

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



**TASA DIARIA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UNA HUERTA DE NOGAL  
PECANERO CON MEDICIONES DE LA HUMEDAD DEL SUELO**

**POR:**

**Juan Carlos Vasquez Rosales**

**TESIS:**

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

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

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

**TASA DIARIA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UNA HUERTA DE  
NOGAL PECANERO CON MEDICIONES DE LA HUMEDAD DEL  
SUELO**

**TESIS POR:**

**JUAN CARLOS VASQUEZ ROSALES**

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y  
aprobada como requisito parcial, para obtener el Título de:

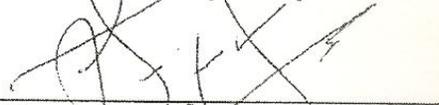
**INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION**

**APROBADA**

**PRESIDENTE DEL JURADO**



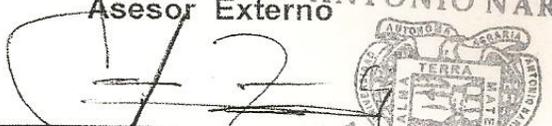
Dr. Alejandro Zermeño González  
Asesor principal



Dr. Juan P. Munguía López  
Asesor Externo



Dr. Marco Antonio Castillo Camponeros  
Asesor Externo



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

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México  
Diciembre 2013

Coordinación de  
Ingeniería

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"



## **DEDICATORIA**

*Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño.*

*A ti DIOS que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa.*

*Con mucho cariño principalmente a mi papa Juan Vasquez Velazquez a mi mama Francisca Rosales Vasquez que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén conmigo a mi lado. Los quiero con todo mi corazón y este trabajo es para ustedes solamente les estoy devolviendo lo que ustedes me dieron en un principio y hoy me es muy grato decirles lo hemos logrado, muchas gracias papas.*

*A mis hermanos Aldegunda, Hilario, Rosa, Valeriano, Carlota, Miguel, Inés, Luciano, Reyna y Silvia gracias por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho. A mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momento.*

*A Marisol por acompañarme, estar conmigo y apoyarme en todo momento*

*“Un hombre puede ser tan grande como él quiera. Si crees en ti mismo, tienes el coraje, la determinación, la dedicación, el hambre competitiva y estás dispuesto a sacrificar las pequeñas cosas en la vida y pagar el precio por las cosas que realmente valen la pena, se puede lograr”*

*- Vince Lombardi*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco infinitamente a **mis 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. A mis hermanos por tener la esperanza en mí y ayudarme en los momentos que más lo necesitaba.*

*A mi **Alma Mater** por brindarme cobijo y refugio cuando más lo necesitaba, por darme la oportunidad de formarme como un profesionalista y los conocimientos necesarios para formarme como Ing. Agrónomo en Irrigación así como un mejor ser humano.. A todo el personal docente que participo en mi formación como ingeniero agrónomo en irrigación.*

*Amigos y Compañeros.*

*A todos mis amigos y compañeros, de la carrera Ing. Agrónomo en Irrigación muchas gracias por estar conmigo en todo este tiempo donde he vivido momentos felices y tristes, gracias por ser mis amigos y recuerden que siempre los llevaré en mi corazón. A mis hermanos del equipo de futbol americano por compartir y dejarme vivir los mejores recuerdos que me llevo de la universidad.*

*A mis asesores:*

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

***Dr. Juan P. Munguía López** por su apoyo y colaboración que ha compartido conmigo en este trabajo de investigación; y la revisión del trabajo de tesis*

***Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso** por su apoyo en la revisión del documento de tesis.*

## INDICE DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>V</b>
<b>INDICE DE CUADROS.....</b>	<b>VII</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>IX</b>
<b>I.- INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
OBJETIVO .....	3
HIPÓTESIS .....	3
<b>II.- REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.2.- Métodos para medir el contenido de agua en el suelo.....	5
2.2.1.- Métodos directos para determinar el contenido de agua en el suelo .....	5
2.2.2.- Métodos indirectos para determinar el contenido de agua en el suelo .....	7
2.3.- Métodos para determinar la tasa de ET de cultivos. ....	14
2.3.1.- Métodos micrometeorológicos .....	14
2.3.4.- Covarianza eddy .....	19
2.3.2.- Método ET de equilibrio .....	21
2.3.3.- Lisímetros de pesada .....	23
2.4.- Estudios previos de la aplicación de mediciones de la humedad del suelo para determinar la ET de cultivos .....	24
2.5.- Estudios previos de mediciones de la humedad del suelo para determinar la ET en huertas de nogal pecanero y otras huertas.....	25
<b>III MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
3.1.-Localización del sitio de estudio.....	26

3.1.1.-Características de la huerta de nogal pecanero.....	26
1.2.-Sistema de riego utilizado .....	27
3.2.- Sensores, características, profundidad y frecuencia de mediciones de la humedad del suelo.....	28
3.2.1.-Calibración de las sondas TDR.....	29
3.2.2.- Determinación de la tasa diaria de ET con los datos de las sondas. ....	31
3.3.- Comparación de la evapotranspiración obtenida con las mediciones de las sondas TDR con la obtenida con el método de la covarianza eddy y el de la evaporación a equilibrio.....	31
3.3.1.-Determinación de la evapotranspiración del cultivo con el método de la covarianza eddy.....	31
3.3.2.-Determinación de la evapotranspiración a equilibrio.....	33
<b>IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>35</b>
4.1.- Propiedades físicas del suelo del sitio de estudio.....	35
4.2.- Ecuaciones de calibración .....	35
4.3.- Contenido de agua en el suelo determinado con las sondas TDR. ....	36
4.4.- Lamina evapotranspirada con mediciones de las sondas TDR.....	39
4.4.1.- Evapotranspiración total mensual .....	41
4.5.- Evaluación de la tasa de evapotranspiración mensual obtenida con las sondas TDR con la obtenida con el método de la covarianza eddy y el de la evaporación a equilibrio.....	43
<b>V.- CONCLUSIONES .....</b>	<b>45</b>
<b>VI.- BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>46</b>

## INDICE DE CUADROS

CUADRO 1 VALORES DE DENSIDAD APARENTE (PB), CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE), PH Y LA CLASE TEXTURAL POR ESTRATOS DE 30 CM. ....	35
CUADRO 2 ECUACIONES DE CALIBRACIÓN DE LAS SONDAS TDR EN LOS DIFERENTES ESTRATOS DEL SUELO. ....	36

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 CROQUIS DE LA UBICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN UTILIZADO EN LA HUERTA Y DISTRIBUCIÓN DE LOS ÁRBOLES DE NOGAL PACANERO ZARAGOZA COAHUILA.....	27
FIGURA 2 INSTALACIÓN DE LOS SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO (TDR) A LAS PROFUNDIDADES DE 0-30, 30-60, 60-90, 90-120 Y 120-150 CM EN UNA HUERTA DE NOGAL PACANERO ZARAGOZA COAHUILA. ....	29
FIGURA 3 CONTENIDOS DE HUMEDAD EN BASE A VOLUMEN MEDIDOS POR LOS TDR A LAS PROFUNDIDADES (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 Y 120-150 CM) PARA EL MES DE MARZO 2012 EN LA HUERTA DE NOGAL PECANERO EN ZARAGOZA COAHUILA.....	37
FIGURA 4 CONTENIDOS DE HUMEDAD EN BASE A VOLUMEN MEDIDOS POR LOS TDR A LAS PROFUNDIDADES (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 Y 120-150 CM) PARA EL MES DE MAYO 2012 EN LA HUERTA DE NOGAL PECANERO EN ZARAGOZA COAHUILA. ....	38
FIGURA 5 CONTENIDOS DE HUMEDAD EN BASE A VOLUMEN MEDIDOS POR LOS TDR A LAS PROFUNDIDADES (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 Y 120-150 CM) PARA EL MES DE JUNIO 2012 EN LA HUERTA DE NOGAL PECANERO EN ZARAGOZA COAHUILA. ....	39
FIGURA 6 EVAPOTRANSPIRACIÓN DIARIA (MM) DE LOS ÁRBOLES DE LA HUERTA DE NOGAL PECANERO EN ZARAGOZA COAHUILA, MEDIDA CON LAS SONDAS TDR DURANTE MARZO DE 2012.....	40
FIGURA 7 EVAPOTRANSPIRACIÓN DIARIA (MM) DE LOS ÁRBOLES DE LA HUERTA DE NOGAL PECANERO EN ZARAGOZA COAHUILA, MEDIDA CON LAS SONDAS TDR DURANTE JULIO DE 2012.....	41
FIGURA 8 EVAPOTRANSPIRACIÓN DIARIA (MM) DE LOS ÁRBOLES DE LA HUERTA DE NOGAL PECANERO EN ZARAGOZA COAHUILA, MEDIDA CON LAS SONDAS TDR DURANTE SEPTIEMBRE DE 2012.....	41
FIGURA 9 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL MENSUAL DE MARZO A SEPTIEMBRE DE 2012 EN LA HUERTA DE NOGAL PECANERO EN ZARAGOZA COAHUILA.....	42
FIGURA 10 EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL DE MARZO A SEPTIEMBRE DE 2012, COMPARANDO LOS TRES MÉTODOS TDR, COVARIANZA EDDY Y ETEQU EN LA HUERTA DE NOGAL PECANERO ZARAGOZA COAHUILA. ....	44

