

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UNA HUERTA DE MANZANO (*Malus domestica*) POR EL MÉTODO FAO-PENMAN-MONTEITH

**POR:
Elder Osvaldo Díaz Leyva**

**TESIS
Presentada Como Requisito Parcial
Para Obtener el Título de:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Junio de 2013**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UNA HUERTA DE MANZANO (*Malus domestica*) POR EL MÉTODO FAO-PENMAN-MONTEITH

**POR:
Elder Osvaldo Díaz Leyva**

TESIS

**Que somete a consideración del H. Jurado Examinador
como requisito parcial para obtener el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

APROBADA

El presidente del jurado

**Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor principal**

**Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez
Asesor**

**MC. Gregorio Briones Sánchez
Asesor
Universidad Agraria
"ANTONIO NARRO"**

**M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez
Coordinador de la División de Ingeniería**



**Coordinación de
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Junio de 2013**

AGRADECIMIENTOS

*Agradezco infinitamente a **mís padres** porque son ellos quienes han dedicado su vida a la construcción de este sueño, el sacrificio que ellos han hecho solo se puede entender por el gran amor que me tienen. Hoy me es muy grato decirles lo hemos logrado, muchas gracias papas.*

*A mi **Alma Mater** por brindarme cobijo y refugio cuando más lo necesitaba, por darme la oportunidad de formarme como un profesionalista y como un mejor ser humano.*

*A don **Antonio Narro** por heredarme la oportunidad de formarme profesionalmente en esta su casa.*

*Le doy las gracias al Instituto Nacional de investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (**INIFAP**) por el apoyo en la investigación.*

A todo el personal docente que participo en mi formación como ingeniero agrónomo en irrigación.

A mis Asesores y amigos.

***Dr. Alejandro Zermeño Gonzales** gracias por el tiempo que me dedico, por la asesoría en este trabajo, por permitirme colaborar en sus proyectos, y sobre todo por despertar en mí el interés de seguir estudiando.*

***Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez** por darme la oportunidad de trabajar a lado suyo en el desarrollo de este trabajo, por compartir su conocimiento con mígo y el apoyo en todo momento.*

***Mc. Gregorio Briones Sánchez** por su colaboración en este proyecto y a sus enseñanzas como docente.*

A los Ingenieros Agrónomos en Irrigación Generación CXIV

A ustedes niñas Giada, Bety, Alicia, Lucí, Juanita, Sandrita, gracias por todo su cariño.

Agradezco a toda la banda, por los buenos momentos gracias a tí, Rolfi, Napo, Carlos V, Pancho, Hugo, Beto, J. Pelón, E. Tigre, Carlitos J, Ever, Lalo, David primo, Montero, Torreón, J. Carlos, Cazales, Arturito y Canche etc.

Por supuesto a mis amigos que me acompañaron durante estos 5 años, gracias a ustedes compa lacho, lampillo, erwin, pepe, hapy, el Dc. Ochoa, Mc. Adan, usias, charly, nocho, kenan, bibis, maye, Mc.gil, Mc. Jorge o.y a todos los de la famosa vecindad.

DEDICATORIAS

*Para ustedes Sr: **Antonio C. Díaz Cota** mi padre y Sra. **Josefina Leyva Mérida** mi madre, porque son los responsables de este gran logro, porque con su trabajo, dedicación, amor, comprensión formaron en mí el ser humano que soy.*

*Para ustedes **Carlos Eduardo Díaz Leyva** y **Alma Yareli Díaz Leyva** a ustedes hermanitos por ser mi motivación y fuente de inspiración, por enseñarme a apreciar lo maravillosa que es la vida.*

*A las familia **Díaz Cota** y **Leyva Mérida**, por abrirme su corazón y brindarme todo su apoyo incondicionalmente.*

*Para usted tío **Fredy Adolfo Díaz Cota** por apoyarme en el momento justo que lo necesite.*

*A mis abuelos Sr. **Julio Díaz Hernández**, Sra. **Transita Asunción Cota García** (+), Sr. **Rito Leyva Alba** (+) y Sra. **Mercedes Evelia Mérida Montejo**. Para ustedes abuelitos porque sé que siempre confiaron en mí y sé que hoy se sienten felices por este éxito.*

En general a toda mi familia sin distinguir apellidos, les dedico y comparto con ustedes mi éxito, sé que soy el primero de muchos y la brecha está abierta para los que vienen detrás de mí.

*A usted mi profesor y gran amigo **Vicente Lara Robles** porque a su lado aprendí muchas cosas de la vida, gracias por su amistad.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIAS	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE CUADROS	III
RESUMEN	III
I. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	3
HIPÓTESIS.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 IMPORTANCIA DEL MANZANO EN MÉXICO, ZONAS DE ESTABLECIMIENTO Y SUPERFICIES ESTABLECIDAS.....	4
2.2 MÉTODOS DIRECTOS PARA ESTIMAR LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVOS.	7
2.3 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA.	8
2.3.1 Método Blaney-Criddle:.....	8
2.3.2 Modelo de Hargreaves & Samani.....	8
2.3.3 Método de Turc	10

2.3.4 Método de Jensen-Haise	10
2.3.5 Método de Holdridge	11
2.3.6 Método FAO Penman Monteith	12
2.4 DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA POR LOS CULTIVOS A PARTIR DE LA ET DE REFERENCIA.	15
2.5 ESTUDIOS PREVIOS DEL USO DEL MÉTODO FAO PENMAN-MONTEITH PARA DETERMINAR EL CONSUMO DE AGUA POR DIFERENTES TIPOS DE CULTIVOS.	17
2.6 ESTUDIOS PREVIOS DEL USO DEL MÉTODO FAO PENMAN PARA DETERMINAR EL CONSUMO DE AGUA POR HUERTAS DE MANZANO U OTRO TIPO DE HUERTAS.	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1 LUGAR DEL SITIO DEL ESTUDIO.....	20
3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA HUERTA DE MANZANO	20
3.3 SISTEMA DE RIEGO UTILIZADO	21
3.4 FRECUENCIA DE RIEGOS Y LÁMINAS APLICADAS	22
3.5 UBICACIÓN, CARACTERÍSTICAS E INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LA ESTACIÓN AUTOMATIZADA DE JAME.	22
3.6 VARIABLES CLIMÁTICAS MEDIDAS	22
3.7 SENSORES INSTALADOS EN LA ESTACIÓN METEOROLOGÍA	23
3.8 DESCRIPCIÓN DEL MODELO FAO PENMANMONTEITH PARA DETERMINAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA, Y DATOS REQUERIDOS POR EL MODELO.....	24
3.9 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA OBTENER EL CONSUMO DE AGUA DIARIO DE LOS ÁRBOLES DE LA HUERTA A PARTIR DE LA ET DE REFERENCIA	25
IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27

4.1 ÍNDICE DE TRANSMISIVIDAD DE LA MALLA.....	27
4.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MENSUAL EN LA HUERTA SIN EFECTO DE MALLA	27
4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MENSUAL EN LA HUERTA CON EFECTO DE MALLA	28
4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MENSUAL EN LA HUERTA CON EFECTO DE MALLA Y FACTOR DE COBERTURA.	30
4.5 TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN ACTUAL DE LOS ÁRBOLES DE LA HUERTA.	31
4.6 RELACIÓN ENTRE LA LÁMINA DE AGUA EVAPOTRANSPIRADA, LA LÁMINA DE AGUA APLICADA Y LÁMINA DE AGUA POR LLUVIA.	32
V. CONCLUSIONES	34
VI. BIBLIOGRAFÍA	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS COMPONENTES DE LA
ECUACIÓN FAO PENMAN MONTEITH.....14

