537	0.465	0.757	0.615
	<b>Turc</b>	0.434	0.386	0.801	0.738
2007	<b>Hargreaves</b>	0.748	0.630	0.625	0.343
	<b>Makkink</b>	1.038	0.968	0.619	0.678
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.635	0.531	0.714	0.563
	<b>Turc</b>	0.464	0.394	0.826	0.694
2008	<b>Hargreaves</b>	0.762	0.629	0.630	0.342
	<b>Makkink</b>	1.066	0.969	0.631	0.677
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.657	0.519	0.726	0.544
	<b>Turc</b>	0.485	0.380	0.827	0.693
2009	<b>Hargreaves</b>	1.857	1.652	0.544	0.392
	<b>Makkink</b>	2.221	2.066	0.560	0.595
	<b>Priestley-Taylor</b>	1.834	1.643	0.677	0.527
	<b>Turc</b>	1.591	1.407	0.735	0.603
2010	<b>Hargreaves</b>	1.042	0.856	0.595	0.384
	<b>Makkink</b>	1.206	1.063	0.616	0.612
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.888	0.704	0.703	0.489
	<b>Turc</b>	0.743	0.618	0.753	0.605
2011	<b>Hargreaves</b>	0.851	0.728	0.528	0.323
	<b>Makkink</b>	0.839	0.787	0.622	0.714
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.542	0.453	0.700	0.534
	<b>Turc</b>	0.375	0.321	0.821	0.720
2012	<b>Hargreaves</b>	0.976	0.855	0.551	0.413

AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R <sup>2</sup>
	<b>Makkink</b>	0.917	0.842	0.677	0.708
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.525	0.405	0.741	0.576
	<b>Turc</b>	0.504	0.430	0.797	0.719

RMSE: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error; MAE: Error absoluto medio; d: Índice de Willmott; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación.

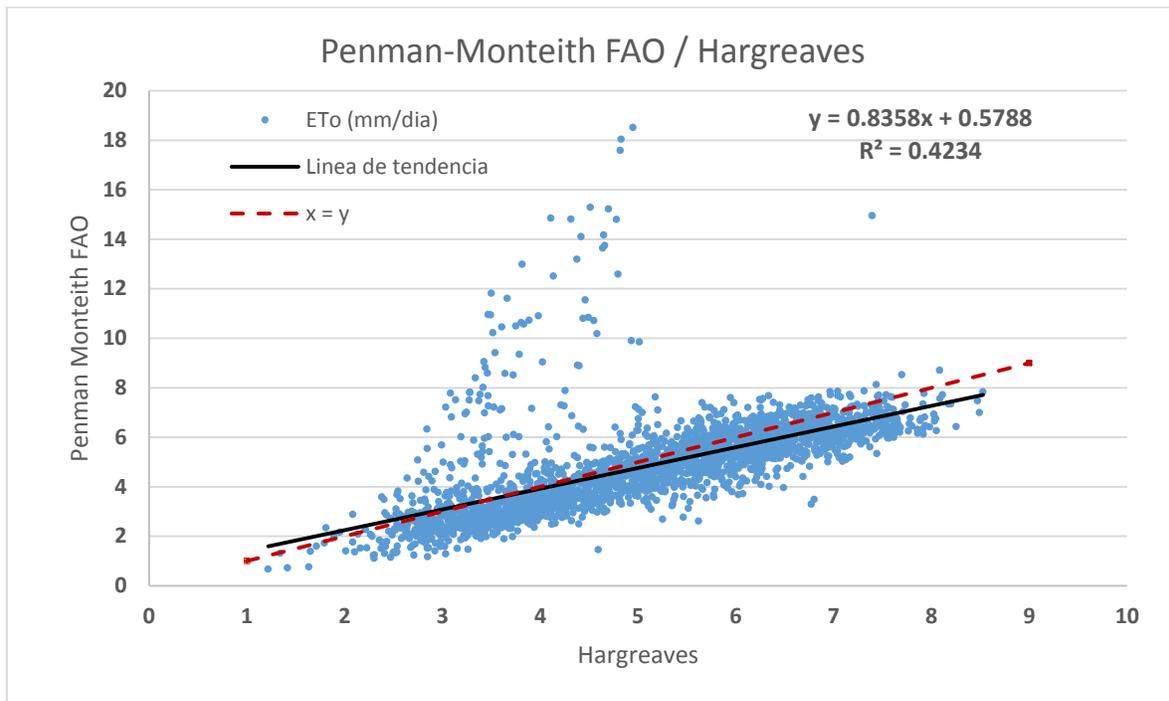
**Cuadro 5.5.** Índices y errores de estimación para un periodo de 30 días de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Campo el Taxtes (2006-2012).

AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R <sup>2</sup>
2006	<b>Hargreaves</b>	0.756	0.635	0.656	0.439
	<b>Makkink</b>	0.811	0.742	0.716	0.729
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.547	0.465	0.799	0.609
	<b>Turc</b>	0.442	0.386	0.833	0.732
2007	<b>Hargreaves</b>	0.749	0.630	0.677	0.408
	<b>Makkink</b>	1.052	0.968	0.652	0.698
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.651	0.531	0.738	0.583
	<b>Turc</b>	0.471	0.394	0.865	0.718
2008	<b>Hargreaves</b>	0.774	0.629	0.663	0.366
	<b>Makkink</b>	1.081	0.969	0.671	0.678
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.668	0.519	0.770	0.597
	<b>Turc</b>	0.502	0.380	0.855	0.692
2009	<b>Hargreaves</b>	1.898	1.652	0.597	0.426
	<b>Makkink</b>	2.254	2.066	0.616	0.647
	<b>Priestley-Taylor</b>	1.866	1.643	0.729	0.558
	<b>Turc</b>	1.626	1.407	0.784	0.653
2010	<b>Hargreaves</b>	1.046	0.856	0.698	0.502
	<b>Makkink</b>	1.215	1.063	0.686	0.727
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.896	0.704	0.788	0.616
	<b>Turc</b>	0.752	0.618	0.840	0.728
2011	<b>Hargreaves</b>	0.862	0.728	0.601	0.365
	<b>Makkink</b>	0.850	0.787	0.689	0.746
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.558	0.453	0.751	0.597
	<b>Turc</b>	0.382	0.321	0.876	0.759
2012	<b>Hargreaves</b>	0.992	0.855	0.582	0.414
	<b>Makkink</b>	0.926	0.842	0.725	0.745
	<b>Priestley-Taylor</b>	0.534	0.405	0.802	0.642

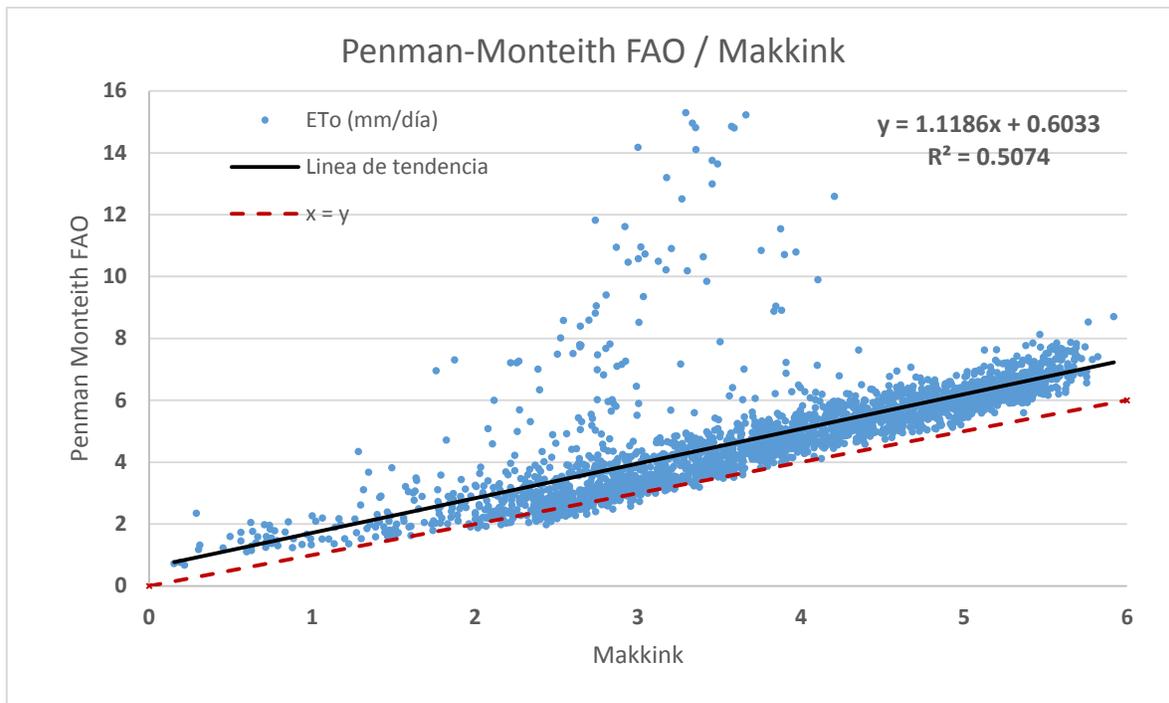
AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R <sup>2</sup>
	Turc	0.514	0.430	0.852	0.754

RMSE: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error; MAE: Error absoluto medio; d: Índice de Willmott; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación.

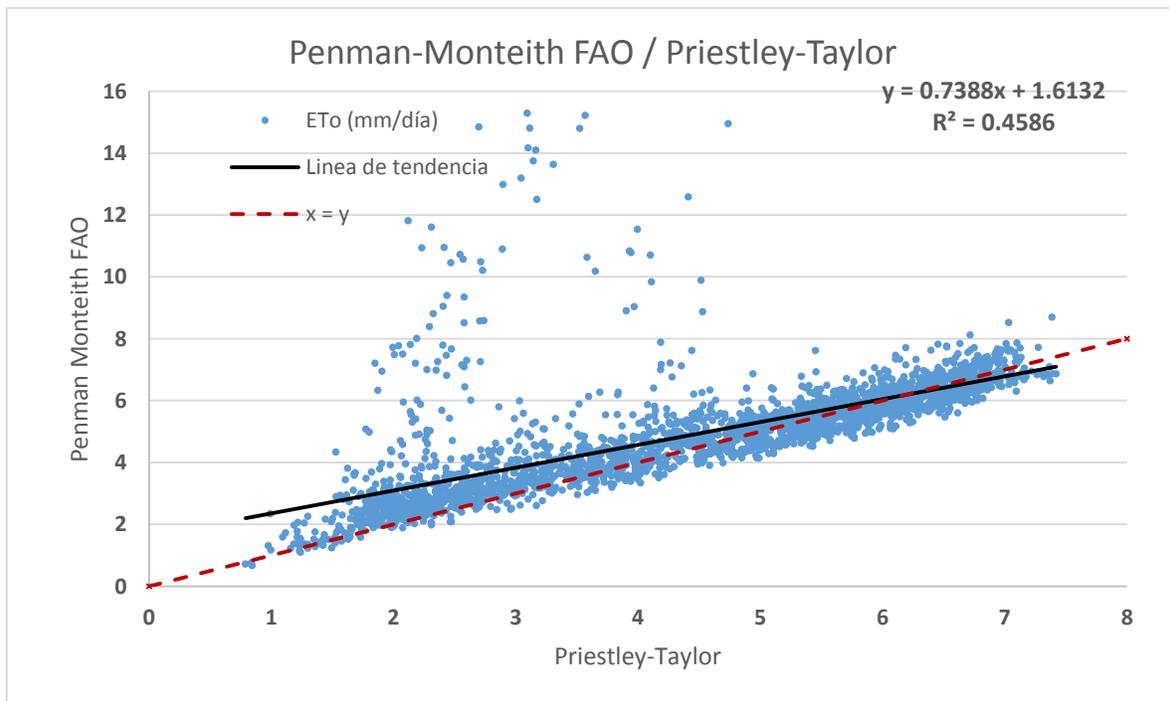
En las Figuras 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 se presentan gráficamente las ecuaciones de regresión lineal para cada uno de los métodos comparados con el método de Penman-Monteith FAO.