# TASA DIARIA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UNA HUERTA DE NOGAL PECANERO CON MEDICIONES DE LA HUMEDAD DEL SUELO

Juan Carlos Vásquez Rosales

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar la evapotranspiración diaria de los árboles de una huerta de nogal pacanero [*Carya Illinoensis*], con mediciones de la humedad del suelo y su relación con la evapotranspiración determinada con el método de la covarianza eddy y el de la evaporación a equilibrio. El estudio se realizó, en una huerta de nogal pecanero [*Carya Illinoensis*], en la pequeña propiedad Las Tres Marías en el municipio de Zaragoza Coahuila. Para estimar el consumo diario de agua por los arboles de la huerta se utilizaron sensores TDR (reflectometría en el dominio del tiempo). El contenido de humedad se midió diariamente las 24 h del día, utilizando los datos de contenido de agua en el suelo, generados por los sensores TDR a las profundidades .de 0.30, 0.60, 0.90, 1.2 y 1.5 m. Los resultados de este estudio mostraron que la tasa de evapotranspiración mensual obtenida con los sensores TDR es similar a la obtenida con el método de la covarianza eddy y el de la evaporación a equilibrio.

Se observó que los datos de evapotranspiración mensual (marzo a septiembre) obtenidos con mediciones de la humedad del suelo (sonda TDR), método de la covarianza eddy y método de la evaporación a equilibrio son estadísticamente iguales ( $\alpha \leq 0.05$ ) de acuerdo con la prueba T student.

**Palabras clave:** sensor TDR, contenido de humedad, nogal pecanero

## I.- INTRODUCCIÓN

El nogal pecanero (*Carya illinoensis Koch.*) es un frutal de gran importancia a nivel mundial, ya que se tiene establecida una superficie aproximada de 307 mil ha. Los principales países productores son: Estados Unidos (72 %) y México (25 %). La superficie de nogal sembrada en México aumento de 38 mil ha en 1980 a 98 mil ha en 2012 (150 %) (SAGARPA-SIAP, 2012). Los estados Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango y Nuevo León, representan el 97.31% del total de la producción. En el estado de Coahuila se tiene establecida una superficie de 15 mil ha, que corresponde al 16.1% de la superficie total nacional, con una producción de 12 091.81 ton y un rendimiento promedio de 1.24 t ha<sup>-1</sup>. (SAGARPA-SIAP, 2012). Para el año 2012, la superficie cosechada en México fue alrededor de 69 mil Ha, con un rendimiento promedio de 1.58 t ha<sup>-1</sup> lo que genera una derrama superior a 4 millones de pesos (SAGARPA-SIAP, 2012).

Uno de los factores más importantes en la producción del nogal, es el suministro adecuado y oportuno del riego. Para esto, es necesario determinar el consumo diario de agua por los árboles de la huerta (Chávez et al. 2006; Wang et al., 2007). Para obtener altos rendimientos y buena calidad de la nuez, es indispensable mantener niveles óptimos de humedad en el suelo, esto se logra conociendo el consumo diario de agua por evapotranspiración de los árboles de la huerta (Godoy y López, 2000)

Existen diferentes métodos para determinar la humedad del suelo (Ponizovsky *et al.* 1999; Seyfried y Murdock, 2004) que se clasifican en métodos directos e indirectos. Los directos permiten medir directamente el contenido de agua en el suelo (Florentino, 2006), como el método gravimétrico (Raj, 2007) y el lisímetro de pesada (Tuñón, 2000). Los indirectos se basan en la medida de alguna propiedad física del suelo que depende del contenido de agua (Florentino, 2006), como el uso de tensiómetros (Enciso *et al.*, 2007) bloques de resistencia (Hanson *et al.*, 2004), Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) (Cassel *et al.*, 1994) y Reflectometría en el dominio de las frecuencias (Ferre y Topp, 2002).

Estudios previos han mostrado el uso y aplicación de diferentes métodos de medición de la humedad del suelo en la programación de la irrigación de cultivos. Por ejemplo, (Castro *et al.*, 2008) usaron el método del TDR para la programación de los riegos en el cultivo de calabaza. Mientras que (Schwankl y Schulbach., 1998) usaron tensiómetros para el control del riego en el cultivo de nogal, indicando que los riegos se deben aplicar cuando la tensión de la humedad del suelo este entre 50 y 70 kPa a una profundidad de 45 a 60 cm.

## **OBJETIVO**

El objetivo de este estudio fue determinar la evapotranspiración diaria de los árboles de una huerta de nogal pacanero, con mediciones de la humedad del suelo y su relación con la tasa de evapotranspiración determinada con el método de la covarianza eddy y el de evaporación a equilibrio.

## **HIPÓTESIS**

La tasa diaria de evapotranspiración de los árboles de una huerta de nogal pecanero se puede determinar con mediciones continuas de la humedad del perfil del suelo de mayor actividad radicular, utilizando sondas TDR

## II.- REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1.- Importancia del nogal pecanero en México, zonas de establecimiento, superficies establecidas y rendimientos promedio.

El Nogal Pecanero es un árbol muy vigoroso y longevo que puede superar los 30 metros de altura. Inicia su vida productiva entre los 6 y 10 años de edad y continua produciendo en niveles óptimos y comerciales durante poco más de 50 años, sin embargo, con un buen manejo técnico se puede alargar su vida productiva, teniendo casos de árboles en producción de hasta 100 años (Puente, 2002).

Como consecuencia de los esfuerzos realizados tanto en investigación como en la modernización de los sistemas de producción, en los últimos años se ha logrado incrementar el rendimiento promedio de producción nacional de nuez pecanera de manera tal que se han obtenido incrementos de 1.08 ton ha<sup>-1</sup> en 1996 a 1.39 ton ha<sup>-1</sup> en 2001, lo que representa 28.7% de incremento.

Actualmente en México se encuentran establecidas a un total de 98,611 ha. En el 2012; se registró una producción de 110,604 toneladas, Los estados que cuentan con condiciones favorables para la producción de nuez son: Chihuahua (60,243 has), Coahuila (15,962 has), Sonora (9,561 has), Durango (5,972 has) y Nuevo León (4,218 has ); y a menor escala tenemos a Nuevo León (1,959 has), Zacatecas (1,206 has) y Chiapas (1,192 has). Los estados mencionados son los principales productores en el país; actualmente

tienen un rendimiento promedio de 1.58 toneladas por hectárea. (SAGARPA-SIAP, 2012).

## **2.2.- Métodos para medir el contenido de agua en el suelo**

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).