Figura 2. MARCO DE PLANTACIÓN DE LA HUERTA DE LA HUERTA DE
MANZANO EN JAME, MUNICIPIO DE ARTEAGA,
COAHUILA.....21

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. PRODUCCIÓN DE MANZANO EN MÉXICO, VOLUMEN DE PRODUCCIÓN, SUPERFICIES SEMBRADAS, SINIESTRADAS Y COSECHADAS POR ESTADO.....	5
Cuadro 2. PRODUCCIÓN DE MANZANO EN MÉXICO, VOLUMEN DE PRODUCCIÓN, SUPERFICIES SEMBRADAS, SINIESTRADAS Y COSECHADAS POR ESTADO. BAJO CONDICIONES DE RIEGO.....	6
Cuadro 3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MENSUAL PARA EL AÑO 2012 SIN EFECTO DE MALLA EN LA HUERTA DE MANZANO EN EL EJIDO JAME, MUNICIPIO DE ARTEAGA, COAHUILA.....	28
Cuadro 4. TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MENSUAL EN EL AÑO 2012, BAJO EFECTO DE LA MALLA ANTIGRANIZO EN LA HUERTA DE MANZANO EN EL EJIDO JAME, MUNICIPIO DE ARTEAGA, COAHUILA.....	29
Cuadro 5: TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MENSUAL EN EL 2012 BAJO EFECTO DE MALLA Y FACTOR DE COBERTURA DE LA HUERTA DE MANZANO DEL EJIDO JAME, MUNICIPIO DE ARTEAGA, COAHUILA.....	30

Cuadro 6. TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN ACTUAL MENSUAL EN EL 2012
BAJO EFECTO DE MALLA DE LA HUERTA DE MANZANO DEL EJIDO
JAME, MUNICIPIO DE ARTEAGA, COAHUILA.....31

Cuadro 7: RELACIÓN ENTRE LAMINAS DE AGUA APLICADAS POR RIEGO Y
LLUVIA, Y LAS LÁMINAS EVAPOTRANSPIRADAS MENSUALMENTE
DURANTE EL CICLO PRODUCTIVO DE LA HUERTA DURANTE EL AÑO
2012 EN JAME, MUNICIPIO DE ARTEAGA, COAHUILA.....33

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UNA HUERTA DE MANZANO (*Malus domestica*) POR EL MÉTODO FAO-PENMAN-MONTEITH

Elder Osvaldo Díaz Leyva

RESUMEN

El estudio se realizó en una huerta de manzano (*Malus domestica*) de la variedad Golden Vigas en el ejido Jame, municipio de Arteaga, Coahuila, durante el periodo productivo de la huerta que comprende del 17 de marzo al 30 de septiembre. El objetivo fue determinar la tasa de evapotranspiración máxima diaria del manzano mediante los valores diarios de la evapotranspiración de referencia calculada con el modelo FAO Penman Monteith y un coeficiente de cultivo K_c previamente calculado para la huerta donde se realizó este estudio. También se evaluó el efecto de la malla antigranizo en la transmisividad de la radiación solar y su efecto en la tasa diaria de evapotranspiración de referencia. Se encontró que la tasa de evapotranspiración fue 15.28% menor por efecto de la malla antigranizo. La suma total de la evapotranspiración máxima de marzo a septiembre bajo condiciones de malla fue 791.93mm, mientras que la suma de la lluvia más el riego fue equivalente a una lámina de 792.05 mm. Esto represento solo un excedente de agua de 0.12 mm, indicando un manejo adecuado del agua en la huerta. Sin embargo, en los meses de mayor lluvia (agosto y septiembre) se observa un exceso de agua, mientras que en los meses de menor lluvia (abril, mayo y junio) se observa un déficit agua.

Palabras Claves: *Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración máxima, método FAO Penman Monteith, coeficiente de cultivo, manzano*

I. INTRODUCCIÓN

En México, el manzano es uno de los frutales de clima templado más importantes. La producción de manzana se ha incrementado notablemente en los últimos años. Esto debido a una mayor demanda del producto a nivel nacional e internacional. (SAGARPA, 2011).

A nivel nacional se encuentran establecidas 61,495 has de manzana. Los estados que destacan en la producción son Chihuahua, Durango, Coahuila y Puebla. Siendo Chihuahua el más importante del país pues provee alrededor del 55.2% de la producción nacional (SIAP, 2013). El estado de Coahuila cuenta con una superficie plantada de 7,028 has; entre los años 2004 y 2012 se registro un promedio de producción anual de 45,813.9 ton. (SIAP, 2013).

La tasa de evapotranspiración (ET) de los árboles de una huerta permite determinar sus requerimientos hídricos. Para lograr un adecuado manejo del agua de riego en las huertas, es necesario determinar la tasa diaria de ET. De esta forma, es posible aplicar los riegos en el momento oportuno y en la cantidad requerida, para mejorar la eficiencia del uso de agua. (Zermeño *et al.*, 2010).

Existen varios métodos para estimar la evapotranspiración de cultivos (Aguilera y Martínez, 1996., Sánchez y Carvacho, 2011) los cuales se clasifican en métodos directos e indirectos. Los directos se basan en mediciones de los cambios de la humedad del perfil del suelo donde se desarrolla el crecimiento radicular de las plantas, para ello se utilizan sensores para medir la humedad del suelo en forma directa, como el método gravimétrico (Florentino, 2006., Radulovich, 2009) y el uso de lisímetros (Aboukhaled *et al.*, 1982). Otros sensores

miden alguna propiedad del agua en el suelo para correlacionarla con el contenido de agua como el uso de tensiómetros, bloques de resistencia, los TDR y los FDR (Mestas *et al.*, 2009 y Florentino, 2006)

Los métodos indirectos proporcionan una estimación la tasas de evapotranspiración mediante el uso de formula empíricas, que utilizan datos climatológicos, entre los más mencionados están el método de Blaney-Criddle (Blaney-Criddle, 1950), Hargraves & Samani (Samani, 2000., Hargreaves y Allen 2003), método de Turc (Turc, 1961), método de Holdridge (Holdridge, 1959), método de Jensen-Haise (Jansen y Hainse, 1963), o bien el Método de Penman-Monteith modificado por la FAO (Allen *et al.*, 1998) reconocido como el más fidedigno según (Guevara, 2006).

A la fecha, existen diferentes métodos para estimar la tasa de evapotranspiración de referencia a partir de datos climatológicos (López *et al.*, 1991., Araujo *et al.*, 2007), sin embargo, el método FAO Penman Monteith es el más ampliamente recomendado como el método estándar para estimar la evapotranspiración de referencia con validez mundial en los diferentes tipos de clima. Este método proporciona resultados más consistentes para el consumo real del agua por los cultivos y ha sido comprobada ampliamente por organismos especializados, incluyendo la Organización Meteorológica Mundial. (Guevara, 2006).

OBJETIVO

Determinar la evapotranspiración diaria de una huerta de manzano con el método FAO Penman Monteith, y su relación con la programación del riego en la huerta.

HIPÓTESIS

El consumo diario de agua de los árboles de la huerta de manzano se puede obtener determinado la ET diaria con el método FAO Penman Monteith.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia del manzano en México, zonas de establecimiento y superficies establecidas

En México, el manzano es uno de los frutales de clima templado de mayor importancia. En los últimos años la producción de esta fruta ha aumentado notablemente debido a su alta demanda a nivel nacional e internacional. El consumo per cápita de manzana en México paso de 3.7 a 7.9 kg de 1980 a 2011. (SAGARPA, 2011).

Actualmente en México se encuentran establecidas a un total de 61,495 ha. En el 2012; se registró una producción de 377,004 toneladas, con un rendimiento promedio de 6.596 ton/ha. Los estados que cuentan con condiciones favorables para la producción intensiva de manzana son: Chihuahua (26,666 has), Durango (10,890 has), Coahuila (7,028 has) y Puebla (8,499 has)); y a menor escala tenemos a Nuevo León (1,959 has), Zacatecas (1,206 has) y Chiapas (1,192 has). (Cuadro 1). De toda la superficie establecida, solo una parte cuenta con sistemas de riego (cuadro 2).