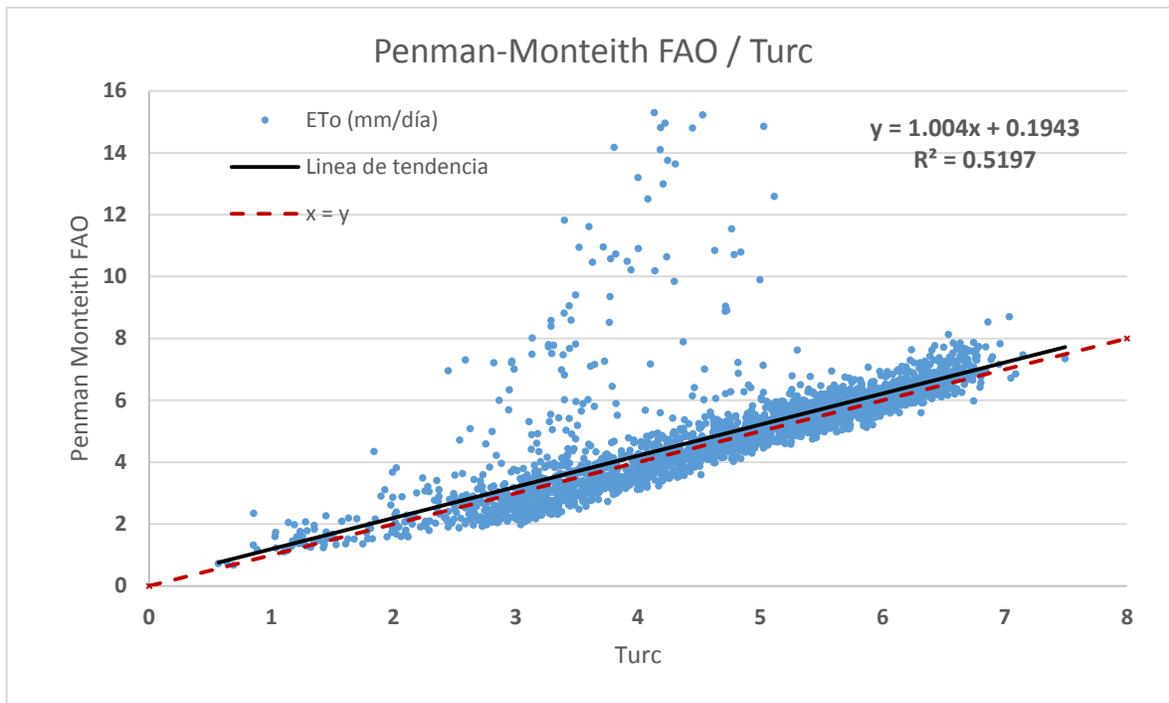
**Figura 5.10.** Regresión lineal Penman-Monteith Vs Hargreaves de Abril, 2006 a Diciembre, 2012, estación Campo el Taxtes.



**Figura 5.11.** Regresión lineal Penman-Monteith Vs Makkink de Abril, 2006 a Diciembre, 2012, estación Campo el Taxtes.



**Figura 5.12.** Regresión lineal Penman-Monteith Vs Priestley-Taylor de Abril, 2006 a Diciembre, 2012, estación Campo el Taxtes.



**Figura 5.13.** Regresión lineal Penman-Monteith Vs Turc de Abril, 2006 a Diciembre, 2012, estación Campo el Taxtes.

## 5.2 Estación meteorológica Mexicali

### 5.2.1 Análisis de cada método

Para esta estación en particular se analizaron 3,571 datos, correspondientes a diez años de información para la estimación de la ETo (Enero, 2001 – Octubre, 2010); en el Cuadro 5.6 se observa que el intervalo en la cual se encuentra la media de evapotranspiración estimada para todos los métodos esta entre 3.82 y 5.61 mm/día, así mismo se observa que el valor máximo se obtuvo con el método de Turc con un valor de 18.44 mm/día y el valor mínimo fue de 0.17 mm/día que corresponde al método de Priestley-Taylor; además, la desviación estándar más pequeña con respecto a la media la presenta el método de Makkink con un valor de 1.707 mm/día, de igual manera la varianza para este método es mínima. El coeficiente de variación mínimo le corresponde al método de Penman-Monteith FAO con 43.18 %. En el cuadro anterior también se observa que, el rango de variación mínimo entre la



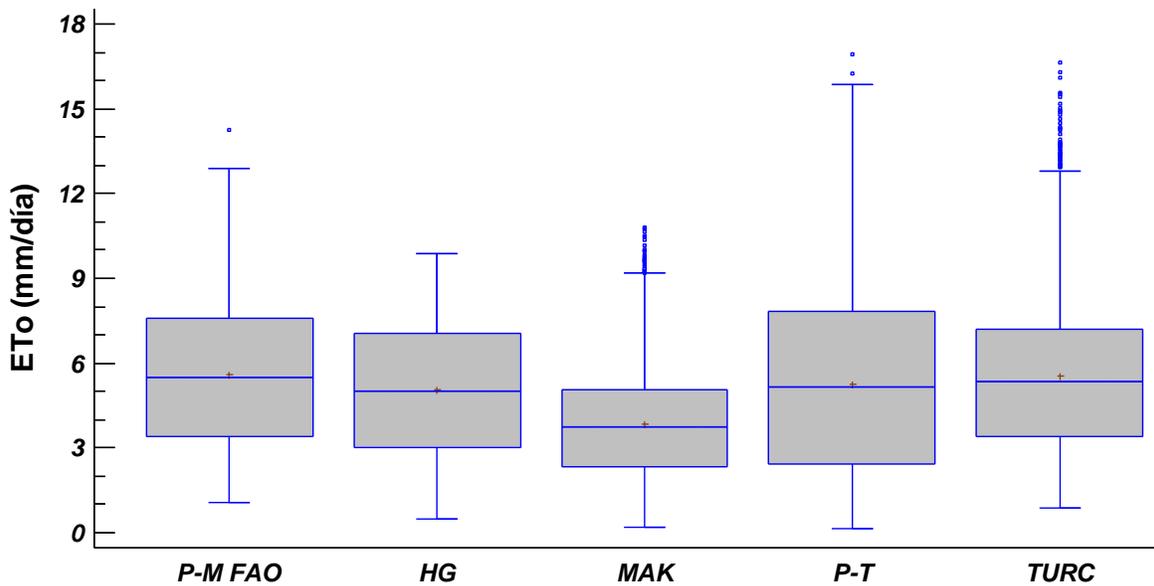
diferencia del valor de ETo máximo y mínimo, lo presenta el método de Hargreaves con un valor de 9.39 mm/día y el máximo de 17.56 mm/día, el método de Turc.

**Cuadro 5.6** Resumen estadístico para cada uno de los métodos en la estación Mexicali (2001-2010).

METODO	P-M FAO	HG	MAK	P-T	TURC
<b>Total de datos</b>	3,571	3,571	3,571	3,571	3,571
<b>Media (mm/día)</b>	5.61	5.07	3.82	5.27	5.55
<b>Mediana (mm/día)</b>	5.48	5.02	3.76	5.14	5.33
<b>Máximo (mm/día)</b>	14.26	9.89	10.82	16.95	18.44
<b>Mínimo (mm/día)</b>	1.08	0.51	0.19	0.17	0.88
<b>Varianza (mm/día)</b>	5.860	4.802	2.915	9.113	6.607
<b>Desviación estándar (mm/día)</b>	2.421	2.191	1.707	3.019	2.570
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	43.18	43.24	44.66	57.24	46.28

P-M FAO: Penman-Monteith FAO, HG: Hargreaves, MAK: Makkink, P-T: Priestley-Taylor, Turc: Turc

En la Figura 5.10 se muestran gráficamente los resultados de las estadísticas obtenidas en el Cuadro 5.6 mediante un diagrama de caja y bigotes, donde se puede observar que el método de Priestley-Taylor presenta la mayor dispersión de sus valores, en un rango que va de 2.45 a 7.95 mm/día; el método que presenta menor dispersión en sus valores es el método de Makkink, con un rango de 2.40 a 5.10 mm/día. Una de las cosas relevantes que se observa, el método de Hargreaves es el único método que no presenta valores atípicos, por tal motivo, es importante mencionar que para análisis posteriores se tiene que tomar en cuenta dichos valores.



**Figura 5.14.** Grafica de caja y bigotes para cada método analizado.

En el Cuadro 5.7 se muestran las frecuencias relativas para distintos intervalos de ETo de los valores obtenidos con los diferentes métodos. En términos generales, se observa que los valores más frecuentes de ETo diaria en los diferentes métodos indica que están entre 2 y 10 mm/día. Así mismo, se observa en 2008 un aumento importante de los valores en el intervalo >10 mm/día; esto se observa considerable en los métodos de Priestley-Taylor y Turc. El método de Makkink refleja una concentración de valores de ETo en los intervalos 2 - 4 y 4 - 6 mm/día. También, se observa que las frecuencias indican que la concordancia entre valores calculados con Penman-Monteith FAO y los estimados con los demás métodos fue mayor en 2003 y 2004, en comparación con los otros años.

**Cuadro 5.7.** Frecuencias relativas (%) de le ETo calculada con los métodos de Penman-Monteith FAO, Hargreaves, Makkink, Priestley-Taylor y Turc para Enero de 2001 a Octubre de 2010.