A través de los años se han desarrollado métodos e instrumentos de varios tipos para determinar el contenido de la humedad del suelo. La información obtenida sirve de guía al agricultor o empresario agrícola para determinar la necesidad de riego de sus cultivos, dicha información también es de gran utilidad para realizar un manejo de riego eficiente que proporcione las cantidades adecuadas de humedad. Esto a largo o corto plazo significara un ahorro de tiempo y dinero ya que no incurre perdidas en rendimiento o consecuencia de exceso o insuficiencia de riego (Raj, 2007). La determinación de la humedad del suelo se puede realizar con métodos directos e indirectos.

### **2.2.1.- Métodos directos para determinar el contenido de agua en el suelo**

#### **Método gravimétrico.**

Es un método que consiste en la determinación del contenido de agua de una muestra de suelo mediante su desecación en un horno o estufa. Este método requiere el uso de ciertos equipos de laboratorio que sean precisos para obtener una buena determinación y también requiere de cierta destreza por parte del operador para poder realizar un procedimiento confiable (Rivera *et al.*, 2007).

El procedimiento consiste en tomar muestras de suelo en el campo, se colocan en envases herméticamente cerrados y se trasladan al laboratorio; se pesan en húmedo, se colocan en estufa a 105 °C, mínimo por 24 h, hasta peso constante. Con esto se calcula el contenido de humedad (%H). Es el método más utilizado para medir agua en el suelo y es una técnica estándar usada comúnmente para obtener datos referenciales de contenido de agua en el suelo, y para la construcción de las curvas de calibración, cuando se utilizan otros métodos y equipos (Florentino, 2006 y Raj, 2007).

El contenido total de agua en el suelo se obtiene de la siguiente ecuación:

$$PW = \frac{(SW - Sd)}{Sd} X 100 \quad (1)$$

Dónde:

PW: porcentaje de humedad por peso;

SW: peso de la muestra humedad;

Sd: peso de la muestra seca al horno a 105 °C por 24 horas.

Ecuación para determinar el porcentaje de humedad por volumen es la siguiente:

$$P.V. = Pw \times \frac{Da}{D(H_2O)} \quad (2)$$

Donde

P.V: Porcentaje de agua por volumen;

Pw: porcentaje de humedad por peso;

Da: densidad aparente;

D (H<sub>2</sub>O): densidad del agua.

La ventaja de este método es su precisión si el mismo se realiza con destreza y cuidado. La desventaja principal es el gran tiempo requerido (24 hr) para llevar a cabo el procedimiento y se requiere una gran cantidad de muestras si no hay homogeneidad del suelo (Rivera *et al.*, 2007).

### **2.2.2.- Métodos indirectos para determinar el contenido de agua en el suelo**

**TDR (Time Domain Reflectometry).**

La técnica TDR presenta diversas aplicaciones industriales en el campo de la electrónica, ideadas en su momento para detectar anomalías en las líneas de transmisión eléctrica, también se utiliza para conocer la respuesta del campo eléctrico de los constituyentes del suelo. En las dos últimas décadas, muchos investigadores han utilizados esta metodología para medir el volumen de agua edáfica a partir de la influencia de la humedad sobre las propiedades eléctricas del suelo. Topp *et al.* (1980), Topp y Davis (1985), Dasberg y Dalton (1985), establecieron los principios que relacionaban la constante dieléctrica del suelo (K) con el volumen de agua ( $\Theta$ ) contenido en sus poros. El principio se basa en el alto valor de la constante dieléctrica del agua (80), frente a la de otros elementos como el aire (1) y las fracciones minerales y orgánica (entre 3 y 7) presentes en el suelo.

La técnica TDR utiliza la correlación existente entre el tiempo de tránsito de una onda electromagnética introducida en el suelo, la constante dieléctrica de este y el contenido volumétrico de humedad (Cassel *et al.*, 1994).

La velocidad de propagación,  $V_p$  de la onda generada por el TDR o ecómetro viene dada por:

$$V_p = \frac{L}{t} \quad (3)$$

Donde

L: es la distancia a la que viaja la onda a lo largo de la línea de transmisión; t: es el tiempo requerido.

El ecómetro registra el viaje de ida y vuelta a lo largo de las líneas de transmisión, entonces, quedaría de la siguiente manera:

$$Vp = \frac{2l}{t} \quad (4)$$

Donde

l: longitud de las varillas de la sonda o líneas de transmisión.

La velocidad de propagación de una onda también puede escribirse como:

$$Vp = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (5)$$

Donde

c: Velocidad de la luz en el vacío; K: constante dieléctrica relativa del medio.

Despejando K, resulta:

$$K = \left(\frac{ct}{2l}\right)^2 \quad (6)$$

Topp *et al.* (1980), a partir de la experimentación con un amplio rango de materiales porosos y contenidos de humedad, obtuvieron la siguiente ecuación empírica que relaciona K y el contenido de humedad volumétrica del suelo,  $\theta$  ( $\text{cm}^3\text{Cm}^3$ )

$$\theta = -5.3x10^{-2} + 2.92x10^{-2}K - 5.5x10^{-4}K^{-4} + 4.3x10^{-6}K^3 \quad (7)$$

La técnica TDR ofrece una serie de ventajas entre las que destacan la rapidez de las mediciones, la posibilidad de realizarlas en un mismo punto de forma continuada, establecer el perfil de humedad de un suelo mediante sondas instaladas a diferentes profundidades, un alto grado de precisión de las mediciones y un mínimo impacto sobre el terreno. La desventaja que tiene es el alto costo del aparato, muy difícil de instalar correctamente y abarca un pequeño volumen de suelo. (Dalton, 1992).

### **Emisor de neutrones**

La sonda emisora de neutrones es una técnica de prueba eficaz para medir el contenido total de agua en el suelo por volumen de suelo al calcular la cantidad de hidrogeno presente (Zermeño-González *et al.*, 2012).

Las sondas de neutrones consisten en una unidad hecha de una fuente de neutrones rápidas y de alta energía (fuente de radioactividad encapsulada) y de un detector. Esta sonda se introduce en un tubo de acceso de PVC o aluminio a la profundidad deseada con la ayuda de sujetadores unidos a un cable. Una unidad de control, la cual permanece en la superficie, se conecta al cable.

Los neutrones rápidos son termalizados cuando ellos chocan con un cuerpo de masa similar, tales como los núcleos de hidrogeno. La energía de los neutrones es transmitida a los protones y el “rebote o choque” neutrónico es

mucho más bajo. Este principio ha sido adoptado para estimar la densidad del núcleo de hidrogeno en el suelo. En la mayoría de los suelos el hidrogeno es asociado con el agua del suelo, aunque en suelos orgánicos o densamente enraizados este no sería el caso. Los neutrones rápidos son emitidos desde una fuente (Am–Be) en un tubo instalado en el suelo; los neutrones lentos son contabilizados por un detector. El número de neutrones lentos detectados es proporcional al número de colisiones entre neutrones y núcleos de hidrogeno, los cuales reflejan el contenido de agua del suelo (Van Bavel *et al.*, 1954).

Las técnicas neutrónicas han sido utilizadas en una amplia variedad de sistemas especialmente agrícolas, ecosistemas naturales y pastizales. Esta técnica es más adecuada para suelos profundos, en suelos con estructura fina donde los tubos de acceso para la sonda sean fácilmente instalados. Los tubos de acceso pueden ser de acero, aluminio o PVC y los diámetros usados generalmente son de 4 o de 5 cm que es de mayor disponibilidad. Dependiendo de las propiedades del suelo, el contenido de agua del suelo y el tipo de material del tubo utilizado (acero, cobre o PVC) los neutrones de la sonda muestrean una esfera de suelo con un radio de 10-30 cm. Este radio hace difícil una medida adecuada del contenido de agua del suelo en la superficie, obteniéndose conteos extremadamente bajos (Hanna y Siam, 1980).

Las ventajas son: se puede sondear un volumen mayor de suelo y es relativamente independiente del tipo de suelo y es posible determinar el porcentaje de humedad del suelo por volumen a cualquier profundidad, sin

necesidad de extraer muestras. Las principales desventajas son: que el equipo es caro y aplicable únicamente con fines de investigación, envuelve el uso de una fuente radioactiva por lo cual el operador debe de tener cierto grado de destreza y conocimiento para operar (Raj, 2007 y Zermeño-González *et al.*, 2012).