Chihuahua es el estado más importante por proveer el 55.2% de la producción nacional en el 2012 seguido de, Durango con 16.1%, Coahuila con 9.75% y Puebla con el 9.1% (SIAP, 2013).

Cuadro 1. Producción de manzano en México, volumen de producción, superficies sembradas, siniestradas y cosechadas por estado.

Estado	Superficie (ha)			Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)
	sembrada	cosechada	siniestrada	obtenida	obtenido
AGUASCALIENTES	49	49		352	7.188
BAJA CALIFORNIA	16	1		2	2
COAHUILA	7,028	7,018		36,752	5.237
CHIAPAS	1,192	1,108		3,762	3.394
CHIHUAHUA	26,666	25,876	120	208,169	8.045
DISTRITO FEDERAL	131	98		658	6.75
DURANGO	10,890	10,508		60,803	5.786
GUANAJUATO	26	25		58	2.312
GUERRERO	36	28		108	3.798
HIDALGO	998	986		4,119	4.175
JALISCO	28	12	3	61	4.892
MEXICO	154	144		844	5.859
MICHOACAN	162	148		1,024	6.941
MORELOS	13	5		75	15
NUEVO LEON	1,959	1,749		6,406	3.663
OAXACA	703	601		2,108	3.505
PUEBLA	8,499	8,280	62	34,316	4.144
QUERETARO	644	620		999	1.613
SAN LUIS POTOSI	21	20		152	7.625
SONORA	183	161		3,318	20.652
TLAXCALA	14	14		118	8.429
VERACRUZ	876	836		9,221	11.023
ZACATECAS	1,206	759	442	3,578	4.714
TOTAL	61,495	59,047	626	377,004	6.385

Fuente: Elaborado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA.

Cuadro 2. Producción de manzano en México, volumen de producción, superficies sembradas, siniestradas y cosechadas por estado. Bajo condiciones de Riego.

Estado	Superficie (ha)		Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	
	sembrada	cosechada		siniestrada	obtenida
AGUASCALIENTES	35	35		268	7.663
BAJA CALIFORNIA	16	1		2	2
COAHUILA	3,063	3,053		24,948	8.172
CHIHUAHUA	25,327	24,537	120	198,670	8.097
DURANGO	10,170	9,868		58,823	5.961
GUANAJUATO	26	25		58	2.312
GUERRERO	1				
HIDALGO	6	6		44	7.35
JALISCO	14	1		4	4
MEXICO	39	37		212	5.727
MICHOACAN	27	26		162	6.249
NUEVO LEON	816	606		4,074	6.723
OAXACA	5	5		15	3.008
PUEBLA	60	50	10	525	10.542
SAN LUIS POTOSI	21	20		152	7.625
SONORA	28	28		294	10.518
TLAXCALA	11	11		109	9.909
ZACATECAS	373	366	2	1,556	4.252
TOTAL	40,038	38,675	131	289,918	7.496

Fuente: Elaborado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA.

2.2 Métodos directos para estimar la tasa de evapotranspiración de cultivos.

La programación del riego se puede realizar con base a estimaciones de la evapotranspiración de los cultivos (Allen *et al.*, 1998) medidas del estado hídricos de las plantas (Goldhamer y Fereres, 2001) o bien con base a la humedad del suelo (Hanson *et al.*, 2000).

El conocimiento directo y continuo de la variación espacio temporal del agua en el suelo resulta de gran valor para las técnicas relacionadas con la agricultura de precisión en general, y particularmente el manejo del agua (Starr, 2005). El contenido de agua disponible para las plantas (AD) a diferentes profundidades en el perfil del suelo es un factor que determina el desarrollo de la vegetación.

Los métodos directos proporcionan información directa del total de agua requerida por los cultivos (Aguilera y Martínez, 1996), entre los más utilizados están el gravimétrico (Florentino, 2006), lisímetro (Morell y Tuñón, 2003; Aboukhaled, 1986), uso de tensiómetros (Raj, 2007) y más recientemente las sondas TDR (Reflectometría en el dominio del tiempo) y FDR (Reflectancia en el dominio de las frecuencias). (Green, 1992.; Ferre y Topp, 2002).

2.3 Métodos para determinar la evapotranspiración de referencia.

2.3.1 Método Blaney-Criddle:

Este método fue desarrollado en 1950 para condiciones existentes en el oeste de los Estados Unidos, pero su uso se ha generalizado en regiones de distintas latitudes por su facilidad de cálculo (Borges y Mendiando, 2007)

El método de Blaney y Criddle es un método indirecto que usa los factores de temperatura media mensual y porcentajes de horas luz para diferentes latitudes, para estimar la evapotranspiración de cultivos (Sánchez, 1999).

Convertida al sistema métrico la ecuación queda expresada de la siguiente manera.

$$E T o = K p(0.46T_a + 8.13) \quad (1)$$

Donde:

k = coeficiente mensual depende de la vegetación, ubicación y la temporada del año, que va desde 0,5 a 1,2., p = porcentaje de insolación diaria máxima (N) en relación con el tiempo de insolación teórico año (4380 h), T_a = temperatura media mensual en °C

2.3.2 Modelo de Hargreaves & Samani

En 1975 Hargreaves publica la siguiente fórmula para estimar la evapotranspiración de referencia ($E T o$) diaria en mm (Hargreaves *et al.*, 2003)

$$E T o = 0.0135 R_s (T_m e d + 17.8) \quad (2)$$

Donde:

R_s = radiación solar que llega a nivel del suelo (mm dia^{-1}), T_{media} = Temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$)

Posteriormente Hargreaves y Samani propusieron la siguiente expresión para la radiación solar que llega a nivel del suelo (Hargreaves *et al.*, 2003), (Samani, 2000).

$$R_s = \alpha R_a \sqrt{TD} \quad (3)$$

Donde

α - Coeficiente empírico, R_a – Radiación extraterrestre al tope de la atmosfera (mm dia^{-1}), TD = Diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$).

En 1985 se combinaron las dos ecuaciones y se utilizó un factor $\alpha = 0.16$ obteniendo:

$$E_{To} = 0.0022 R_a (T_{\text{media}} + 17.8) \sqrt{TD} \quad (4)$$

Finalmente los autores recomendaron que el coeficiente se incrementara a 0.0023. Con lo que la ecuación ajustada que de la siguiente manera (Hargreaves *et al.*, 2003):

$$E_{To} = 0.0023 R_a (T_{\text{media}} + 17.8) \sqrt{TD} \quad (5)$$

2.3.3 Método de Turc

En 1954 Turc propuso un método sencillo, basado en la temperatura y la precipitación. La fórmula de Turc para obtener la evapotranspiración anual en mm, se expresa como (Tuñón, 2000):

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P}{L}}} \quad (6)$$

Donde:

P = Precipitación media anual (mm), L = Es una función de T

$$L = 300 + 25T + 0.5T^3 \quad (7)$$

T- Es función de la temperatura (t).

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{12} t_i \times P_i}{\sum_{i=1}^{12} P_i} \quad (8)$$

2.3.4 Método de Jensen-Haise

El método propuesto por Jensen y Hainse en 1963, también está basado en la radiación solar y la temperatura del aire, tomado por (Rosenberg *et al.*, 1983), se presenta tal como:

$$ET_o = R_s * (0,025 * T_m + 0,08) \quad (9)$$

Donde

ET_o = Evapotranspiración de referencia, expresada en mm/día., R_s = radiación global incidente, expresada en mm/día, T_m = temperatura media diaria, en °C.

2.3.5 Método de Holdridge

HOLDRIDGE (1959) publicó una simple expresión para estimar evapotranspiración potencial (ETp), actualmente definida como evapotranspiración de referencia (ETo) por (Allen *et al.*, 1998) y la (ASCE-EWRI, 2005), para regiones tropicales y subtropicales (excepto altas elevaciones).