Año	Intervalo mm/día	P-M FAO	Hargreaves	Makkink	Priestley-Taylor	Turc
2001	< 2	3.84	8.77	19.73	21.37	4.66
	2 - 4	28.49	32.05	35.62	19.73	33.70
	4 - 6	21.10	16.44	44.38	16.99	22.74
	6 - 8	19.45	27.40	0.27	21.37	21.10



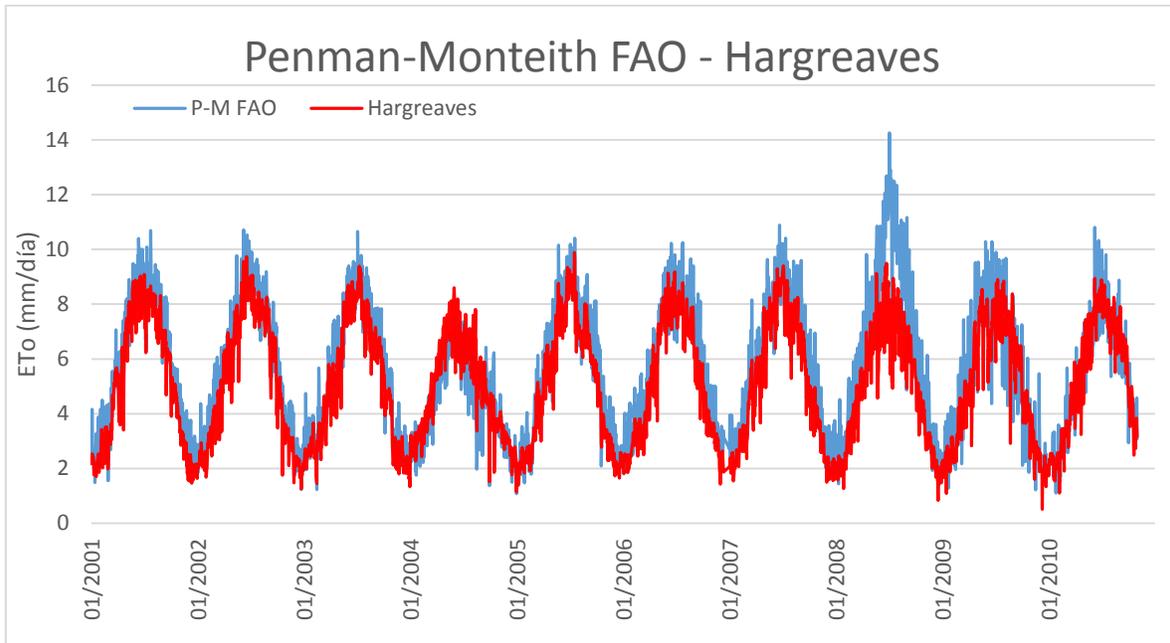
Año	Intervalo mm/día	P-M FAO	Hargreaves	Makkink	Priestley-Taylor	Turc
	8 - 10	25.48	15.34	--	20.55	15.62
	> 10	1.64	--	--	--	2.19
2002	< 2	2.74	5.21	20.82	24.66	3.84
	2 - 4	26.30	34.79	31.23	18.08	28.49
	4 - 6	24.11	18.08	45.75	15.07	25.75
	6 - 8	21.64	29.32	2.19	20.82	26.30
	8 - 10	23.29	12.60	--	21.37	12.33
	> 10	1.92	--	--	--	3.29
2003	< 2	1.37	4.93	19.45	21.10	4.38
	2 - 4	33.42	33.42	36.16	18.36	32.05
	4 - 6	18.90	24.38	43.84	20.55	27.95
	6 - 8	24.38	23.29	0.55	19.45	25.75
	8 - 10	21.64	13.97	--	20.55	9.59
	> 10	0.27	--	--	--	0.27
2004	< 2	3.83	1.37	5.46	9.29	1.09
	2 - 4	39.62	38.52	51.91	24.04	36.34
	4 - 6	32.24	30.60	42.62	18.85	42.08
	6 - 8	24.32	27.60	--	23.50	20.49
	8 - 10	--	1.91	--	24.32	--
2005	< 2	4.93	6.03	21.64	19.18	5.75
	2 - 4	28.77	35.07	32.88	22.47	31.78
	4 - 6	17.81	21.92	45.48	18.63	19.18
	6 - 8	28.77	25.75	--	16.99	30.14
	8 - 10	18.63	11.23	--	22.74	12.60
	> 10	1.10	--	--	--	0.55
2006	< 2	0.29	2.61	15.65	17.97	1.16
	2 - 4	26.38	38.55	42.32	24.06	28.70
	4 - 6	24.35	19.42	40.29	15.94	30.43
	6 - 8	26.96	28.99	1.74	24.06	27.54
	8 - 10	20.87	10.43	--	17.39	11.59
	> 10	1.16	--	--	0.58	0.58
2007	< 2	2.47	8.77	19.73	20.82	3.84
	2 - 4	27.12	29.32	34.52	23.29	26.85
	4 - 6	22.47	22.74	41.64	14.79	23.01
	6 - 8	22.47	27.40	3.84	17.53	32.05
	8 - 10	23.84	11.78	0.27	23.01	11.51
	> 10	1.64	--	--	0.55	2.74
2008	< 2	3.55	7.92	13.93	20.77	4.37
	2 - 4	23.22	28.69	30.60	20.77	20.77



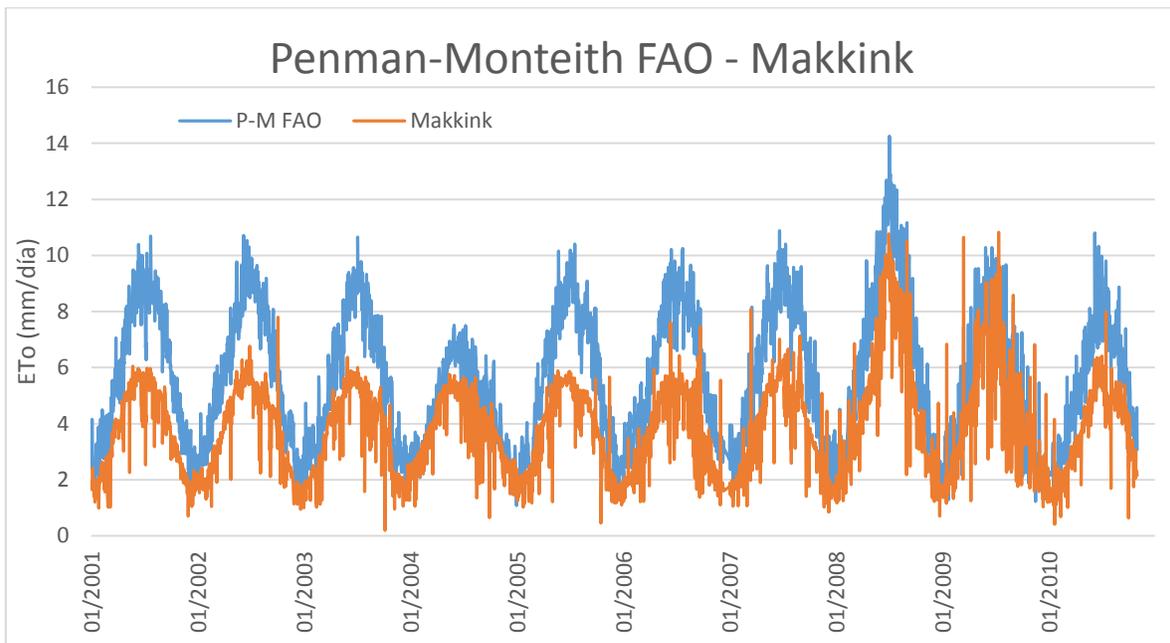
Año	Intervalo mm/día	P-M FAO	Hargreaves	Makkink	Priestley-Taylor	Turc
	4 - 6	20.49	28.42	24.32	13.11	18.31
	6 - 8	19.40	25.14	15.85	12.02	19.13
	8 - 10	16.12	9.84	13.66	9.56	13.93
	> 10	17.21	--	1.64	23.77	23.50
2009	< 2	4.66	8.22	15.07	20.82	1.37
	2 - 4	33.42	30.68	41.64	23.56	28.22
	4 - 6	26.30	20.55	21.64	18.90	26.58
	6 - 8	21.64	33.97	16.99	10.96	16.44
	8 - 10	13.42	6.58	4.11	10.41	11.51
	> 10	0.55	--	0.55	15.34	15.89
2010	< 2	2.30	3.62	16.12	8.22	3.62
	2 - 4	25.99	26.64	37.50	25.33	25.99
	4 - 6	29.93	23.36	39.80	21.71	24.67
	6 - 8	31.91	36.51	6.58	26.97	25.66
	8 - 10	9.21	9.87	--	17.11	15.79
	> 10	0.66	--	--	0.66	4.28

### 5.2.2 Comparación de los métodos con el método de Penman-Monteith FAO

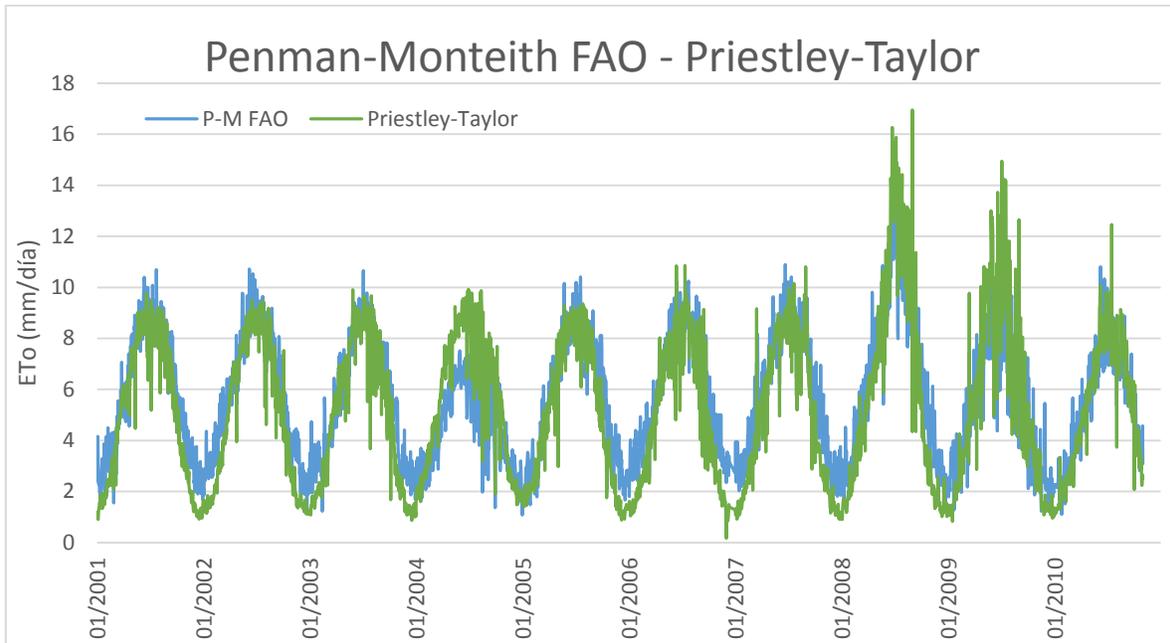
Se realizó la comparación tomando la evapotranspiración estimada con cada método contra el método de Penman-Monteith FAO, en las Figuras 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 se presenta a nivel general el comportamiento de cada método en comparación con el método de Penman-Monteith FAO.