### **Tensiómetro**

Es un instrumento que indica la tensión con que el agua está adherida a las partículas del suelo. Es uno de los métodos usados para indicar, en forma relativa, si en el suelo existe suficiente humedad disponible para el crecimiento de las plantas. Los cambios que ocurren en el espesor de la capa (película) de agua que rodea las partículas del suelo alteran la tensión del agua en el mismo. Estos cambios se expresan en fluctuaciones de tensión de la humedad en el suelo. En la práctica, el tensiómetro mide los rangos de humedad de suelo bajo las cuales las raíces de las plantas absorben activamente el agua (Raj, 2007).

Las ventajas del tensiómetro son: buena guía para determinar cuándo aplicar el agua de riego; puede utilizarse para determinar el movimiento vertical y horizontal de la humedad del suelo; proporciona una medida directa de la tensión de retención de agua en el suelo. Las desventajas son: después de 80 kPa de tensión entra aire a la copa cerámica porosa, al ocurrir esto las lecturas ya no son confiables; se colocan en un sitio fijo y no puede moverse de un lugar a otro, debido a que no mide el contenido de agua en el suelo, es necesario

contar con la relación entre contenido de humedad y tensión para determinar la lámina de agua por aplicar (Rivera *et al.*, 2007).

### **Bloques de resistencia eléctrica**

El uso de bloques de resistencia eléctrica, o “bloques de yeso” como se les conoce normalmente, se basa en los cambios de resistencia eléctrica o conductividad de soluciones en un bloque poroso de yeso. Estos cambios son causados por las variaciones en el contenido de agua de los bloques, controladas por la tensión relativa de la solución.

Los bloques de yeso solamente pueden utilizarse con cultivos que tengan sistemas radiculares bien desarrollados y que se distribuyan uniformemente en el perfil, ya que se requiere un cierto tiempo de respuesta del bloque frente a variaciones en el contenido de agua en el suelo (Gurovich, 1985).

Su uso consiste en humedecer el bloque a saturación antes de su instalación en campo. Se entierra el bloque a la profundidad de lectura deseada procurando que el suelo quede bien compactado alrededor del bloque, pero perturbando mínimamente el suelo. Pasando un tiempo en el que se deja equilibrar con la solución del suelo, se pueden hacer lecturas. La lectura se efectúa directamente sobre la escala y se interpola el valor en la gráfica de calibración (Muñoz y Ritter, 2005).

Las ventajas de este método son: provee ayuda para estimar el contenido de agua en el suelo; son fiables; bajo costo; permite automatización de los registros, almacenar lecturas en data-logger; lecturas continuas y rápidas medidas *in situ*. Las desventajas son: la vida útil del bloque es limitada; son inefectivos cuando la tensión del suelo es menor de 100 kPa; debe ser calibrado individualmente, corta vida útil, es difícil precisar la exactitud de las medidas debido a las fuentes de error las cuales pueden ser calibración, materiales, instalación, etc. (García-Petillo, 2008 y Zermeño-González *et al.*, 2012).

### **2.3.- Métodos para determinar la tasa de ET de cultivos.**

#### **2.3.1.- Métodos micrometeorológicos**

Se refiere a las condiciones meteorológicas de áreas pequeñas y están condicionados por la cobertura del terreno, tipo de cultivo, densidad de plantación o siembra, arquitectura de la planta y área sombreada.

Entre las aplicaciones agrícolas específicas de la micrometeorología se cuentan la determinación de los perfiles de la velocidad del viento, temperatura, humedad atmosférica y concentración de dióxido de carbono en el cultivo; conocer los flujos de radiación solar y de energía dentro de las plantaciones; predecir la temperatura y humedad en el suelo; estimar la evapotranspiración así como el intercambio de dióxido de carbono (Jaramillo-Robledo, 2005).

El principio básico de los métodos micrometeorológicos consiste en medir los componentes de la ecuación del balance de energía para una superficie vegetal.

Zermeño-González (2001) indica que los principales métodos micrometeorológicos son tres: 1) Relación Bowen, 2) Aerodinámico y 3) Covarianza eddy.

### **Método de relación Bowen**

Este método asume que el mecanismo de transporte del flujo de calor latente y calor sensible son idénticos. El método requiere mediciones simultáneas de los gradientes de temperatura y densidad de vapor de agua cercanas a la superficie en estudio, así como la radiación neta y el flujo de calor en el suelo (Munguía, 2000).

El método de la relación de Bowen ha sido empleado por muchos investigadores para medir el flujo de calor y vapor de agua en diferentes cultivos. Partiendo de la ecuación del balance de energía, y definiendo B como la relación entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente ( $B = H / LE$ ), se tiene que:

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + B} \quad (8)$$

El flujo de calor sensible se obtiene a partir del valor de LE y de B:

$$H = B \times LE \quad (9)$$

El valor de la relación Bowen se obtiene a partir de las relaciones de gradiente flujo. Los flujos de calor sensible, calor latente y bióxido de carbono se pueden expresar como:

$$H = \rho C_p K_h \frac{\partial \bar{T}}{\partial Z} \quad (10)$$

$$LE = \lambda \rho K_w \frac{\partial \bar{q}}{\partial Z} \quad (11)$$

$$F_{CO_2} = K_{CO_2} \frac{\partial \overline{\rho c_{CO_2}}}{\partial Z} \quad (12)$$

Dónde:  $K_h$ ,  $K_w$  y  $K_{CO_2}$ , son coeficientes de difusividad turbulenta (*covarianza eddy*) para calor sensible, calor latente y flujo de  $CO_2$ ;  $\partial T/\partial Z$ ,  $\partial q/\partial Z$ ,  $\partial c_{CO_2}/\partial Z$  son los gradientes verticales promedio de temperatura del aire, humedad específica y concentración de bióxido de carbono;  $\rho$  y  $C_p$  son la densidad y capacidad calorífica del aire respectivamente y  $\lambda$  es el calor de vaporización del agua.

Puede asumirse que los gradientes verticales promedio de temperatura y humedad específica se pueden aproximar con las diferencias verticales promedio, de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial Z} \approx \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta Z} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial Z} \approx \frac{\Delta \bar{q}}{\Delta Z} \quad (14)$$

Con estas consideraciones, la relación Bowen se puede escribir como

sigue:

$$B = \frac{H}{LE} = \frac{\rho C_p K_h \frac{\partial \bar{T}}{\partial Z}}{\lambda \rho K_w \frac{\Delta \bar{q}}{\Delta Z}} \quad (15)$$

Si se asume que  $K_h$  y  $K_w$  son iguales por la teoría de la similitud y si se define  $\gamma = C_p/\lambda$ , se tiene que:

$$B = \gamma \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \bar{q}} \quad (16)$$

(Munguía 2000; Zermeño-González 2001).

Fritschen (1966) afirma que el método de relación de Bowen puede emplearse para obtener tasas de evapotranspiración en períodos cortos bajo condiciones de campo y que parece ser uno de los pocos métodos que proporcione resultados válidos cuando los cultivos son tratados con riegos frecuentes y pesados.

Sin embargo, Angus y Watts (1984) dicen que en ambientes húmedos, el método de balance de energía para determinar la evapotranspiración puede dar buenos resultados, pero el método puede ser no tan preciso en condiciones muy secas o aun en condiciones húmedas con considerable advección de energía. En el primer caso, el error relativo en la evapotranspiración puede mantenerse pequeño si el error relativo es igualmente pequeño en la relación de Bowen. Sin embargo, en condiciones secas, el error absoluto en la evapotranspiración es siempre pequeño debido al valor pequeño de la misma evapotranspiración. El análisis del efecto de errores en los gradientes de

temperatura en los bulbos húmedo y seco muestra que en condiciones muy secas, la precisión requerida durante la medición de esos gradientes es un orden de magnitud mayor de lo que razonablemente podría esperarse de la mayoría de los equipos usados para la relación de Bowen.

El método de balance de energía de Bowen para medir la evapotranspiración aun es atractivo dado su bajo costo y su confiabilidad.