Esta expresión es función de la temperatura del aire comprendida entre los 0 °C y 30 °C (biotemperatura), que determina el ritmo e intensidad de los procesos fisiológicos de las plantas (fotosíntesis, respiración y transpiración) y la tasa de evaporación directa del agua contenida en el suelo y en la vegetación. El modelo original de Holdridge tiene la siguiente forma:

$$ETP = C_{HO}T \quad (10)$$

Siendo.

$$C_{HO} = 58.93 (PUT/NUT) \quad (11)$$

Donde,

ETp - evapotranspiración potencial, mm tiempo⁻¹, T =temperatura del aire, °C;
PUT = periodo de unidades de tiempo, días, y NUT = número de unidades de tiempo en un año, 366 ó 365 días.

(Holdridge, 1959) considera C_{HO} de 58.93 para estimaciones anuales y 0.161 para estimaciones diarias de evapotranspiración.

Una de las innovaciones importantes en el desarrollo de este modelo (TOSI, 1964) consiste en considerar la biotemperatura de manera análoga a la temperatura media del aire (diaria, mensual y/o anual); por lo tanto, para el periodo analizado el modelo de Holdridge se puede escribir como:

$$ET_o = C_{HO}TP \quad (12)$$

Donde,

ET_o = evapotranspiración de referencia, mm día^{-1} , C = coeficiente en función de alguna variable meteorológica que relacione mejor sus valores, y HO , TP = temperatura media diaria del aire, $^{\circ}\text{C}$

2.3.6 Método FAO Penman Monteith

En mayo de 1990, un panel de expertos e investigadores en riego fue organizado por la FAO, en colaboración con la Comisión Internacional Para el Riego y Drenaje (ICID) y con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), con el fin de revisar las metodologías previamente propuestas por la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos utilizados hasta la fecha, para adaptarse a los avances surgidos desde los años 70 y pública en 1998 (Allen *et al.*, 1998) un manual denominado Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

El método de FAO Penman-Monteith para estimar ET_{ref} es derivado de la ecuación combinada de Penman-Monteith así como de las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial. Por lo que en este trabajo se realizó con la ecuación sin derivar únicamente las variables requeridas se introducirán como promedios diarios (ciclos de 24 horas en lugar de un segundo) (Ecuación 13).

$$\lambda ET_{ref} = \frac{S(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a} (3600 * 24)}{S + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (13)$$

Dónde:

λET_0 = Flujo de calor latente de referencia ($MJ m^{-2} d^{-1}$), R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ m^{-2} d^{-1}$), G = Flujo del calor de suelo ($MJ m^{-2} d^{-1}$), ρ_a = Densidad media del aire a presión constante ($kg m^{-3}$), c_p = Calor específico del aire ($MJ kg^{-1} K^{-1}$), e_s = Presión de vapor de saturación (kPa), e_a = Presión real de vapor (kPa), $(e_s - e_a)$ = Déficit de presión de vapor (kPa), S = Pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa ^\circ K^{-1}$), γ = Constante psicrométrica ($kPa ^\circ K^{-1}$), r_s = Resistencia de la superficie al flujo de vapor de agua ($s m^{-1}$), r_a = Resistencia aerodinámica del aire al flujo de vapor de agua ($s m^{-1}$).

La Evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) se obtiene dividiendo el flujo de calor latente de referencia (λET_{ref}) por el calor de vaporización del agua (λ).

Comparaciones de la ecuación FAO Penman-Monteith con la ecuación Penman-Monteith original efectuadas por (Allen *et al.*1994), en 11 localidades climáticas distintas sobre una cubierta vegetal de pasto de 0.12 m de alto, mostraron una equivalencia general para la nueva definición de ET_{ref} al detectarse diferencias menores al 3% entre ambos métodos con una pendiente igual a 1 y un $r^2=0.99$ ($n=100$) en los análisis diarios, mientras que en los horarios el error estándar de la estimación fue de 0.02 mm/h (7% de la ET_{ref}).

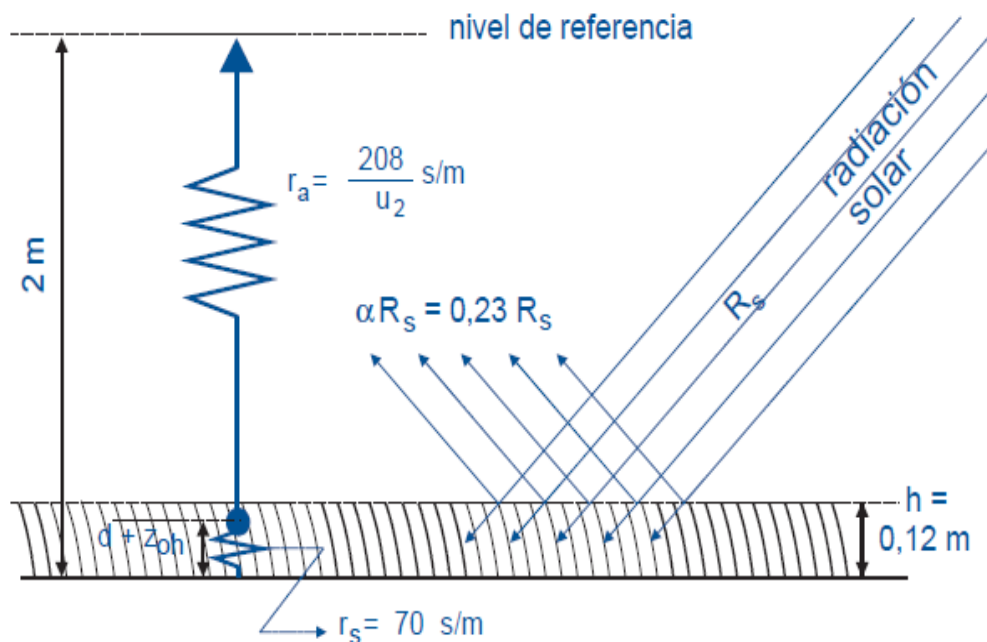


Figura 1. Representación esquemática de los componentes de la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

La fórmula de FAO Penman-Monteith es ampliamente recomendada como el método estándar para estimar la evapotranspiración de referencia con validez mundial en los diferentes tipos de clima, por proveer resultados más consistentes

para el uso real del agua por los cultivos y ha sido comprobada fehacientemente por organismos especializados, incluyendo la Organización Meteorológica Mundial. (Guevara, 2006).

2.4 Determinación del consumo de agua por los cultivos a partir de la ET de referencia.

La evapotranspiración máxima (ET_{max}) de un determinado cultivo se obtiene multiplicando la ET_{ref} por un coeficiente de ajuste por desarrollo de cultivo (K_c), de acuerdo con la siguiente relación (Wright, 1982; Allen *et al.*, 2005b).

$$ET_{max} = ET_{ref} * K_c \quad (14)$$

El coeficiente único de cultivo K_c definido como el cociente entre la evapotranspiración en condiciones óptimas (ET_c) y la evapotranspiración de referencia (ET_{ref}). Representa los efectos combinados de la integración de la transpiración del cultivo y la evapotranspiración del suelo. El K_c incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación del suelo.

Los factores que determinan al K_c son el tipo de cultivo, clima, evaporación del suelo, y el estado de crecimiento y desarrollo (Allen *et al.*, 1998., Bailey, 1990). El K_c se divide en dos coeficientes separados, uno para la transpiración del cultivo

(Kcb, coeficiente de cultivo basal) y otro para la evaporación del suelo (Ks). (Wright, 1982).