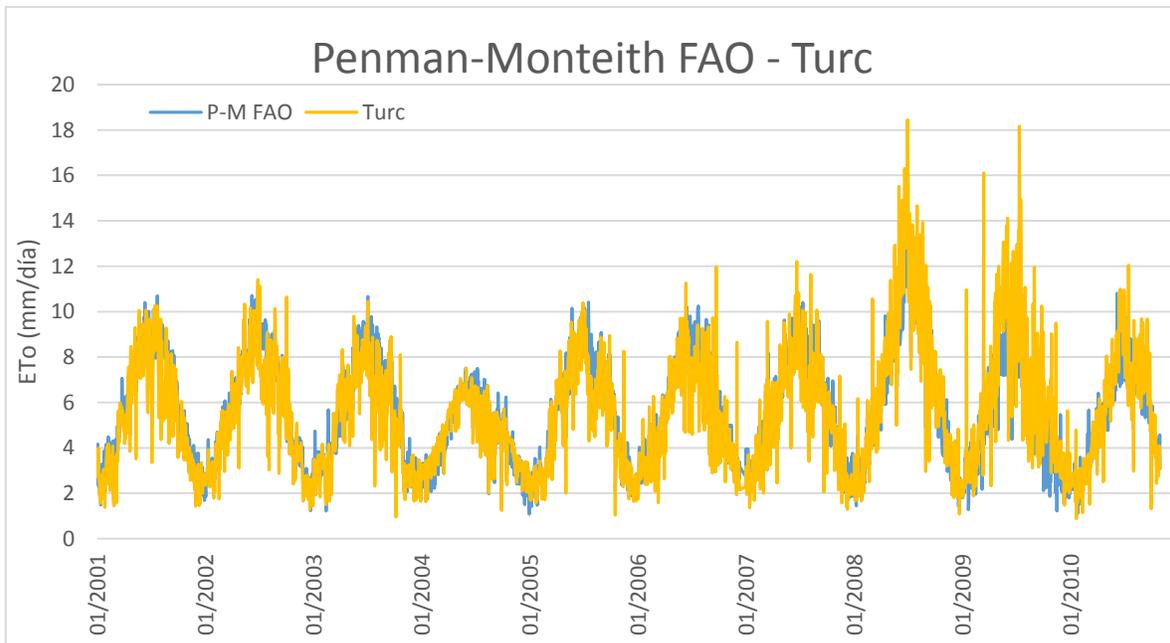
**Figura 5.15.** Comparación grafica de la ET<sub>0</sub> con Penman-Monteith FAO Vs Hargreaves, estación Mexicali



**Figura 5.16.** Comparación grafica de la ET<sub>0</sub> con Penman-Monteith FAO Vs Makkink, estación Mexicali

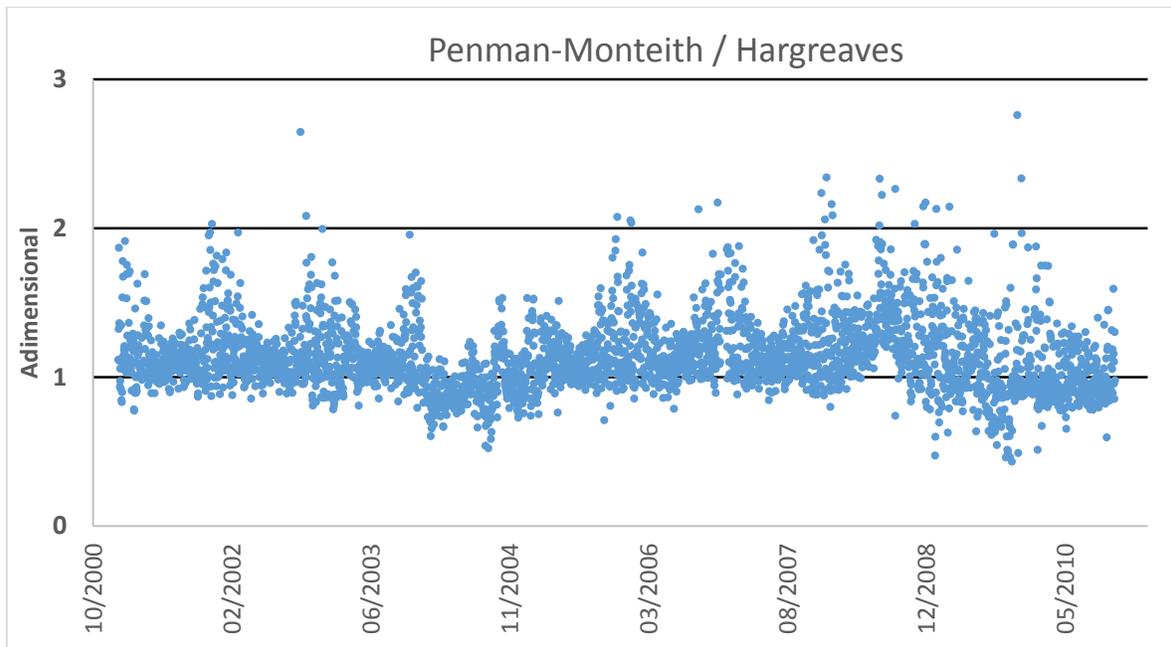


**Figura 5.17.** Comparación grafica de la ETo con Penman-Monteith FAO Vs Priestley-Taylor, estación Mexicali

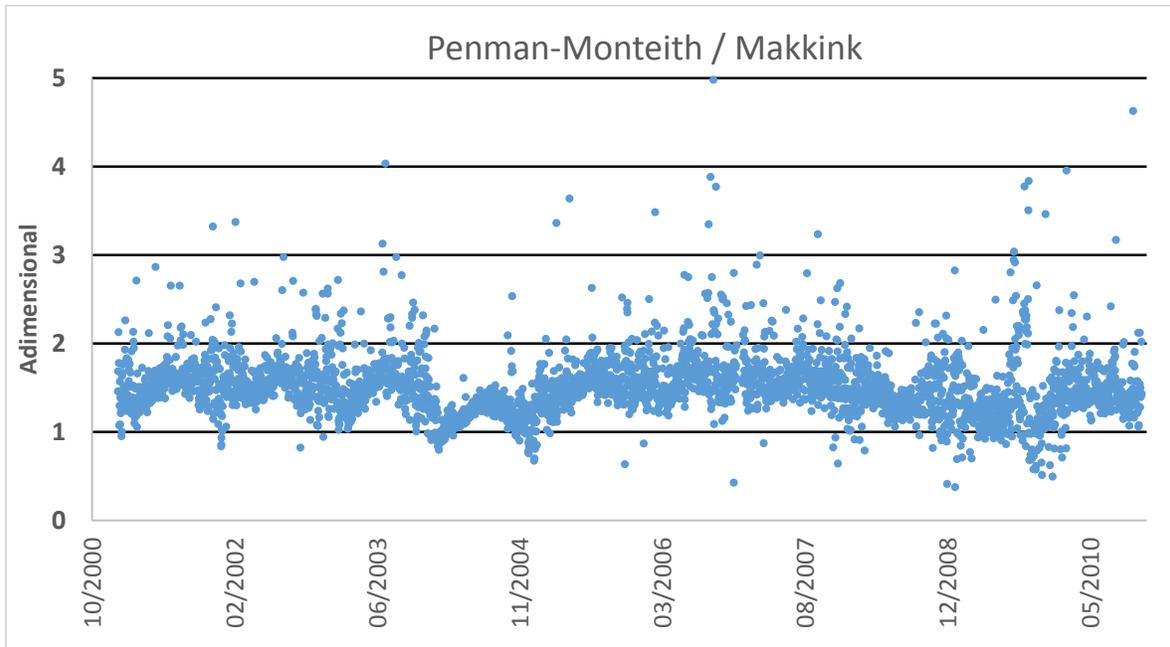


**Figura 5.18.** Comparación grafica de la ETo con Penman-Monteith FAO Vs Turc, estación Mexicali

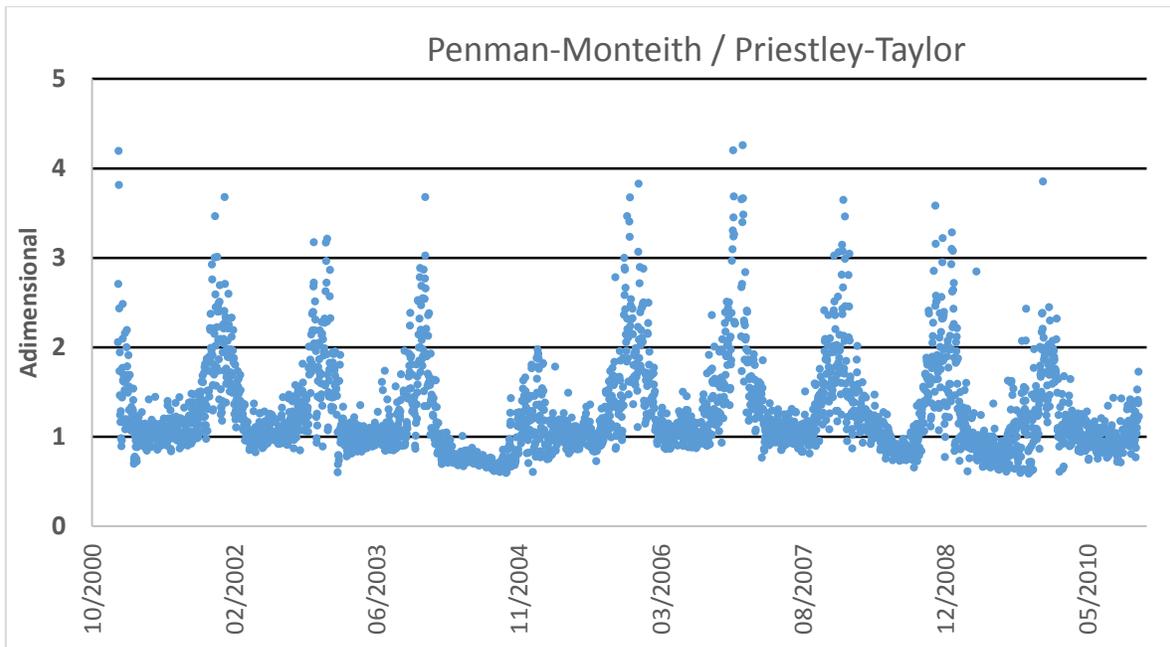
Se puede observar que el método de Makkink subestima el valor de ETo, comparado con el calculado con Penman-Monteith FAO. En las Figuras 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18 se presenta gráficamente el cociente entre el método de Penman-Monteith FAO con cada uno de los métodos para la estación Mexicali (P-M FAO/Hargreaves, Penman-Monteith FAO/Makkink, Penman-Monteith FAO/Priestley-Taylor y Penman-Monteith FAO/Turc).



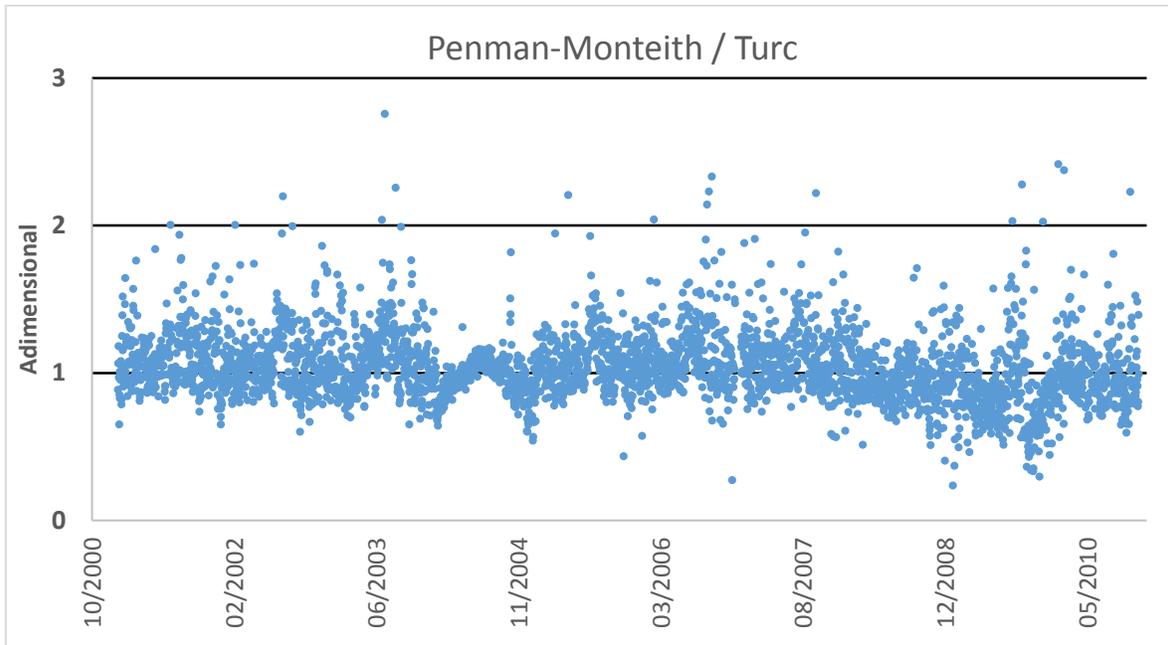
**Figura 5.19.** Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Hargreaves.