### **Método aerodinámico**

En este método, el coeficiente de difusividad turbulenta se deriva a partir de la ecuación de flujo de momento y la relación de perfil del viento sobre el dosel (Zermeño-González, 2001). Éste es un método micrometeorológico con fundamento fisicoteórico de la dinámica de los fluidos y del transporte turbulento (Pereira, 2006). Entre los métodos aerodinámicos se pueden mencionar aquellos que se basan en el transporte de masa, como es el caso del método de Thornthwaite-Holzman, los aerodinámicos propiamente dichos, los métodos de correlación de transporte turbulento y los mixtos que consideran tanto el balance de energía como el componente aerodinámico. Entre éstos pueden mencionarse los métodos de Penman, Van Bavel y aquellos que involucran la resistencia de la planta al transporte de vapor de agua, como el método de Penman-Monteith (Villaman *et al*, 2001).

#### 2.3.4.- Covarianza eddy

El método de covarianza Eddy es una técnica muy útil para medir y calcular flujos turbulentos en la capa atmosférica más próxima a la superficie terráquea. Castellví (2007) y Sammis *et al* (2004), los cuales son: la componente vertical instantánea de la velocidad del viento mediante, concentraciones instantáneas de vapor de agua, bióxido de carbono u cualquier otro gas.

La importancia de la técnica covarianza eddy en la posibilidad de medir flujos directamente reales de un compuesto sin causar perturbación en el ecosistema. Baldocchi (2003).

El método está basado en la descomposición de Reynolds y mide la covarianza de las fluctuaciones turbulentas de la componente vertical de la velocidad del aire y la humedad, así como los componentes principales de la ecuación del balance de energía para una superficie vegetal:

$$R_n - G = H + L \quad (17)$$

$R_n$ = Radiación neta,  $G$ = flujo de calor en el suelo,  $H$ = flujo de calor sensible y  $L$ = flujo de calor latente. En este método hay aspectos técnicos que ocasionan que las mediciones de calor latente de vaporización del agua ( $L_E$ ) no sean muy precisas. El problema reside en la imposibilidad de medir la velocidad del viento y la humedad en un mismo punto y en seleccionar un período de flujo estacionario e imponer que la velocidad vertical promedio sea nula. A pesar de esto, dado que el instrumental del CE es transportable, es un método muy versátil y atractivo (Castellví, 2007).

Las mediciones del flujo de calor latente ( $LE$ ) y del flujo de calor sensible ( $H$ ), se realizaron con el método de la covarianza de eddy usando las siguientes relaciones (Ham y Heilman, 2003):

$$LE = \overline{Lw'\rho_{ww'}} \quad (18)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w'Ts'} - 0.51Ta \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (19)$$

donde,  $\rho_a$  y  $C_p$  = densidad y capacidad calorífica del aire;  $L$  = calor de vaporización del agua;  $Ta$  = temperatura del aire. Los productos  $\overline{w'\rho_{ww'}}$  y  $\overline{w'Ts'}$  representan la covarianza entre la velocidad vertical del viento ( $w$ ) y la densidad del vapor de agua ( $\rho_{ww}$ ) y la temperatura sónica ( $Ts$ ). La temperatura sónica (°C) se obtiene de las mediciones de la velocidad del sonido y la velocidad tridimensional del viento. La barra horizontal representa el valor medio del producto de las desviaciones en un intervalo de tiempo.

El método de covarianza de eddy provee una medición directa de la densidad del flujo de calor latente y de la densidad del flujo de calor sensible, aunque este método requiere de considerable experiencia y de instrumental caro. Una clara ventaja de usar este método es que la densidad del flujo de calor latente puede ser comparado con  $Rn - G - H$ , permitiendo así una prueba independiente de precisión (Drexler *et al.*, 2004), a diferencia del método aerodinámico y el de la relación Bowen, la covarianza eddy es un método directo para medir los flujos superficiales, sin la necesidad de asumir coeficientes de similitud, ni condiciones de estabilidad atmosférica (Kanemasu *et al.*, 1979).

### 2.3.2.- Método ET de equilibrio

Cuando no existe limitación de agua en una superficie evaporante y la atmósfera se mantiene en equilibrio con la superficie. Pérez y Castellví (2002), se tiene entonces una evapotranspiración a equilibrio que se describe con la siguiente ecuación:

$$LE_{equ} = \frac{S}{S - \gamma} (Rn - G) \quad (20)$$

Donde:

S es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación a la temperatura del aire ( $\text{Pa K}^{-1}$ );  $Rn$  y  $G$  son la radiación neta y el flujo de calor en el suelo ( $\text{W m}^{-2}$ ) respectivamente; y  $\gamma$  es la constante psicométrica de la localidad ( $\text{Pa K}^{-1}$ ), es un factor de valor constante igual a **1.26** para superficies saturadas.

Sin embargo, muchos autores reportan diferentes valores e intervalos debido a que depende del flujo vertical de calor sensible, del efecto de advección y de la temperatura y velocidad del viento (Pérez y Castellví, 2002), Jyane y Zermeño (2003), la que se obtiene con la siguiente relación:

$$\gamma = \frac{P * CP}{0.622L} \quad (21)$$

En donde P es la presión barométrica de la localidad (Pa); Cp es la capacidad calorífica del aire ( $\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ); y L es el calor de vaporización del agua ( $\text{J Kg}^{-1}$ ),

Lhomme (1996) dice que los primeros en introducir el concepto de evaporación a equilibrio fueron Slatyer y McIlroy, en 1972. Ellos definían este concepto como el límite alcanzado cuando una masa de aire no saturado está en contacto con una superficie húmeda sobre un fetch largo. Esto es dado por:

$$\lambda E_o = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1} (Rn - G) \quad (22)$$

En donde:  $E_o$  es la evaporación a equilibrio,  $(Rn - G)$  es la energía disponible,  $\varepsilon$  es la pendiente adimensional de la saturación de humedad específica a la temperatura del aire y  $\lambda$  es el calor latente de vaporización.

Priestley y Taylor (1972) concluyeron que raramente se obtenía la situación de equilibrio, incluso sobre superficies de agua líquida, y en consecuencia propusieron una ecuación del tipo:

$$\alpha = \frac{LE}{\frac{S}{S + \gamma} (Rn - G)} \quad (23)$$

En donde  $\alpha$  es un factor de valor constante igual a **1.26** para superficies saturadas. Sin embargo, muchos autores reportan diferentes valores e intervalos debido a que depende del flujo vertical de calor sensible, del efecto de advección y de la temperatura y velocidad del viento (Pérez y Castellví, 2002). Jyane y Zermeño (2003) reportaron que el factor  $\alpha$  tiene un valor de **1.24** para las condiciones climáticas de la Comarca Lagunera de Coahuila-Durango, México.

### **2.3.3.- Lisímetros de pesada**

Un lisímetro es un gran recipiente que encierra una determinada porción de suelo con superficie desnuda o con cubierta vegetal, ubicado en campo para representar condiciones naturales y que se utiliza para determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento, de una cubierta vegetal de referencia, o la evaporación de un suelo desnudo (Santa-Olalla *et al.*, 2005).

Los lisímetros pueden ser divididos en dos grandes grupos, los lisímetros de pesada y los de drenaje, dentro de los drenajes se pueden encontrar con o sin succión, la diferencia entre estos es que los de drenaje sin succión recolectan el agua del suelo que se filtra naturalmente hacia abajo por los suelos, es decir, el agua que se mueve por efecto de la gravedad y en los lisímetros de drenaje con succión se aplica una succión para extraer el agua del suelo despacio a través de un material poroso.

Los lisímetros fueron diseñados para captar el agua de infiltración, y los de pesada, (mucho más costosos que los de drenaje), fueron concebidos para el cálculo de la evapotranspiración. El lisímetro de pesada se apoya sobre un sistema hidráulico o una balanza de precisión. Los lisímetros de drenaje tienen una salida en el fondo, de manera que el agua que se infiltra es recogida en un recipiente que se pueda aforar (Tuñón, 2000).