La ET actual de un determinado cultivo depende también de la condición de humedad del suelo en un determinado tiempo. De tal forma que para determinar ET actual, es necesario multiplicar la ETmax por un coeficiente de ajuste por la condición de humedad del suelo, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$ET_{actual} = ET_{max} * Kc * Ks \quad (15)$$

Donde, Ks se puede obtener con la siguiente relación:

$$Ks = (ADT - Dr) / (ADT - AFA) \quad (16)$$

Donde:

Ks= factor de ajuste por contenido de agua en el suelo (0-1), ADT= agua disponible total en la zona radicular (mm), Dr= agua consumida en la zona radicular (mm), AFA = lámina de agua fácilmente aprovechable (mm) por el cultivo (sin ocasionar estrés hídrico)

Cuando Dr es menor o igual que AFA, Ks es igual a uno. Si Dr es mayor que AFA, Ks se obtiene con la Ecuación (16).

2.5 Estudios previos del uso del método FAO Penman-Monteith para determinar el consumo de agua por diferentes tipos de cultivos.

Trezza, *et al.* (2008) realizaron la programación del riego en un cultivo de caña de azúcar mediante la aplicación del balance hídrico en el suelo, utilizando la metodología FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración del cultivo y el balance diario de la humedad del suelo. Los resultados obtenidos indicaron pérdida de agua por percolación profunda en etapas tempranas del cultivo debido a la aplicación de láminas de riego muy grandes.

Villaman *et al* (2001), evaluaron varios métodos micrometeorológicos para determinar la evapotranspiración (ET) en tiempo real de un cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Los métodos evaluados fueron: Thornthwaite–Holzman, Aerodinámico, Balance de energía (Relación de Bowen), Sistema de Bowen y el método Penman–Monteith. Los resultados se compararon con la evapotranspiración medida en el lisímetro de pesada como referencia. Los resultados indicaron que la evapotranspiración calculada por el método de Penman-Monteith, el Balance de energía y la obtenida con el Sistema de Bowen fueron los que mejor estimaron la ET del cultivo.

Ortega *et al* (2000). Realizó un estudio para determinar la evapotranspiración diaria de un cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum*, Híbrido Rido I-4) usando la ecuación de Penman-Monteith, con un valor variable de la resistencia de la cubierta vegetal a la transferencia de vapor de agua (r_{cv}) en

la estación experimental Panguilemo, Talca, Chile. Los resultados de este estudio permiten concluir que el modelo de Penman-Monteith subestimó la ET_{real} con un error absoluto equivalente a 4.23% y una desviación estándar del error igual a 0,51 mm d⁻¹, y de acuerdo a la literatura este modelo permite realizar el cálculo directo de la evapotranspiración real (ET_{real}).

2.6 Estudios previos del uso del método FAO Penman para determinar el consumo de agua por huertas de manzano u otro tipo de huertas.

Kelso *et al* (2012) realizaron una investigación para la estimación *in situ* del K_c en vainilla (*Vanilla planifolia A*), el trabajo se desarrolló en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Campo Experimental Ixtacuaco en el estado de Veracruz, México. Para su determinación se midió la evapotranspiración real (ET_r) mediante un lisímetro de balance y la evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) mediante la metodología Penman- Monteith. Se calculó un requerimiento hídrico de 192 mm y $K_{cinicial}$ de 0.35 para los primeros 200 días después de la siembra de la fase inicial de desarrollo de cultivo.

Puppo y García (2009) Realizaron una investigación con el objetivo de medir el consumo de agua en plantas de durazno durante varios ciclos de crecimiento hasta su tamaño definitivo, además de determinar el valor de coeficiente de cultivo (K_c) y el coeficiente de base (K_b) para la zona sur de Uruguay, para ello se apoyaron de un lisímetro de capa freática constante; se

calculó la ET con la fórmula Penman-Monteith modificada por FAO (Allen *et al.*, 1998), utilizando los datos climáticos diarios de la Estación Experimental Las Brujas (34° 40' S; 56° 20' W), ubicada a 15 km del sitio del ensayo. Los resultados mostraron un consumo de agua de 5 mm día⁻¹ en el primer año y 6 mm día⁻¹ en el segundo y tercero

Requena *et al.* (2012) desarrollaron un estudio con el propósito de determinar el coeficiente de cultivo (kc) de manzano para su segunda temporada de crecimiento, mediante la utilización de tres lisímetros de drenaje y mediante el uso de la ecuación FAO Penman-Monteith. El valor calculado de la evapotranspiración para la segunda temporada de crecimiento fue de 401mm teniendo en cuenta la precipitación caída, el riego aplicado (448 mm), el agua de drenaje (61 mm) y una variación del agua del suelo del lisímetro poco significativa.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar del sitio del estudio

El estudio se realizó en una huerta de manzano de la variedad Golden Vigas en el ejido Jame, municipio de Arteaga, Coahuila. El lugar está situado a una latitud 25° 20' con una longitud 100° 36' 48" y una altitud de 2534msnm.

El clima de la zona es templado sub-húmedo; en 2012 se registró una precipitación total de 550 mm, siendo los meses de julio, agosto y septiembre los meses que registran mayor precipitación.

3.2 Características de la huerta de manzano

Los arboles de la huerta son de la variedad Golden Vigas, con porta injerto MM111, la edad de los arboles oscila entre 13 y 15 años de una altura promedio de 2.5 metros.

El lote donde se realizó el estudio mide 100 m largo x 104 m ancho equivalente a 1.04 hectáreas. La plantación tiene un espaciamiento entre arboles de 3 m y 4 m entre líneas, con una densidad de 867 árboles/ha aproximadamente. La huerta cuenta con una malla anti-granizo con hilos de polietileno, una apertura de 0.5cm por 0.4cm y un efecto de sombreo del 12%, para este estudio se tomó en cuenta el valor de la transmisividad de la malla y como afecta a la radiación solar.

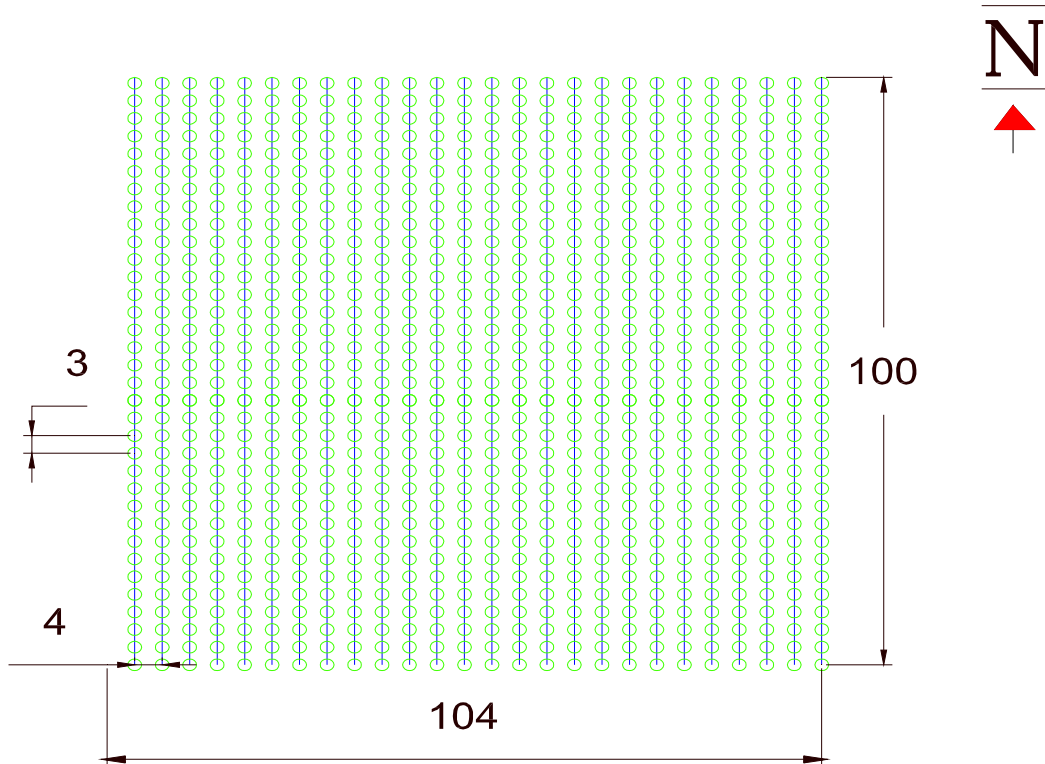


Figura 2. Marco de plantación de la huerta de la huerta de manzano en Jame, municipio de Arteaga, Coahuila.