**Figura 5.20.** Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Makkink.



**Figura 5.21.** Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Priestley-Taylor.



**Figura 5.22.** Cociente entre el valor de ETo estimado con Penman-Monteith FAO y Turc.

### 5.2.3 Índices y errores de estimación

Se hace la comparación de la evapotranspiración diaria estimada con el método de Penman-Monteith FAO contra los valores diarios obtenidos con los métodos de Hargreaves, Makkink, Priestley-Taylor y Turc, para analizar los resultados obtenidos de los cálculos de índices y errores de estimación.

En los cuadros 5.8, 5.9 y 5.10 se presenta los valores de los índices y errores de RMSE, MAE,  $d$  y  $R^2$  que se obtuvieron al hacer la comparación de los diferentes métodos alternativos con el método de Penman-Monteith FAO para los periodos de 1, 15 y 30 días, para cada año y para el conjunto de años. En dichos cuadros se observa que para los tres periodos en los años 2004 y 2008, el método que obtuvo los índices y errores más óptimos fue el método de Turc, en comparación de los años 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2009 y 2010 que fue el método de Hargreaves. En las figuras 5.23 y 5.24 se puede observar el comportamiento de la humedad relativa y la radiación solar medias mensuales para ambas variables, donde se observó que en 2004 la humedad relativa es más elevada en comparación de los

demás años, además se puede observar que en 2008 la radiación fue más elevada en ese año en comparación con los demás años.

**Cuadro 5.8.** Índices y errores de estimación diarias de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Mexicali (2001-2010).

AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R2
2001	Hargreaves	0.875	0.687	0.968	0.934
	Makkink	2.370	2.074	0.745	0.908
	Priestley-T	1.087	0.864	0.956	0.903
	Turc	1.030	0.758	0.955	0.859
2002	Hargreaves	0.907	0.712	0.963	0.927
	Makkink	2.379	2.127	0.740	0.898
	Priestley-T	1.207	0.986	0.946	0.910
	Turc	1.094	0.814	0.945	0.817
2003	Hargreaves	0.842	0.673	0.966	0.926
	Makkink	2.319	2.011	0.733	0.840
	Priestley-T	1.134	0.882	0.949	0.877
	Turc	1.202	0.909	0.924	0.776
2004	Hargreaves	0.783	0.627	0.942	0.829
	Makkink	0.985	0.811	0.882	0.793
	Priestley-T	1.646	1.419	0.853	0.856
	Turc	0.540	0.425	0.965	0.870
2005	Hargreaves	0.914	0.710	0.962	0.922
	Makkink	2.289	2.002	0.752	0.892
	Priestley-T	1.143	0.891	0.950	0.867
	Turc	1.010	0.716	0.953	0.849
2006	Hargreaves	1.095	0.891	0.938	0.889
	Makkink	2.601	2.340	0.681	0.774
	Priestley-T	1.358	1.100	0.924	0.877
	Turc	1.248	0.893	0.912	0.740
2007	Hargreaves	1.076	0.755	0.947	0.902
	Makkink	2.440	2.200	0.733	0.869
	Priestley-T	1.329	1.100	0.936	0.889
	Turc	1.086	0.817	0.945	0.823
2008	Hargreaves	2.063	1.576	0.860	0.857
	Makkink	1.970	1.748	0.890	0.799
	Priestley-T	1.609	1.324	0.952	0.951
	Turc	1.394	1.001	0.957	0.951
2009	Hargreaves	1.326	1.028	0.907	0.820
	Makkink	1.685	1.263	0.859	0.674



AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R2
	Priestley-T	1.736	1.361	0.907	0.811
	Turc	2.122	1.567	0.846	0.667
2010	Hargreaves	0.875	0.689	0.964	0.881
	Makkink	1.916	1.693	0.778	0.846
	Priestley-T	0.886	0.693	0.961	0.878
	Turc	1.179	0.888	0.928	0.777

RMSE: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error; MAE: Error absoluto medio; d: Índice de Willmott; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación.

**Cuadro 5.9.** Índices y errores de estimación para un periodo de 15 días de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Mexicali (2001-2010).

AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R2
2001	Hargreaves	0.858	0.696	0.617	0.359
	Makkink	2.178	2.100	0.364	0.317
	Priestley-T	1.039	0.867	0.485	0.179
	Turc	0.928	0.759	0.624	0.347
2002	Hargreaves	0.882	0.715	0.635	0.341
	Makkink	2.212	2.143	0.341	0.291
	Priestley-T	1.136	0.982	0.475	0.217
	Turc	0.973	0.819	0.601	0.264
2003	Hargreaves	0.826	0.675	0.587	0.343
	Makkink	2.140	2.031	0.365	0.261
	Priestley-T	1.055	0.879	0.502	0.227
	Turc	1.090	0.919	0.562	0.302
2004	Hargreaves	0.735	0.633	0.650	0.462
	Makkink	0.889	0.819	0.634	0.622
	Priestley-T	1.508	1.433	0.417	0.420
	Turc	0.500	0.420	0.767	0.632
2005	Hargreaves	0.869	0.716	0.679	0.402
	Makkink	2.091	2.017	0.394	0.370
	Priestley-T	1.046	0.888	0.487	0.184
	Turc	0.890	0.723	0.665	0.396
2006	Hargreaves	1.067	0.891	0.601	0.387
	Makkink	2.427	2.340	0.334	0.357
	Priestley-T	1.255	1.100	0.524	0.290
	Turc	1.123	0.893	0.597	0.383
2007	Hargreaves	1.005	0.822	0.676	0.417
	Makkink	2.296	2.218	0.389	0.407



AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R2
	Priestley-T	1.259	1.097	0.523	0.242
	Turc	1.053	0.859	0.520	0.195
2008	Hargreaves	1.800	1.597	0.447	0.177
	Makkink	1.896	1.769	0.472	0.426
	Priestley-T	1.520	1.329	0.536	0.352
	Turc	1.276	1.014	0.619	0.430
2009	Hargreaves	1.280	1.039	0.613	0.340
	Makkink	1.574	1.275	0.555	0.340
	Priestley-T	1.624	1.367	0.524	0.304
	Turc	2.004	1.581	0.496	0.293
2010	Hargreaves	0.846	0.692	0.589	0.291
	Makkink	1.814	1.698	0.409	0.284
	Priestley-T	0.851	0.698	0.573	0.283
	Turc	1.068	0.889	0.555	0.233

RMSE: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error; MAE: Error absoluto medio; d: Índice de Willmott; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación.

**Cuadro 5.10.** Índices y errores de estimación para un periodo de 30 días de los diferentes métodos con relación al Método de Penman-Monteith FAO, estación Mexicali (2001-2010).

AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R2
2001	Hargreaves	0.867	0.696	0.714	0.414
	Makkink	2.186	2.100	0.405	0.391
	Priestley-T	1.055	0.867	0.560	0.233
	Turc	0.936	0.759	0.684	0.381
2002	Hargreaves	0.894	0.715	0.645	0.354
	Makkink	2.217	2.143	0.358	0.306
	Priestley-T	1.154	0.982	0.498	0.190
	Turc	0.989	0.819	0.638	0.278
2003	Hargreaves	0.833	0.675	0.660	0.386
	Makkink	2.145	2.031	0.407	0.308
	Priestley-T	1.070	0.879	0.585	0.239
	Turc	1.108	0.919	0.646	0.335
2004	Hargreaves	0.747	0.633	0.682	0.450
	Makkink	0.896	0.819	0.685	0.642
	Priestley-T	1.517	1.433	0.496	0.495
	Turc	0.516	0.420	0.815	0.656
2005	Hargreaves	0.891	0.716	0.621	0.523
	Makkink	2.105	2.017	0.428	0.438
	Priestley-T	1.066	0.888	0.539	0.176

AÑO	MÉTODO	RMSE	MAE	d	R <sup>2</sup>
2006	Turc	0.918	0.723	0.530	0.464
	Hargreaves	1.076	0.889	0.657	0.402
	Makkink	2.472	2.379	0.368	0.352
	Priestley-T	1.241	1.060	0.563	0.314
2007	Turc	1.107	0.896	0.657	0.391
	Hargreaves	1.013	0.822	0.725	0.433
	Makkink	2.304	2.218	0.415	0.401
	Priestley-T	1.275	1.097	0.569	0.278
2008	Turc	1.064	0.859	0.572	0.268
	Hargreaves	1.821	1.597	0.512	0.244
	Makkink	1.903	1.769	0.535	0.485
	Priestley-T	1.549	1.329	0.596	0.435
2009	Turc	1.295	1.014	0.697	0.519
	Hargreaves	1.290	1.039	0.682	0.366
	Makkink	1.602	1.275	0.585	0.284
	Priestley-T	1.641	1.367	0.587	0.303
2010	Turc	2.037	1.581	0.540	0.274
	Hargreaves	0.859	0.692	0.695	0.286
	Makkink	1.824	1.698	0.442	0.300
	Priestley-T	0.856	0.688	0.649	0.289
Turc	1.087	0.889	0.632	0.249	

RMSE: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error; MAE: Error absoluto medio; d: Índice de Willmott; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación.