La gran diferencia entre ambos lisímetros es que los de drenaje miden la evapotranspiración de forma indirecta, resolviendo la ecuación de balance del suelo, mientras en los de pesada la evaporación se mide directamente, y según

la exactitud de la balanza puede dar precisiones de hasta 0.1 mm (Gee y Hillel, 1988).

#### **2.4.- Estudios previos de la aplicación de mediciones de la humedad del suelo para determinar la ET de cultivos**

Castro *et al* (2008), desarrollo un trabajo con el objetivo de tener un sistema de riego automatizado en tiempo real para determinar el momento oportuno y cantidad de riego en el cultivo de calabaza, se implementaron tres estrategias de riego (lisímetro, TDR y balance hídrico). Concluyeron que la estrategia de TDR presento mayor producción del cultivo y menor cantidad de agua utilizado.

Flores y Ruiz, (1998) estimaron la humedad del suelo en el cultivo de maíz mediante el modelo de balance hídrico, utilizaron método gravimétrico para cuantificar la lámina de agua contenida en el suelo, los resultados que obtenidos de la humedad disponible residual promedio observada y estimada promedio para cada año (1985-1988) en estudio, la comparación de las medias de humedad disponible observada y estima indico diferencias no significativas entre ellas.

Rodríguez y Pire, (2008) determinaron la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) diaria de un cultivo de tomates mediante un lisímetro de pesada en la zona de Tarabana, estado Lara, Venezuela. realizaron experimentos durante dos ciclos consecutivos (2004 y 2005). La ET<sub>r</sub> mediante el lisímetro de pesada fluctuó entre 2,95 mm/d. y 8,62 mm/d.

## **2.5.- Estudios previos de mediciones de la humedad del suelo para determinar la ET en huertas de nogal pecanero y otras huertas.**

Orozco (2009). Comparo dos sistemas de programación de riego en una huerta de manzano, el año 2008 la programación de riego se hizo mediante un modelo de balance hídrico, mientras que en los años 2005, 2006, 2007 no se aplicó ningún modelo. Los resultados que se obtuvieron de esta comparación que hubo ahorros significativos de agua de riego de 45% en promedio aplicando el modelo de balance hídrico.

Navajés et al. (2011) Determinaron la demanda de agua mediante la aplicación de métodos para estimar la evapotranspiración del naranjo, realizando mediciones directas de la humedad del suelo mediante el método gravimétrico, en la zona árida citrícola de Baja California Sur, México. La demanda de agua promedio se determinó en 6.8 y 5.2 mm día<sup>-1</sup>, mediante métodos indirectos y directos de estimación de la ET respectivamente, con una diferencia de 30.8% entre métodos.

Rodríguez et al. (2010) Evaluaron la Evapotranspiración real en nogal pecanero en la Viñas de la Costa de Hermosillo. Utilizando la serie de datos de ET medida el 2006 en nogal pecanero mediante técnica covarianza eddy, donde los valores medidos son comparables con los observados en nogal pecanero en otras regiones por Samani et al. (2009), y Sammis et al. (2004) en nuevo México.

### III MATERIALES Y MÉTODOS

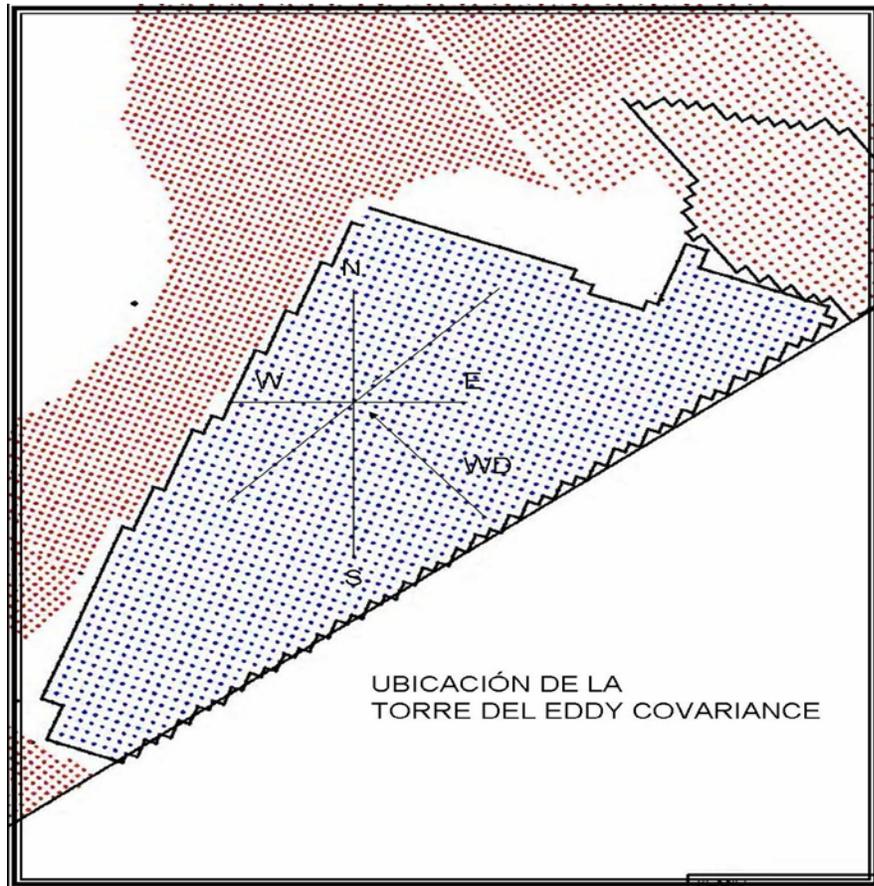
#### 3.1.-Localización del sitio de estudio

El trabajo se realizó, en una huerta de nogal pecanero [*Carya illoinensis*], en la pequeña propiedad Las Tres Marías en el municipio de Zaragoza Coahuila, Las coordenadas geográficas del sitio son: 28° 28' 31" latitud Norte, 100° 55' 10" longitud Oeste a una elevación de 360 m.

##### 3.1.1.-Características de la huerta de nogal pecanero

El estudio se desarrolló en una superficie de aproximadamente 40 ha, con árboles de las variedades Wichita, Western y Pawnee, de 28 años de edad y una altura promedio de 12 m la distribución de los árboles es en marco real a una distancia de 15m entre árboles. (Fig. 1)

El clima de la región es seco semicálido, con temperaturas medias de 22 a 24 °C, precipitación anual media 300 a 500 milímetros con un régimen de lluvias en los meses abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y escasas el resto del año, los vientos predominantes soplan en dirección sureste a velocidad de 15 km.h<sup>-1</sup>.



**Figura 1 Croquis de la ubicación de la instrumentación utilizado en la huerta y distribución de los árboles de nogal pacanero Zaragoza Coahuila**

### **1.2.-Sistema de riego utilizado**

Los árboles de la huerta se riegan con un sistema de riego por aspersión, con uno aspersor por árbol los cuales tienen un gasto de 200 LPH y funcionan a una presión de 241.32 kPa (35 libras por pulgada cuadrada), separados cada 15 m. Los riegos se aplican en un intervalo promedio de cada 10 días con a una lámina de agua de 60 mm.

### **3.2.- Sensores, características, profundidad y frecuencia de mediciones de la humedad del suelo**

Para medir la humedad del suelo, se utilizaron sondas TDR, modelo CS615 (Campbell Scientific Inc.), que están compuestas por dos varillas puntiagudas y una cabeza moldeada resistente, el sensor tiene una longitud de barrilla de 30 cm, con un diámetro de 3.2 mm separadas una distancia de 3.2 cm. Las barras permanecen rígidas en la capa en la cual se desean realizar las mediciones y descansan sobre uno de sus bordes en un cabezal de material epóxido que contiene componentes electrónicos que conforman un oscilador bi-estable. Cambios en el contenido de humedad del suelo están relacionados con el tiempo de transmisión de ondas electromagnéticas a lo largo de la sonda, los cuales están relacionados con las vibraciones reportadas en la base de la sonda. Con una Precisión:  $\pm 3\%$  típica,  $\pm 2\%$  con calibración específica del suelo

Se instalaron 5 sondas TDR a cada 0.30 m de profundidad (0.0–0.30, 0.30-0.60, 0.60-0.90, 0.90-1.20, 1.20-1.50 m) (Figura. 2).