3.3 Sistema de riego utilizado

La huerta cuenta con un sistema de riego por goteo de alta intensidad. El sistema consiste en una línea lateral por cada fila de árboles con emisores a cada metro y un gasto de aplicación de 1.95 LPH/m.

El sistema de riego también se utiliza para la fertirrigación de la huerta, optimizando aún más el uso del sistema.

3.4 Frecuencia de riegos y láminas aplicadas

La huerta se riega cada tercer día durante el periodo de producción del manzano que inicia en marzo y termina en septiembre

En marzo, agosto y septiembre se aplicaron 7 h de riego cada tercer día, correspondiente a un volumen de 1.36 m³ por cada 100 m de longitud. Esto represento una lámina de 4.55 mm.

En abril, mayo, junio y julio se aplicaron 8 horas diarias, para un volumen de 1.56 m³ equivalente a una lámina de 5.2mm. Durante los meses en los que el cultivo se encuentra en estado de reposo se aplican riegos de auxilio con frecuencias de un riego por mes aproximadamente para evitar problemas de estrés hídrico en los árboles de la huerta.

3.5 Ubicación, características e información climatológica de la estación automatizada de Jame.

La estación pertenece a la Red de Estaciones Agroclimáticas de Coahuila. Se localiza en el rancho La Rosita municipio de Arteaga, con latitud 25° 22' 9.6", longitud 100° 38' 10.6" a una altitud de 2534 msnm.

Se recopilaron los datos de esta estación por su cercanía a la huerta en estudio.

3.6 Variables climáticas medidas

Las estaciones climatológicas automatizadas del INIFAP en el estado de Coahuila, están conectadas a la red de internet, y están provistas de sensores para el registro de la temperatura del aire a 2 metros sobre el suelo, precipitación

pluvial, humedad relativa, humedad del follaje, punto de rocío, radiación solar total incidente, dirección y velocidad del viento.

Los datos de la red nacional de estaciones son enviados cada 15 minutos al Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos del INIFAP, ubicado en el Campo Experimental Pabellón, Ags., en donde se procesa la información para su difusión en el portal de internet.

3.7 Sensores instalados en la estación meteorología

Una estación TRASMISORA/REPETIDORA (A733 ADDWAVE) que envía la información a la base de datos y un juego de postes para instalar la estación repetidora (A730P)

Los sensores que realizan las lecturas de las diferentes variables son los siguientes.

Un sensor de velocidad y dirección de viento (A730WIN), un sensor de radiación solar (A730SR), sensor de precipitación (a730RG), sensor de humedad de la hoja. (WETleafwetness sensor incl. holder), sensor combinado de temperatura y humedad relativa (SEN-R CombisensorTemp/RH Adcon TR1).

Para el desarrollo de este estudio, se obtuvieron los datos de la estación correspondiente (publicados en internet) y se desarrollaron archivos Excel con la información de los datos diarios de las variables del método FAO Penman Monteith. La radiación neta se estimó a partir de los valores integrados de radiación solar total diaria.

3.8 Descripción del modelo FAO Penman Monteith para determinar la Evapotranspiración de referencia, y datos requeridos por el modelo.

El método FAO Penman-Monteith para periodos diarios, se describe de la siguiente manera. (Allen *et al.*, 1998)

$$\lambda ET_{\text{ref}} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a} (3600 * 24)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (13)$$

Donde

λET_{ref} = Flujo de calor latente de referencia ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G = Flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), ρ_a = Densidad media del aire a presión constante (kg m^{-3}), c_p = Calor específico del aire ($\text{MJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), e_s = Presión de vapor de saturación (kPa), e_a = Presión real de vapor (kPa), $(e_s - e_a)$ = Déficit de presión de vapor (kPa), Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{K}^{-1}$), γ = Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{K}^{-1}$), r_s = Resistencia de la superficie al flujo de vapor de agua (s m^{-1}), r_a = Resistencia aerodinámica del aire al flujo de vapor de agua (s m^{-1}).

Debido a que la radiación neta no se mide en las estaciones climatológicas de México, esta se estima a partir de la radiación solar total incidente, la latitud, altitud del lugar y el día del año. Para determinar el valor de la radiación solar bajo la malla, se obtuvo el coeficiente de transmisividad de la misma. Para esto, se realizaron mediciones bajo la malla y a cielo abierto de 1 s y promedio de 1 min entre las 12 y las 13 h.

La presión de vapor a saturación y actual se determinan a partir de la temperatura del aire y la humedad relativa. La resistencia aerodinámica (r_a) se determina con la información de la velocidad del viento a 2 m de altura de acuerdo con la siguiente ecuación

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (14)$$

Dónde:

u_2 = velocidad del viento ($m s^{-1}$) a 2 m de altura sobre la superficie del suelo.

.La resistencia del dosel de la vegetación al flujo de vapor de agua corresponde a un valor de 70 s/m, para un pasto de 12 cm de altura (Allen *et al.*, 2006)

3.9 Descripción del procedimiento para obtener el consumo de agua diario de los árboles de la huerta a partir de la ET de referencia

La tasa de evapotranspiración diaria de cada árbol se obtuvo multiplicando la evapotranspiración de referencia diaria (ET_r), determinada con método FAO Penman Monteith por el coeficiente de ajuste por desarrollo de cultivo (K_c) (Ec.14). Se asumió que el coeficiente por disponibilidad de agua en el suelo (K_s) (Ec. 16) fue la unidad debido a la alta frecuencia de aplicación de los riegos.

El valor del coeficiente de ajuste por desarrollo de cultivo diario (K_c) se obtuvo con un polinomio de tercer orden, desarrollado en estudios previos en la misma huerta, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$K_c = b_0 + b_1 * JD + b_2 * JD^2 + b_3 * JD^3 \quad (17)$$

El coeficiente de determinación (r^2) del polinomio fue 0.980

Dónde:

JD = día juliano

$b_0 = 0.05129,$

$b_1 = 0.01176$

$b_2 = 3.016 \times 10^{-5}$

$b_3 = 9.957 \times 10^{-10}$

IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Índice de transmisividad de la malla.

La tasa de evapotranspiración de los árboles de la huerta depende de la magnitud de la radiación solar incidente, que a su vez depende de la transmisividad de la malla antigranizo. El índice de transmisividad de la malla a la radiación solar se determinó realizando mediciones simultáneas de la radiación solar fuera y bajo la malla utilizando un piranómetro de silicón. Las mediciones se realizaron bajo condiciones de cielo despejado de entre las 12 y las 15 h del horario de verano. El valor del índice de transmisividad de la malla fue de 0.771.

La cantidad de la radiación solar que se reduce depende fundamentalmente del color de la tela utilizada. Bajo redes negras la reducción de la radiación solar puede ser del 30 %; en cambio, bajo telas blancas, generalmente son menores del 10 % (Garder, 1990). Otros estudios (Iglesias y Alegre, 2006) reportaron una atenuación de 25% en mallas negras, y 12% en mallas claras.

4.2 Evapotranspiración de referencia mensual en la huerta sin efecto de malla

En el Cuadro 3 se muestran los valores de la evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) mensual sin efecto de la malla. Los meses con valores más altos de ET_{ref} son Mayo y Junio respectivamente. En marzo y julio, no se tienen los datos de ET_{ref} de todo el mes, ya que la estación climatológica automatizada

localizada en la huerta, no registro datos es esos días. La E_{Tref} se determinó en base diaria y en el Cuadro 3, solo se muestran los totales mensuales.