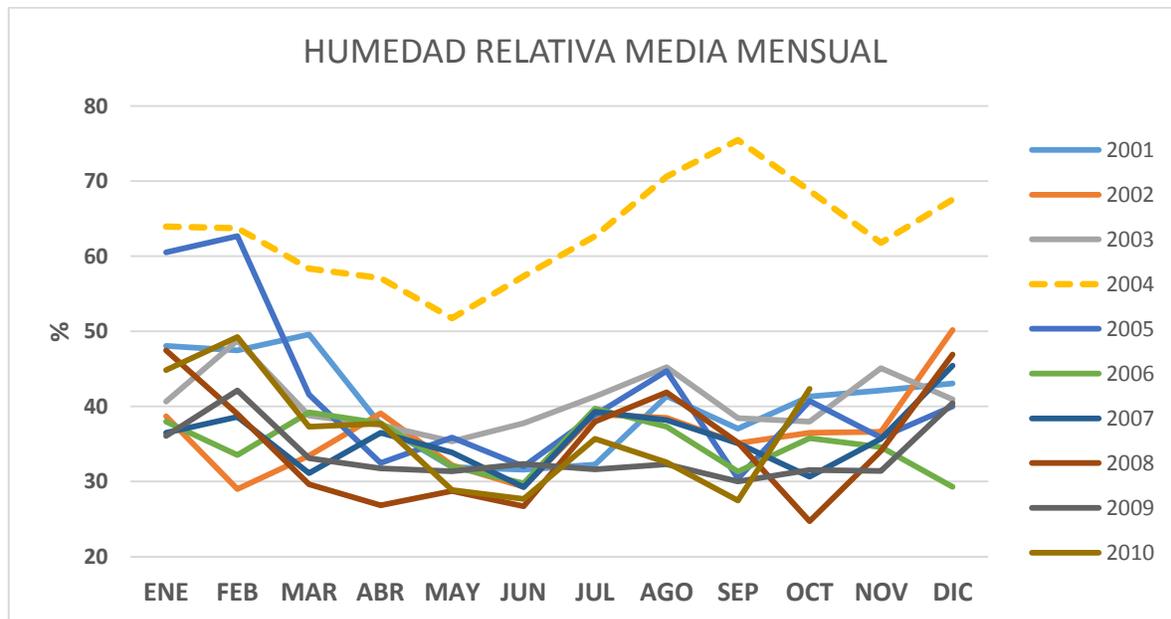
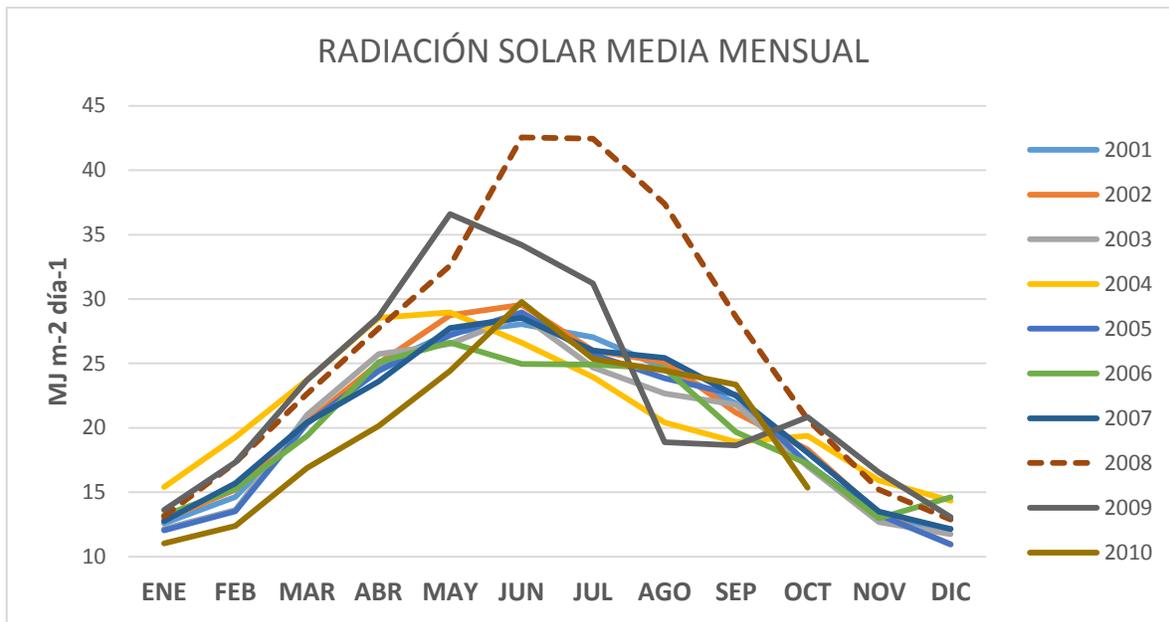


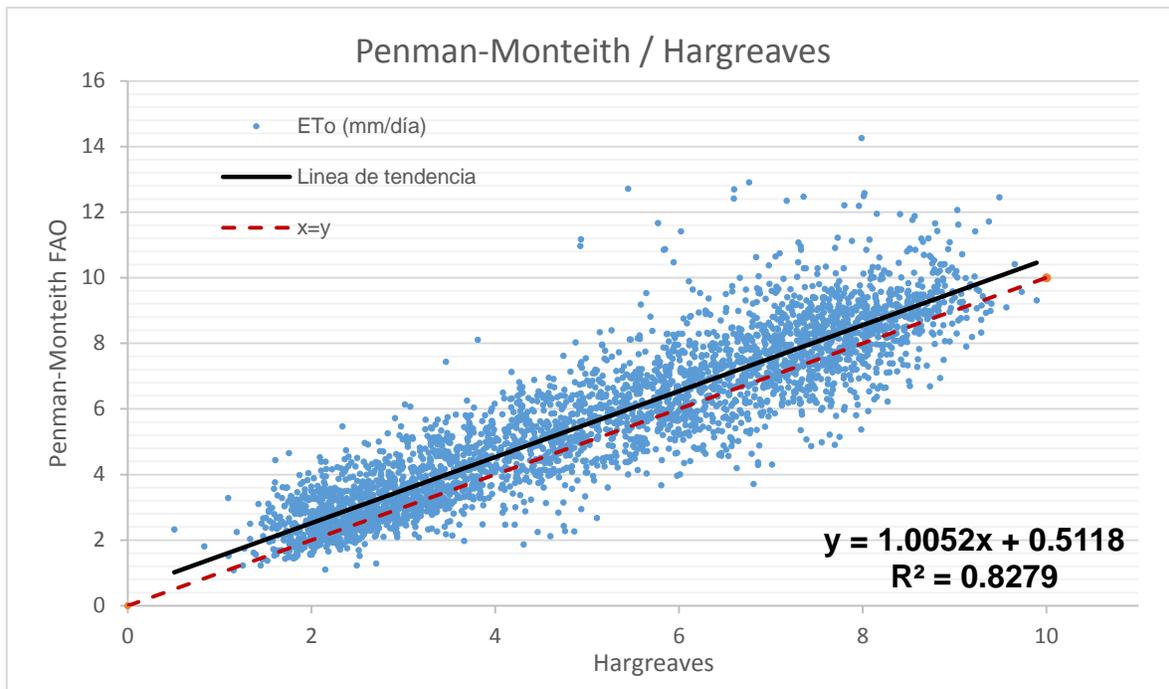
Figura 5.23. Comportamiento de la humedad relativa media mensual en la estación Mexicali.



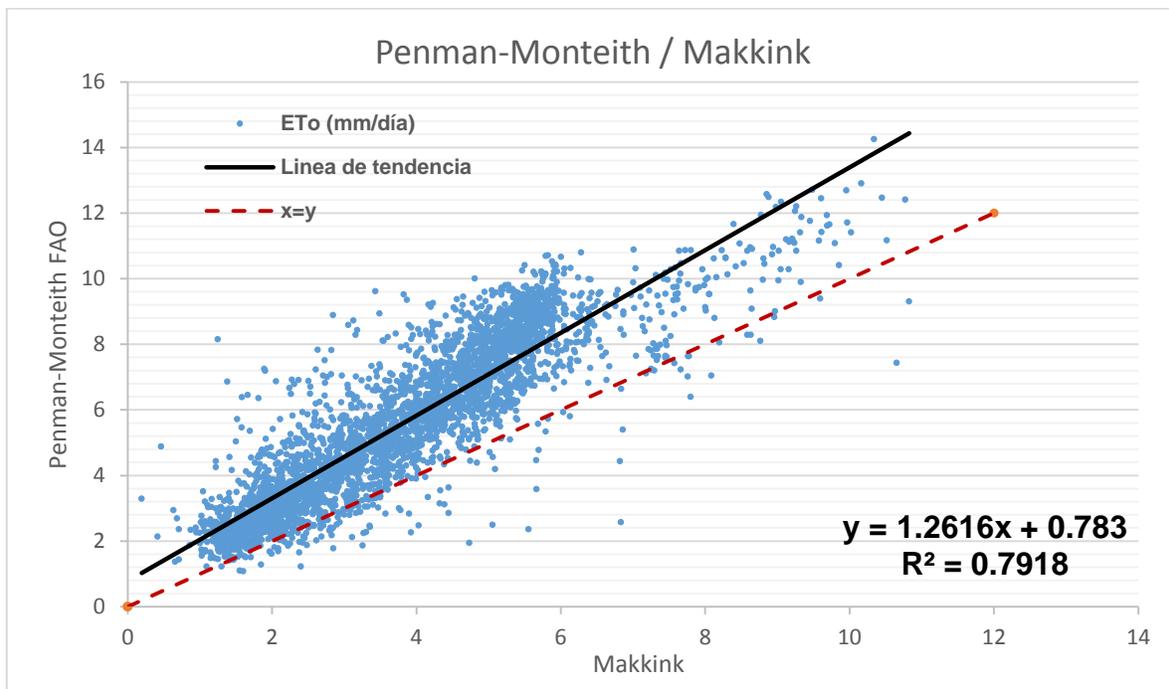
**Figura 5.24.** Comportamiento de la radiación solar media mensual en la estación Mexicali.

En las Figuras 5.25, 5.26, 5.27 y 5.28 se presentan gráficamente las ecuaciones de regresión lineal para cada uno de los métodos comparados con el método de Penman-Monteith FAO, además de presentar la línea  $x=y$  para poder compararla con la línea de tendencia calculada. A través de un análisis de regresión lineal se puede observar que el método de Makkink presenta una considerable subestimación de la evapotranspiración a partir de los 2 mm/día. Los métodos de Hargreaves y Turc presentan un mejor comportamiento. El método de Priestley-Taylor presenta subestimación sobrestimaciones a partir de los 5 mm/día.

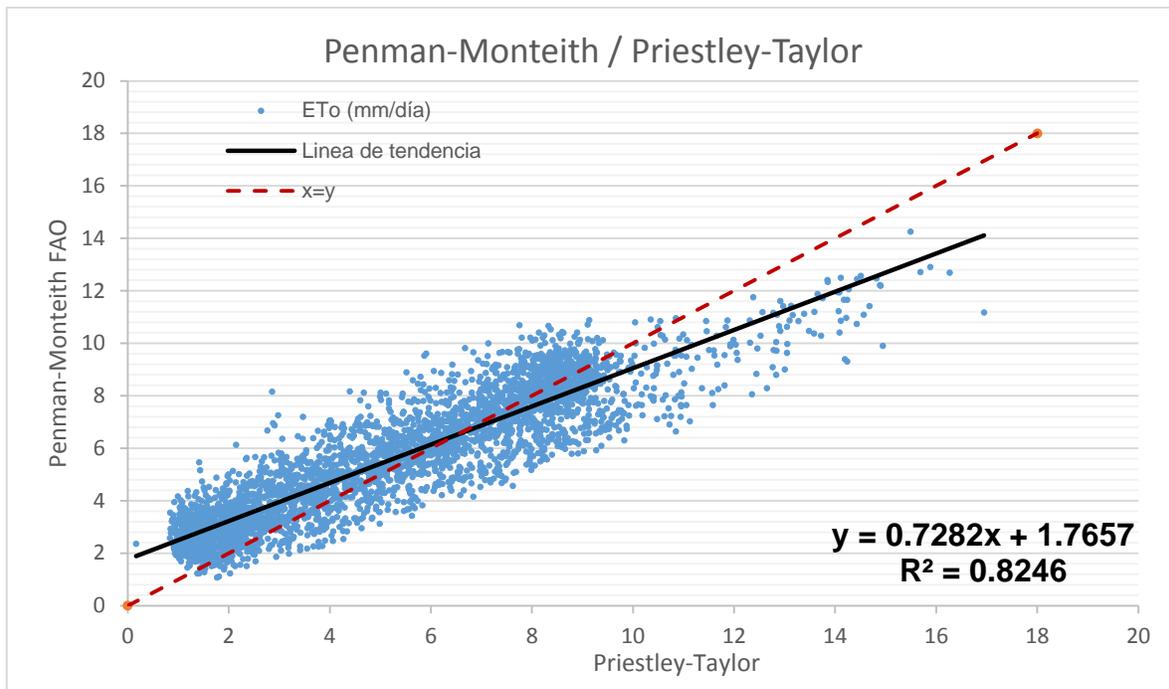
El coeficiente de determinación indica que el modelo que mejor ajusta sus datos a su línea de tendencia es el métodos de Hargreaves, además de que tiene el mejor ajuste a una correlación lineal entre los de evapotranspiración del método de Penman-Monteith FAO y los estimados con dicho método, por lo cual es un método para determinar le evapotranspiración en la Zona de Mexicali.