Cuadro 3. Evapotranspiración de referencia mensual para el año 2012 sin efecto de malla en la huerta de manzano en el ejido Jame, municipio de Arteaga, Coahuila.

Mes	No de días con datos	E _{Tref} (mm) Pen-Mont
Marzo	17	75.23
Abril	30	137.76
Mayo	31	155.94
Junio	30	145.81
Julio	22	87.53
Agosto	31	137.14
Septiembre	30	120.95
		860.36

4.3 Evapotranspiración de referencia mensual en la huerta con efecto de malla

La tasa de evapotranspiración de referencia mensual bajo efecto de la malla se presenta en el Cuadro 4, donde se observa que la tasa de E_{Tref} es menor en cada mes, con relación a los valores obtenidos con efecto de malla (Cuadro 3). La E_{TRf} total para el ciclo de producción del cultivo fue 728.94 mm, y fue 131.42 mm menor que la observada sin efecto de malla. Esto represento una reducción del

15.28%. Otros estudios también han reportado una reducción de la tasa de evapotranspiración debido al efecto de malla sombra, malla antiafidos y antigranizo. Por ejemplo, Möller *et al.* (2004) mencionan que debido a la reducción de la radiación y la velocidad del viento de la malla antiafidos, la tasa de evapotranspiración de un cultivo de chile morrón fue 60% menor con respecto al valor observado en condiciones de cielo abierto. Similarmente, Siqueira *et al.* (2012) indican que la malla sombra ocasiona un ambiente más húmedo y de menor radiación que reduce la tasa de transpiración e incrementa la eficiencia del uso del agua de los cultivos.

Cuadro 4. Tasa de evapotranspiración de referencia mensual en el año 2012, bajo efecto de la malla antigranizo en la huerta de manzano en el ejido Jame, municipio de Arteaga, Coahuila.

Mes	No de días con datos	ETref (mm) Pen-Mont
Marzo	17	63.96
Abril	30	117.71
Mayo	31	133.74
Junio	30	123.91
Julio	22	73.45
Agosto	31	115.67
Septiembre	30	100.5
		728.94

4.4 Evapotranspiración de referencia mensual en la huerta con efecto de malla y factor de cobertura.

La tasa de evapotranspiración con efecto de malla y factor de cobertura se observa en el (Cuadro 5). El factor de cobertura se obtuvo dividiendo la relación del área de cubierta por árbol (3*3) por el área de suelo correspondiente (4*3), de acuerdo a una distancia de 4 m entre hileras y 3 m de separación entre árboles, ya que la copa de los árboles solo sombrea una franja transversal de 3 m el factor de cobertura reduce el área de evapotranspiración y como resultado de esto los valores de evapotranspiración de referencia (Cuadro 5) también se reducen.

Cuadro 5: tasa de evapotranspiración de referencia mensual en el 2012 bajo efecto de malla y factor de cobertura de la huerta de manzano del ejido Jame, municipio de Arteaga, Coahuila.

Mes	No de dias con datos	ETref (mm)	
		Pen-Mont	ETref*fcob.(mm) Pen-Mon
Marzo	17	63.96	47.97
Abril	30	117.71	88.28
Mayo	31	133.74	100.3
Junio	30	123.91	92.93
Julio	22	73.45	55.09
Agosto	31	115.67	86.76
Septiembre	30	100.5	75.38
		728.94	546.71

F_{cob} es el factor de cobertura de la copa de los árboles de la huerta (0.75)

4.5 Tasa de evapotranspiración actual de los árboles de la huerta.

La tasa de evapotranspiración actual de los árboles de la huerta se obtuvo multiplicando la evapotranspiración de referencia estimada con el método FAO Penman Monteith por el coeficiente de cultivo (Kc). Los valores del coeficiente de ajuste por disponibilidad de agua en el suelo (Ks) se consideraron igual a la unidad, ya que los riegos en la huerta se aplican cada tercer día y por lo tanto no se tuvo una variación significativa del contenido de agua en el suelo.

Cuadro 6. Tasa de evapotranspiración actual mensual en el 2012 bajo efecto de malla de la huerta de manzano del ejido Jame, municipio de Arteaga, Coahuila.

Mes	ET (mm) Pen-Mont	ET*Kc (mm)
Marzo	63.96	52.273943
Abril	117.71	113.388516
Mayo	133.74	146.918262
Junio	123.91	145.962613
Julio	73.45	88.359515
Agosto	115.67	135.715464
Septiembre	100.5	109.307391
	728.94	791.925704

4.6 Relación entre la lámina de agua evapotranspirada, la lámina de agua aplicada y lámina de agua por lluvia.

En el Cuadro 7 se muestra la relación entre la lámina de agua evapotranspirada, lamina aplicada por el riego y las aportaciones por precipitación mensual. Los datos del Cuadro 7 indican que el manejo del agua en la huerta de manzano fue adecuado, ya que la suma de la lluvia más las láminas de agua por riego durante el ciclo de producción del manzano (marzo a septiembre) fue solo 72.5 mm mayor que la lámina total de agua evapotranspirada durante el mismo ciclo

La distribución de la lluvia no es uniforme durante el ciclo de producción del manzano, ya que en julio y septiembre se acumuló el 66.51 % de la precipitación, ocasionando un exceso de agua en estos meses y un déficit en los otros.

Puppo y García (2010) compararon los datos de evapotranspiración (ET) de una huerta de Durazno obtenidos con un lisímetro volumétrico, contra la ET estimada con el método FAO Penman Monteith. Sus resultados mostraron que con el método FAO Penman Monteith se puede obtener el consumo diario de agua de los árboles de la huera. Sin embargo, el consumo de agua estimado con este método puede ser sobreestimado cuando se utilizan valores de Kc de manuales o tablas (Mestas *et al.*, 2009).

Cuadro 7: Relación entre láminas de agua aplicadas por riego y lluvia, y las láminas evapotranspiradas mensualmente durante el ciclo productivo de la huerta durante el año 2012 en Jame, municipio de Arteaga, Coahuila.

mes	Riego mm	Precipitación mm	Riego más Precipitación mm	Tasa de ET mm
Marzo	31.85	33.8	65.65	52.27
Abril	67.6	0.6	68.2	113.39
Mayo	67.6	24.4	92	146.92
Junio	67.6	50.4	118	145.96
Julio	36.4	107.2	143.6	88.36
Agosto	65	39	104	135.72
Septiembre	54.6	146	200.6	109.31
	390.65	401.4	792.05	791.93

V. CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en este estudio se concluye que el método FAO Penman Monteith es recomendado para estimar el consumo de agua en las huertas de manzano. Esto debido a que la lámina de agua total evapotranspirada en el ciclo de producción del Manzano, fue similar a la suma de la lámina de riego aplicada y la lámina de lluvia. La tasa de evapotranspiración máxima a lo largo del ciclo productivo de la manzana obtenida con el método FAO Penman Monteith fue muy similar a la lámina de agua aportada a la huerta a través del riego y la lluvia. Sin embargo, la distribución de la precipitación no fue uniforme ya que durante abril, mayo, junio y agosto existió déficit hídrico como resultado de las altas temperaturas y de la escasa precipitación, mientras que en, julio y septiembre hubo excedente de agua de lluvia y la suma de la lámina de riego y la lluvia fue mayor que la evapotranspiración.

La malla antigranizo influye directamente en la evapotranspiración de la huerta, ya que ocasiona una reducción de la tasa de evapotranspiración de 15.28 % con respecto a la evapotranspiración en condiciones de cielo abierto.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Aboukhaled, A., Alfaro, A., Smith, M. 1986. Los lisímetros. Roma: FAO Paper 39. 68p.
- Aboukhaled, A., Alfaro, A. y Smith, M. 1982. Lysimeters. FAO Irrigation and Drainage Paper 39. Roma, Italia. 68 p.
- Aguilera, C. y R. Martínez E. 1996. Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. 4a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 321p.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Smith, M.; Raes, D.; Wright, J. L. FAO-56. 2005b. Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 131(1): 2-13
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., y Pereira, L.S. 1994a. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin 43 (2):1-34.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage. Paper 56. FAO, Rome. 301 p
- Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio Riego y Drenaje, FAO-56. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y Alimentación. Roma. 323 p.
- Araujo, W.F., Costa, S. A. A., Dos Santos, A. E. 2007. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (eto) para. Caatinga 20(4):84-88.