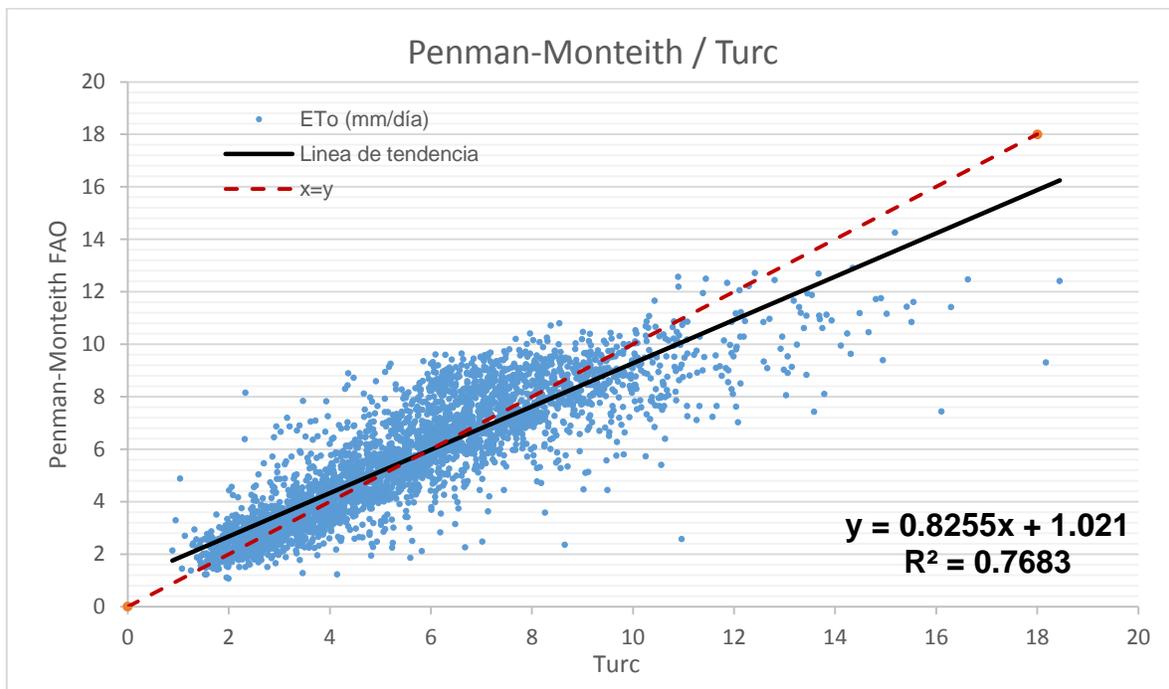
**Figura 5.25.** Regresión lineal Penman-Monteith Vs Hargreaves de Enero, 2001 a Octubre, 2010, estación Mexicali.



**Figura 5.26.** Regresión lineal Penman-Monteith Vs Makkink de Enero, 2001 a Octubre, 2010, estación Mexicali.



**Figura 5.27.** Regresión lineal Penman-Monteith Vs Priestley-Taylor de Enero, 2001 a Octubre, 2010, estación Mexicali.



**Figura 5.28.** Regresión lineal Penman-Monteith Vs Priestley-Taylor de Enero, 2001 a Octubre, 2010, estación Mexicali.



## **6 CONCLUSIONES**

Al comparar los 4 métodos Hargreaves, Makkink, Priestley-Taylor y Turc con los valores de evapotranspiración de referencia obtenida con el método de Penman-Monteith FAO 56, para el caso de la estación climática Campo el Taxtes, el método de Turc fue el que logro las mejores estimaciones. Sin embargo el método de Turc requiere información de radiación solar y que muy pocas veces se encuentra disponible. En el caso que no se tenga la información necesaria para utilizar dicha ecuación el método de Hargreaves es una alternativa secundaria que obtiene buenas estimaciones en este tipo de climas.

En la estación Mexicali, el método de Hargreaves fue el que tuvo las mejores estimaciones en comparación con el método de Penman-Monteith FAO. El método es muy comúnmente utilizado donde la disponibilidad de datos es limitada, ya que solo requiere medidas de temperatura máxima y mínima, con radiación extraterrestre, que puede ser calculada en función de la latitud y día juliano del año.



## **7 RECOMENDACIONES**

Se recomienda hacer un estudio más a fondo en los resultados que se obtuvieron con los diferentes métodos, realizando un análisis temporal que permita determinar en qué época del año los resultados son más diferentes y en que magnitud, para tener mayor claridad para el uso de los diferentes métodos.

Es recomendable realizar estudios posteriores incrementando el número de métodos tanto empíricos como de medición directa, que se han ido desarrollando actualmente, además de incrementar el número de estaciones ubicadas dentro de las zona de estudio, es con el fin de poder obtener un método con menor número de variables y de más fácil acceso.

Aplicar este trabajo de evaluación de métodos para las diferentes condiciones climáticas de México, esto con el fin de obtener una representación gráfica de áreas con métodos recomendados para la República Mexicana.



## 8 BIBLIOGRAFIA

- Agricultural Research Council. 2009. CRA. Clima.Evapotraspiration. (En línea). <<http://www.apesimulator.org/help/models/evapotranspiration/>>. Consultado el 15 de noviembre del 2013.
- Alexandris, S., Kerkides, P., 2003. New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration. *Agric. Water Manage.* 60, Pp. 157–180.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Estudio FAO, Riego y Drenaje N° 56.
- Allen, R.G., M. Smith, L.S. Pereira and A. Perrier. 1994. An Update for the Definition of Reference Evapotranspiration. *ICID Bulletin.* 43(2):1-34.
- Aparicio, M. F. J. 1992. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México, D. F.
- Cai, J.; Yu, L.; Tingwu, L. and Pereira, L. S. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO PenmanMonteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology.* Elsevier. 347: 169-180
- Cervantes, O. R., Arteaga, R. R., Vázquez, P. M. A., Ojeda, B. Waldo & Quevedo, N. A. 2013. Modelos Hargreaves, Priestley-Taylor y redes neuronales artificiales en la estimación de la Evapotranspiración de referencia. *Ingeniería: Investigación y Tecnología.* Volumen XIV (numero 2), Pp. 163-176. ISSN 1405-7743 FI-UNAM.
- Elías, C. F., Castellvi, S. F. 2001. *Agroemeteorología.* Mundi Prensa. 2ª edición. México.
- Fernández G., F. (1996). *Manual de Climatología Aplicada.* Clima, Medio Ambiente y Planificación. Editorial Síntesis, Madrid, España.
- González C. G., Chávez R. E., González B. J. L., Dzul L. A., Sánchez C. I., Potisek T. M. C. (2012) Comparación de métodos para determinar la



evapotranspiración y oportunidad de riego en nogal pecanero. Terra Latinoamericana. Disponible en:

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57324651004> ISSN 1870-9982

- Hargreaves GH, Allen RG (2003) History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. J Irrig Drain Eng 129(1):53–63
- Jensen, M. E.; Burman, R. D. & Allen, R. G. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. Manuals and Reports on Engineering Practice, N° 70. New York: Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers, ASCE,
- Landon, F. R. 2004. An evaluation of reference evapotranspiration models in Louisiana. Tesis. Program of Natural Sciences. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. Louisiana, U.S.A.
- Lal, R. & Shukla, M. K. 2004. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker, New York.
- Landeras, G., Ortiz-Barredo, A., & Lopez, J. (2008). Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). Agricultural Water Management.
- Lu, J., Sun, G., McNutly, S. G. & Amatya D. M. 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. Journal of the American Water Resources Association. Paper No. 03175.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L. & Verma, S. B. 1983. Microclimate – The Biological Environment. Second Edition. John Wiley & Sons. New York.
- SAGARPA, 2013. Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario, Pesquero y Alimentario 2013-2018.
- Sánchez, M. M. I. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. Revista de Geografía de Norte Grande, Santiago de Chile, No. 28.



- Sánchez M. M. (2002). Modelos y aproximaciones para la estimación de la evapotranspiración con información satelital. *Revista de Geografía de Norte Grande*, Santiago de Chile, No. 29.
- Sánchez, S. R. F. J. (2010). Concepto de Evapotranspiración. Evapotranspiración. Dpto. Geología, Universidad Salamanca. Salamanca, España. Pp. 1-8.
- Sánchez, T. J. M. (2008). Estimación mediante teledetección de la evapotranspiración real a partir de un modelo desacoplado de dos fuentes. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia. Facultad de Física. Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Valencia, España.
- Soto, M. C. 2003. La agricultura comercial de los distritos de riego en México y su impacto en el desarrollo agrícola. *Investigaciones Geográficas (Mx)*. Instituto de Geografía. México. No. 50. ISSN (versión impresa): 0188-4611. Pp. 173-195.
- Tabari, H. 2009. Evaluación of Reference Crop Evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*. Vol. 24, Issue 10, Pp. 2311-2337. DOI 10.1007/s11269-009-9553-8.
- Trezza, R. 2008. Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar? *Bioagro*. Vol. 20, No. 2. Pp. 89-95.
- Vázquez, M. R., Ventura, R. E., Acosta, G. J. A. 2011. Habilidad de estimación de los métodos de evapotranspiración para una zona semiárida del centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 2. No. 3. Pp. 399-415.
- Villaman, P. R., Tijerina, Ch. L., Quevedo, N. A., Crespo, P. G. 1999. Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. Tesis. Programa de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México.



- Xu, C.-Y. & Singh V. P. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management*. Vol. 16. Kluwer Academic Publishers. Pp. 197-219.
- Yoder, R. E., Odhiambo, L.O., Wrigth, W. C. 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. *American society of Agricultural Engineers*. Vol. 21. No. 2. ISSN 0883-8542. 197-202.



## 9 ANEXOS

### A.1. Cálculo de evapotranspiración con el método de Penman-Monteith FAO 56 para la estación meteorológica Campo el Taxtes con fecha 26 de enero del 2012.

a) Presión atmosférica

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26}$$

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065 * 19}{293} \right)^{5.26}$$

$$P = 101.075 \text{ kPa}$$

b) Constante psicométrica

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3} P$$

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} * 101.075$$

$$\gamma = 0.06721 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$$

c) Temperatura media del aire

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

$$T_{media} = \frac{27.90 + 7.50}{2}$$

$$T_{media} = 17.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

d) Presión media de vapor a saturación ( $e_s$ )



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

$$e^\circ(T_{max}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 * T_{max}}{T_{max} + 237.3}\right)$$

$$e^\circ(T_{max}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 * 27.90}{27.90 + 237.3}\right)$$

$$e^\circ(T_{max}) = \mathbf{3.7579 \text{ kPa}}$$

$$e^\circ(T_{min}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 * T_{min}}{T_{min} + 237.3}\right)$$

$$e^\circ(T_{min}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 * 7.50}{7.50 + 237.3}\right)$$

$$e^\circ(T_{min}) = \mathbf{1.0367 \text{ kPa}}$$

$$e_s = \frac{3.7579 + 1.0367}{2}$$

$$e_s = \mathbf{2.3973 \text{ kPa}}$$

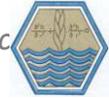
e) Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ )

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 * T_{media}}{T_{media} + 273.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 * 17.7}{17.7 + 273.3}\right) \right]}{(17.7 + 237.3)^2}$$

$$\Delta = \mathbf{0.1276 \text{ kPa}^\circ\text{C}^{-1}}$$

f) Presión real de vapor ( $e_a$ ) derivada de datos de humedad relativa.