ASCE-EWRI.2005.The ASCEstandardized referent crop evapotranspiration equation. Reston: Technical Committee Report on Environmental and Water Resource Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration,.70 p.

Bailey JO, 1990. The Potential Value of Remotely Sensed Data in the Assessment of Evapotranspiration and evaporation. Remote Sensing Reviews 4(2): 346-377.

Blaney, H. F.; Criddle, W. O.1950.Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Washington: USDA Soil Conservation Service. Technical Paper 96: 48p

Borges, B.A., Mendiando, M. E. 2007. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referênciana Bacia do Rio Jacupiranga. Rev.Bras. Eng. Agríc. Ambiental 11 (3): 293-300.

Ferré, P. A. y G. C. Topp.2002. Time domain reflectometry. En: Dana, J.H. &Topp, G. C. (Eds), Methods of soil Analysis, Part 4-Physical Methods, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA 434-446.

Florentino, A. 2006. Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. Venesuelos14(1): 48-70.

Gardner, R. W. and C. A. Fletcher.1990. Hail protection systems for deciduous fruit trees. Deciduous Fruit Grower 40(6): 206-212.

Goldhamer, D.A. y Fereres, E., 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements.Irrig.Sci20(1): 115 -125.

- Green, R.E., Topp, G. C., 1992. Survey of use of fields methods for measuring soil hydraulic properties.Pp: 281-288 G. C. Topp et al (ed). Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practise. SSSASpec. Publ. 30. SSSA. Madison. WI.
- Guevara-Diaz, J. M. 2006. La fórmula de Penman- Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETO. Terra 22 (31): 31-72.
- Hanson, R.B., Orloff, S., y Peters, D., 2000.Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. Calif. Agric54 (3): 38-42.
- Hargreaves, G.H., Allen, R. A. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, J. Irrig.Drain. Eng. ASCE 129(1): 53-63.
- Holdridge, L.R. 1959. Simple method for determining potential evapotranspiration from temperature data.Science130 (3375): 533-572.
- Iglesias, I. y Alegre, S. 2006. The effect of anti-hail nets on fruit protection, radiation, temperature, quality and profitability of 'Mondial Gala' apples. Journal or applied Horticulture 8 (2): 91-100.
- Jensen, M. E.; Haise, H. R.1963.Estimating evapotranspiration from solar radiation.Journal of Irrigation and Drain Engineering.Bulletin of the American Meteorological Society 89(IR4): 15-41.
- Kelso, B. H. A., Bâ, K. M., Sánchez, M. S., Reyes, L. D. 2012.Estimación *in situ* del Kc de la vainilla (*Vanilla planifolia* A). Agrocienza 46 (5): 499-506.
- López E, J., L. Tijerina Ch., G. Haro A. y R. Arteaga R. 1991. Calibración de fórmulas de evapotranspiración mediante un cultivo de alfalfa como

referencia en el área de Montecillo, Estado de México. *Agrociencia* 2 (1): 55-72.

Mestas V, R. 2011. Régimen hídrico del suelo y evapotranspiración en áreas agrícolas y forestales. Tesis doctoral. Universidad de la Coruña. 203 p.

Mestas, V. R., García, I. M., Báez, M. D., Paz, G. A. 2009. Estimación del consumo de agua en el cultivo de maíz, mediante el seguimiento de humeado en la zona radicular con sondas de capacitancia (FDR). *Estudios en la Zona no Saturada del suelo*. 9 (1): 9-15

Möller, M., Tanny, J., Li, Ya., Cohen, S. 2004. Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 127(1-2):35-51.

Morell, I.; J. Tuñón, J. 2003. Algunos problemas instrumentales relacionados con la determinación del balance hídrico del suelo. En "Operatividad de la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos", IGME MADRID, España. 44 p.

Orduz-Rodriguez, O. J. y Fischer, G. 2007. Balance Hídrico e influencia del estrés hídrico en la inducción y desarrollo floral de la mandarina "Arrayana" en el piedemonte llanero de Colombia. *Agronomía Colombiana* 25 (2): 255-263.

Ortega- Farias. S.O, Calderón, R., Acevedo, C., y Fuentes, S. 2000. Estimación de la evapotranspiración real diaria de un cultivo de tomates usando la ecuación de Penman- Monteith. *Ciencias e investigación Agraria* 27(2): 91-96.

Puppo, L. Y García, P. M. 2010. Determinación del consumo de agua del duraznero por lisimetría. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 14(1): 25-31.

- Radulovich, R. 2009. Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía Costarricense* 33(1): 121-124.
- Raj, G. M., M. L. Rivera, y R.M. Crespo. 2007. Manejo de riego por goteo. Editado General, Mayagüez, Puerto Rico. 107p.
- Requena, A., Nordeström, G. Castillo, E. 2012. Consumo de agua de plantas jóvenes de manzano regadas por goteo. *Rev.FCAUNCUYO* 44 (1): 41-48.
- Rosenberg, N. J; Blad, B. L. &Verma, S. B. *Microclimate. 1983., the Biological Environment. New York: John Wiley & Sons, second edition. 495p*
- Ryugo, K. 1988. Fruit Culture. Its Science and Art. John Wiley & Sons, Inc. New York. 344 p.
- SAGARPA, 2011. Anuario estadístico de la producción agrícola. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx> (consultado 15 de enero 2013).
- Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and Evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126 (4):265-267.
- Sanchez- Tienda, J. 1999. Uso consultivo del aguacate: metodología blaney y criddle modificada relacionando fenología y precipitación. *Revista Chapingo serie Horticultura* 5: 201-207.
- Sánchez-Martínez, M y Carvacho-Bart, L. 2011. Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 50 (50): 171-186.

- SIAP.2013. Servicio de información agroalimentaria y pecuaria. Resumen nacional de la producción agrícola. México DF. [http://www.siap.gob.mx./](http://www.siap.gob.mx/) (consultado el 17 de enero de 2013.)
- Siquiera, B. M., Katul, G.G., Tanny, J.2012. The Effect of the Screen on the Mass, Momentum, and Energy Exchange Rates of a Uniform Crop Situated in an Extensive Screen house. *Boundary – Layer Meteorol* 142: 339-363.
- Starr, G.C. 2005. Assessing temporal stability and spatial variability of soil water patterns with implications for precision water management. *Agriculture Water Management* 72 (3): 223-243.
- TOSI, J.A. 1964. Climatic control of terrestrial ecosystems: A report on the Holdridge model. *Economic Geography, Worcester* 40(2)173-181.
- Trezza, R. Pacheco, Y. Suárez, Y. Núñez, A. y Umbría, I. 2008. Programación del riego en caña de azúcar en una zona semiárida del estado Lara, Venezuela, Utilizando la metodología FAO-56. *Bioagro20*(1):21-27.
- Tuñón, J. (2000). Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. Tesis Doctoral. Universitat Jaume I. Lugar, 367p
- Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron* 12:12-49.
- Villaman, R. Tijerina, L, Quevedo, A. y Crespo, G. 2001. Comparación de algunos métodos micro meteorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. *Terra* 19(3):281-291.

Wright, J. L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. Journal of Irrigation and Drainage. ASCE 108:57-54.

Zermeño-González, A., Flores-Guerrero, J. A., Munguía-López, J. P., et al. 2010. Evapotranspiración y su relación con la evapotranspiración a equilibrio en una huerta de nogal pacanero (*carya illinoensis*) del Norte de México. Agrociencia 44(8): 885-893.