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

$$e_a = \frac{1.0367 * \frac{95}{100} + 3.7579 * \frac{23}{100}}{2}$$

$$e_a = \mathbf{0.9246 \text{ kPa}}$$

g) Distancia relativa inversa Tierra-Sol ( $d_r$ )

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * 26\right)$$

$$d_r = \mathbf{1.0297}$$

h) Declinación solar ( $\delta$ )

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$$

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} * 26 - 1.39\right)$$

$$\delta = \mathbf{-0.3308 \text{ rad}}$$

i) Angulo de radiación a la hora de la puesta de sol ( $\omega_s$ )

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(0.4516) \tan(-0.3308)]$$

$$\omega_s = \mathbf{1.0140 \text{ rad}}$$

j) Radiación extraterrestre para periodos diarios ( $R_a$ )



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

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * 0.082 * 1.0297 *$$

$$[1.0140 * \sin(0.4516) \sin(-0.3308) + \cos(0.4516) \cos(-0.3308) \sin(1.0140)]$$

$$\mathbf{R_a = 24.7709 MJ m^{-1} dia^{-1}}$$

k) Radiación solar en un día despejado ( $R_{so}$ )

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a$$

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} * 19) * 24.7709$$

$$\mathbf{R_{so} = 18.5875 MJ m^{-1} dia^{-1}}$$

l) Radiación neta solar o de onda corta ( $R_{ns}$ )

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

$$R_{ns} = (1 - 0.23) * 18.65$$

$$\mathbf{R_{ns} = 14.3605 MJ m^{-1} dia^{-1}}$$

m) Radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ )

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

$$T_{max} = 27.90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{max,K} = 27.90 + 273.16 = 301.06 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{min} = 7.50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{min,K} = 7.50 + 273.16 = 280.66 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$R_{nl} = 4.903 * 10^{-9} * \left[ \frac{301.06^4 + 280.66^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{0.9246}) *$$



$$\left(1.35 \frac{18.65}{18.5875} - 0.35\right)$$

$$R_{nl} = 7.2767 \text{ MJ m}^{-1} \text{ dia}^{-1}$$

n) Radiación neta ( $R_n$ )

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_n = 14.3605 - 7.2767$$

$$R_n = 7.0837 \text{ MJ m}^{-1} \text{ dia}^{-1}$$

o) Flujo de calor del suelo ( $G$ )

$$G_{day} \approx 0$$

Una vez calculado todos los factores:

$$P = 101.075 \text{ kPa}$$

$$\gamma = 0.06721 \text{ kPa}^\circ\text{C}^{-1}$$

$$T_{media} = 17.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$e_s = 2.3973 \text{ kPa}$$

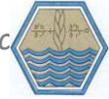
$$\Delta = 0.1276 \text{ kPa}^\circ\text{C}^{-1}$$

$$e_a = 0.9246 \text{ kPa}$$

$$R_n = 7.0837 \text{ MJ m}^{-1} \text{ dia}^{-1}$$

$$G_{day} \approx 0$$

$$u_2 = 1.18 \text{ m/s}$$



$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)}$$

$$= \frac{0.408 * 0.1276 (7.0837 - 0) + 0.06721 * \frac{900}{17.7 + 273} * 1.18 * (2.3973 - 0.9246)}{0.12276 + 0.06721 * (1 + 0.34 * 1.18)}$$

$$ET_0 = 3.2867 \text{ mm/día}$$



## A.2. Cálculo de evapotranspiración con el método de Hargreaves para la estación meteorológica Campo el Taxtes con fecha 26 de enero del 2012.

$$ET_0 = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}R_a$$

a) Distancia relativa inversa Tierra-Sol ( $d_r$ )

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right)$$

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * 26\right)$$

$$\mathbf{d_r = 1.0297}$$

b) Declinación solar ( $\delta$ )

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right)$$

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} * 26 - 1.39\right)$$

$$\mathbf{\delta = -0.3308 \text{ rad}}$$

c) Angulo de radiación a la hora de la puesta de sol ( $\omega_s$ )

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(0.4516) \tan(-0.3308)]$$

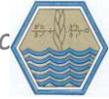
$$\mathbf{\omega_s = 1.0140 \text{ rad}}$$

d) Radiación extraterrestre para periodos diarios ( $R_a$ )

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

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * 0.082 * 1.0297 *$$

$$[1.0140 * \sin(0.4516) \sin(-0.3308) + \cos(0.4516) \cos(-0.3308) \sin(1.0140)]$$



$$R_a = 24.7709 \text{ MJ m}^{-1} \text{ dia}^{-1}$$

$$R_a = 24.7709 \text{ MJ m}^{-1} \text{ dia}^{-1} * 0.408$$

$$R_a = \mathbf{10.1065 \text{ mm/día}}$$

e) Temperatura media del aire

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

$$T_{media} = \frac{27.90 + 7.50}{2}$$

$$T_{media} = \mathbf{17.7 \text{ °C}}$$

Realizando todos los cálculos para determinar evapotranspiración con el método de Hargreaves.

$$T_{max} = 27.90 \text{ °C}$$

$$T_{min} = 7.50 \text{ °C}$$

$$ET_0 = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$$

$$ET_0 = 0.0023(17.7 + 17.8)(27.90 - 7.50)^{0.5} 10.1065$$

$$ET_0 = \mathbf{3.8565 \text{ mm/día}}$$



### A.3. Cálculo de evapotranspiración con el método de Priestley-Taylor para la estación meteorológica Campo el Taxtes con fecha 26 de enero del 2012.

a) Constante psicométrica

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3} P$$

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} * 101.075$$

$$\gamma = \mathbf{0.06721 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}}$$

b) Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ )

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27 * T_{media}}{T_{media} + 273.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27 * 17.7}{17.7 + 273.3} \right) \right]}{(17.7 + 237.3)^2}$$

$$\Delta = \mathbf{0.1276 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}}$$

c) Distancia relativa inversa Tierra-Sol ( $d_r$ )

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos \left( \frac{2\pi}{365} J \right)$$

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos \left( \frac{2\pi}{365} * 26 \right)$$

$$d_r = \mathbf{1.0297}$$

d) Declinación solar ( $\delta$ )

$$\delta = 0.409 * \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right)$$

$$\delta = 0.409 * \sin \left( \frac{2\pi}{365} * 26 - 1.39 \right)$$

$$\delta = \mathbf{-0.3308 \text{ rad}}$$



e) Angulo de radiación a la hora de la puesta de sol ( $\omega_s$ )

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(0.4516) \tan(-0.3308)]$$

$$\omega_s = \mathbf{1.0140 \text{ rad}}$$

f) Radiación extraterrestre para periodos diarios ( $R_a$ )

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

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * 0.082 * 1.0297 *$$

$$[1.0140 * \sin(0.4516) \sin(-0.3308) + \cos(0.4516) \cos(-0.3308) \sin(1.0140)]$$

$$\mathbf{R_a = 24.7709 \text{ MJ } m^{-1} \text{ dia}^{-1}}$$

g) Radiación solar en un día despejado ( $R_{so}$ )

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a$$

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} * 19) * 24.7709$$

$$\mathbf{R_{so} = 18.5875 \text{ MJ } m^{-1} \text{ dia}^{-1}}$$

h) Radiación neta solar o de onda corta ( $R_{ns}$ )

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

$$R_{ns} = (1 - 0.23) * 18.65$$

$$\mathbf{R_{ns} = 14.3605 \text{ MJ } m^{-1} \text{ dia}^{-1}}$$



i) Radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ )

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

$$T_{max} = 27.90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{max,K} = 27.90 + 273.16 = 301.06 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{min} = 7.50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{min,K} = 7.50 + 273.16 = 280.66 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$R_{nl} = 4.903 * 10^{-9} * \left[ \frac{301.06^4 + 280.66^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{0.9246}) *$$

$$\left( 1.35 \frac{18.65}{18.5875} - 0.35 \right)$$

$$\mathbf{R_{nl} = 7.2767 \text{ MJ m}^{-1}\text{dia}^{-1}}$$

j) Radiación neta ( $R_n$ )

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_n = 14.3605 - 7.2767$$

$$\mathbf{R_n = 7.0837 \text{ MJ m}^{-1}\text{dia}^{-1}}$$

$$R_n = 7.0837 \text{ MJ m}^{-1}\text{dia}^{-1} * 0.408$$

$$\mathbf{R_n = 2.8901 \text{ mm/día}}$$

k) Flujo de calor del suelo ( $G$ )

$$\mathbf{G_{day} \approx 0}$$



Sustituyendo todos los valores en la ecuación del método y con una adimensional de Priestley-Taylor, queda:

$$ET_o = \alpha \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G)$$

$$ET_o = 1.26 * \left( \frac{0.1276}{0.1276 + 0.06721} \right) (2.8901 - 0)$$

$$ET_o = 2.3854 \text{ mm / día}$$



#### A.4. Cálculo de evapotranspiración con el método de Makkink para la estación meteorológica Campo el Taxtes con fecha 26 de enero del 2012.

a) Constante psicométrica

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3} P$$

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} * 101.075$$

$$\gamma = \mathbf{0.06721 \text{ kPa}^\circ\text{C}^{-1}}$$

b) Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ )

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27 * T_{media}}{T_{media} + 273.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27 * 17.7}{17.7 + 273.3} \right) \right]}{(17.7 + 237.3)^2}$$

$$\Delta = \mathbf{0.1276 \text{ kPa}^\circ\text{C}^{-1}}$$

Haciendo un resumen de datos, se tiene:

$$\gamma = 0.06721 \text{ kPa}^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\Delta = 0.1276 \text{ kPa}^\circ\text{C}^{-1}$$

$$R_s = 18.65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$$

$$\lambda = 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$$

Sustituyendo valores la ecuación se puede expresar como:

$$ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12$$

$$ET_o = 0.61 \frac{0.1276}{0.1276 + 0.06721} \frac{18.65}{2.45} - 0.12$$

$$\mathbf{ET_o = 2.9217 \text{ mm/día}}$$





### A.5. Cálculo de evapotranspiración con el método de Turc para la estación meteorológica Campo el Taxtes con fecha 26 de enero del 2012.

El método de Turc está basado solo en la temperatura media y en la radiación solar. Haciendo un resumen de datos se tiene:

- a) Temperatura media del aire

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

$$T_{media} = \frac{27.90 + 7.50}{2}$$

$$T_{media} = 17.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- b) Radiación solar

$$R_s = 18.65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$$

Sustituyendo valores en la ecuación, queda:

$$ET_p = 0.01333 \left( \frac{T}{T + 15} \right) (23.9001R_s + 50)$$

$$ET_p = 0.01333 \left( \frac{17.7}{17.7 + 15} \right) (23.9001 * 18.65 + 50)$$

$$ET_p = 3.5769 \text{ mm/día}$$