**Figura 2 Instalación de los sensores de humedad del suelo (TDR) a las profundidades de 0-30, 30-60, 60-90, 90-120 y 120-150 cm en una huerta de nogal pacanero Zaragoza Coahuila.**

### **3.2.1.-Calibración de las sondas TDR**

Existen varios factores que pueden afectar las mediciones realizadas por un TDR la curva de calibración de fábrica para calcular el contenido de humedad en el suelo ya que son construidas bajo condiciones de laboratorio. Las condiciones del suelo que provocan imprecisión en dicha estimación son: la temperatura del suelo, los altos contenidos de arena, arcilla y sales en el medio

poroso (Yu et al., 1999). Estudios citados por Heathman et al. (2003) coinciden con lo dicho anteriormente y además agregan que la densidad aparente del suelo es otra propiedad física del suelo que provoca inconsistencias en la determinación del contenido de humedad de este medio poroso. Los factores que la afectan son principalmente tres: la textura, la estructura y la presencia de materia orgánica.

Para calibrar las sondas TDR ubicadas en los diferentes estratos, se realizaron muestreos gravimétricos de la humedad del suelo en los diferentes estratos, durante el ciclo de producción de los árboles de la huerta. Estas mediciones incluyeron rangos bajos y altos de contenido de humedad del suelo. Para cada estrato se obtuvo una ecuación de calibración con los datos de contenido de humedad obtenidos con las sondas TDR y los valores obtenidos con los muestreos gravimétricos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\theta_{vg} = B_0 + B_1 * \theta_{VTDR} \quad (24)$$

Donde:  $\theta_{vg}$  es el contenido volumétrico de humedad en el suelo obtenido con los muestreos gravimétricos,  $\theta_{VTDR}$  es el contenido volumétrico de humedad determinado con la sonda TDR,  $B_0$  y  $B_1$  son los parámetros de regresión

### **3.2.2.- Determinación de la tasa diaria de ET con los datos de las sondas.**

Para obtener las láminas de agua consumidas se utilizaron las ecuaciones de regresión obtenidas para determinar el contenido gravimétrico, en función del contenido de agua determinado con las sondas TDR. Estas determinaciones se realizaron en forma continua con mediciones cada hora durante los meses de crecimiento productivo de los árboles (marzo a septiembre). La suma del contenido de agua consumido diariamente de cada estrato, correspondió a la lámina de agua diaria evapotranspirada.

### **3.3.- Comparación de la evapotranspiración obtenida con las mediciones de las sondas TDR con la obtenida con el método de la covarianza eddy y el de la evaporación a equilibrio**

#### **3.3.1.-Determinación de la evapotranspiración del cultivo con el método de la covarianza eddy**

Las mediciones del flujo de calor latente ( $LE$ ), evapotranspiración real de los árboles de la huerta y del flujo de calor sensible ( $H$ ), se realizaron con el método de la covarianza de eddy usando las siguientes relaciones (Ham y Heilman, 2003):

$$LE = \overline{Lw'\rho_{wv}} \quad (25)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w'Ts'} - 0.51Ta \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (26)$$

Donde,  $\rho_a$  y  $C_p$  = densidad y capacidad calorífica del aire;  $L$  = calor de vaporización del agua;  $Ta$  = temperatura del aire. Los productos  $w'\rho_{wv}$  y  $w'Ts'$

representan la covarianza entre la velocidad vertical del viento ( $w$ ) y la densidad del vapor de agua ( $\rho_{wv}$ ) y la temperatura sónica ( $T_s$ ). La temperatura sónica ( $^{\circ}\text{C}$ ) se obtiene de las mediciones de la velocidad del sonido y la velocidad tridimensional del viento. La barra horizontal representa el valor medio del producto de las desviaciones en un intervalo de tiempo.

Los flujos de H y LE se corrigieron para cerrar el balance de energía, ya que el método de la covarianza de remolinos es una determinación adecuada de la relación Bowen (H/LE) (Ham y Heilman., 2003). La lámina de agua evapotranspirada para un tiempo determinado se obtuvo dividiendo LE de intervalo entre el calor de vaporización del agua. La temperatura del aire se midió a la misma altura que  $T_s$ , con un sensor de temperatura y humedad relativa (HP45C, Vaisala, Inc., Woburn, MA, USA).

Para evaluar la precisión de las mediciones de H y LE se determinó el balance de energía sobre el dosel de los árboles:

$$R_n - G = H + LE \quad (27)$$

Donde,  $R_n$  = radiación neta y  $G$  = flujo de calor en la superficie del suelo. La radiación neta se midió con un radiómetro neto colocado en la torre a 2 m sobre la copa de los árboles. El flujo de calor en la superficie del suelo se midió con dos transductores de calor colocados a 0.08 m bajo la superficie del suelo, uno de ellos en condiciones de sombra y suelo húmedo y el otro en suelo seco expuesto a la radiación solar directa. Esto se hizo para tener un valor promedio de  $G$  de la superficie de estudio con el área total sombreada

ponderada. A cada valor de  $G$  medido a 0.08 m, se sumó el cambio de energía del estrato de suelo sobre el transductor por cambios de temperatura del perfil de suelo ( $T_s$ ) sobre el sensor (Kanemasu *et al.*, 1992; Kustas *et al.*, 2000). La temperatura del suelo se midió con un termopar de cuatro puntas.

### 3.3.2.-Determinación de la evapotranspiración a equilibrio

El flujo de calor latente a equilibrio ( $LE_{equ}$ ) (Perez y Catellví, 2002) se obtuvo con la siguiente relación

$$LE_{equ} = \frac{S}{S + \gamma} [R_n - G] \quad (28)$$

Donde,  $S$  = pendiente de la curva de presión de vapor a saturación a la temperatura del aire ( $\text{Pa K}^{-1}$ );  $R_n$  y  $G$  = radiación neta y el flujo de calor en el suelo ( $\text{W m}^{-2}$ ) medidos como ya se describió;  $\gamma$  = constante psicrométrica de la localidad ( $\text{Pa K}^{-1}$ ), la que se obtuvo con la relación:

$$\gamma = \frac{PC_p}{0.622 L} \quad (29)$$

Donde,  $P$  = la presión barométrica de la localidad ( $\text{Pa}$ );  $C_p$  = capacidad calorífica del aire ( $\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ); y  $L$  = calor de vaporización del agua ( $\text{J Kg}^{-1}$ ). La lámina de agua correspondiente a la evapotranspiración a equilibrio ( $ET_{equ}$ ) se obtuvo dividiendo el flujo de calor latente a equilibrio integrado de un determinado intervalo de tiempo entre el calor de vaporización del agua ( $\lambda = 2.44 \times 10^6 \text{ J Kg}^{-1}$ ).

$$\int_{t_1}^{t_2} LE dt = \frac{J}{sm^2} s = Jm^{-2} \quad (30)$$

$$ET_{equi} = \frac{LE_{total}}{2.44 \times 10^6 J Kg^{-1}} = Kg_{H_2O} m^{-2} dia^{-1} = mmdia^{-1} \quad (31)$$

Cuando en una determinada localidad hay un efecto fuerte de advección local en la tasa de evapotranspiración de la superficie vegetal, el flujo de calor latente a equilibrio es multiplicado por un factor de advección para obtener la evapotranspiración de la superficie en función de la evapotranspiración a equilibrio (Priestley y Taylor, 1972; Pérez y Castellví, 2002; Jiyane y Zermeño-González, 2003).

El flujo de calor latente (LE) representa la fracción de evapotranspiración (Allen, 1996), por lo consecuente evapotranspiración del cultivo se puede obtener a partir de LE, corregido por el calor latente de vaporización del agua.

## IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1.- Propiedades físicas del suelo del sitio de estudio.

En el Cuadro 1 se muestran las principales propiedades físicas y químicas del suelo en estratos de 30 cm hasta una profundidad de 150 cm. Para todos los estratos, el suelo es de textura arcillosa, alcalina y no salino

**Cuadro 1 Valores de densidad aparente ( $\rho_b$ ), conductividad eléctrica (CE), pH y la clase textural por estratos de 30 cm.**

ESTRATO	$\rho_b$ (g cm <sup>3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	PH	Clase Textural
0-30	1.406	1.204	8.21	Arcilloso
30-60	1.157	1.385	8.22	Arcilloso
60-90	1.261	1.186	8.32	Arcilloso
90-120	-----	1.144	8.43	Arcilloso
120-150	-----	0.984	8.14	Arcilloso

### 4.2.- Ecuaciones de calibración

El TDR CS615 sobreestimó los valores de humedad respecto de los medidos en muestras de suelo, resultando necesaria su calibración para los diferentes estratos de registros de la sondas.

En el cuadro 2 se muestran las ecuaciones de calibración de las sondas TDR para los diferentes estratos del suelo. Fueron obtenidas mediante una regresión lineal, entre los valores obtenidos con el TDR y los valores de humedad calculados con el método gravimétrico. Para determinar el contenido de humedad volumétrico del suelo a partir de las sondas TDR. Las ecuaciones

de predicción arrojadas por el análisis de regresión resultaron con valores de R2 ajustado para los diferentes estratos en un 90 % en promedio.

**Cuadro 2 Ecuaciones de calibración de las sondas TDR en los diferentes estratos del suelo.**

Estratos (cm)	Ecuaciones de calibración
0-30	$\theta_{vg} = 0.0602 + 0.6191 * \theta_{V_{TDR}}$
30-60	$\theta_{vg} = 0.0217 + 0.6125 * \theta_{V_{TDR}}$
60-90	$\theta_{vg} = -0.0169 + 0.6059 * \theta_{V_{TDR}}$
90-120	$\theta_{vg} = -0.0169 + 0.6059 * \theta_{V_{TDR}}$
120-150	$\theta_{vg} = -0.0169 + 0.6059 * \theta_{V_{TDR}}$

Estas ecuaciones (Cuadro 2) se utilizaron para obtener el valor del contenido de agua en los diferentes estratos en forma continua (un dato cada media hora) durante todo el ciclo de crecimiento de los árboles de marzo a septiembre.

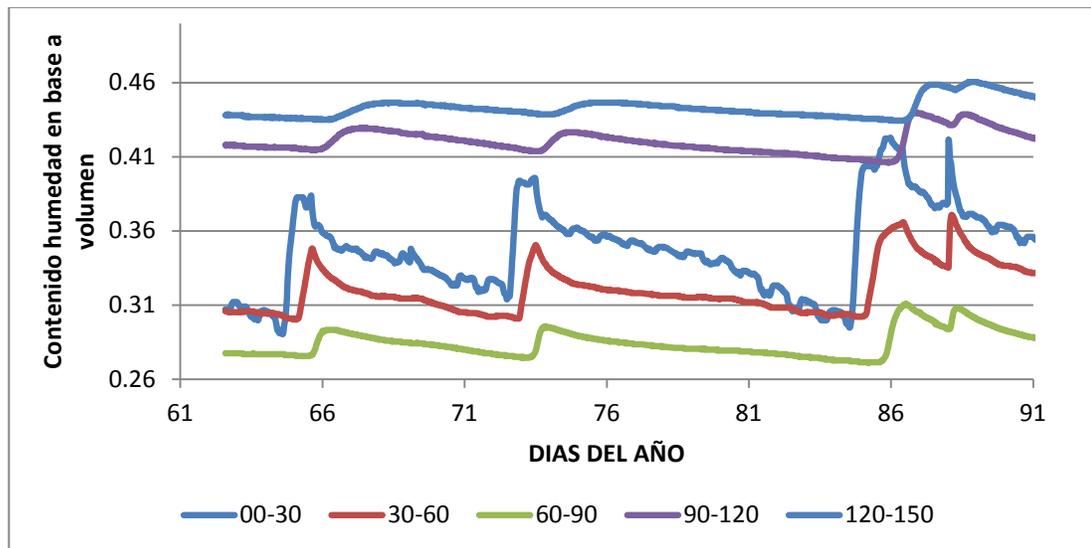
#### **4.3.- Contenido de agua en el suelo determinado con las sondas TDR.**

Los estratos donde se observaron las mayores fluctuaciones del contenido de humedad fueron 0-30, 30-60 y 60-90 cm, para los meses marzo, abril y mayo mientras que para junio, julio, agosto y septiembre, se observaron las mayores fluctuaciones de humedad en los estratos de 0-30 y 30-60. Los estratos donde se observaron pequeñas fluctuaciones en el contenido de humedad fueron 90-120 y 120-150 cm en los meses marzo, abril y mayo, para

los meses junio, julio, agosto y septiembre los estratos de 60-90, 90-120 y 120-150 cm no se observó ninguna fluctuación en el contenido de humedad. Los cinco estratos (30, 60, 90, 120 y 150 cm) se utilizaron para determinar el consumo de agua en los árboles.

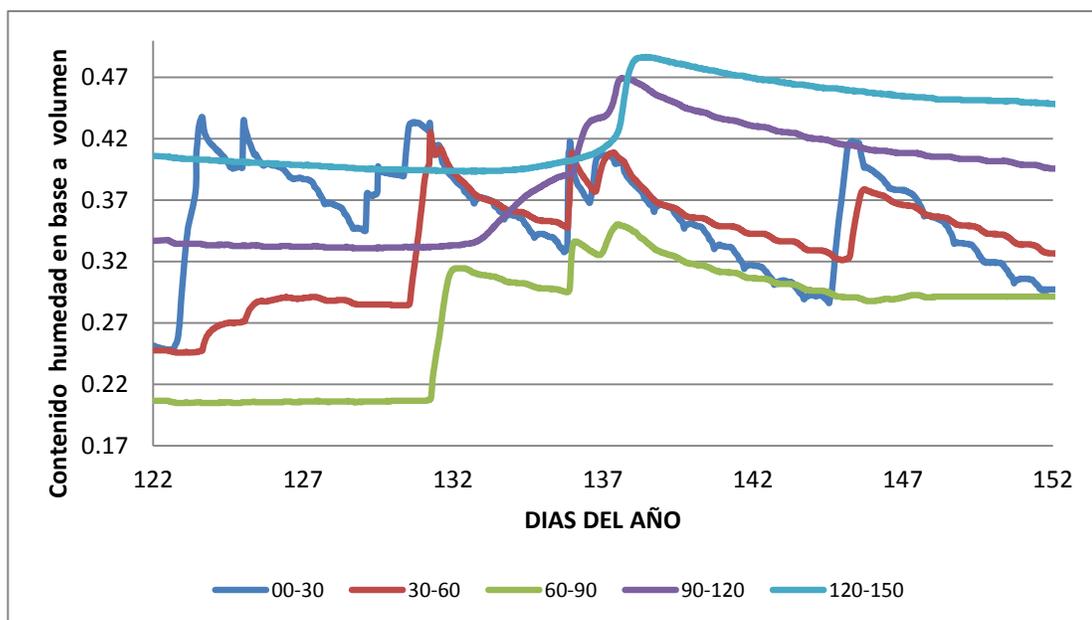
En las Figuras 3, 4 y 5 se presenta la evolución de la humedad en el suelo en los estratos de 0-30, 30-60, 60-90, 90-120 y 120-150 de profundidad. Durante el mes de Marzo (Figura. 3), Mayo (Figura 4) y Junio (Figura 5).

En la Figura 3 se muestra el mes de Marzo, las mayores fluctuaciones de humedad en el suelo de la huerta de nogal pecanero se presentan en los estratos 0-30, 30-60 y 60-90 cm, los otros estratos 90-120 y 120-150 cm se observan solo pequeñas fluctuaciones en su contenido de humedad y se tienen un mayor contenido de agua con respecto a las otras profundidades.



**Figura 3** Contenidos de humedad en base a volumen medidos por los TDR a las profundidades (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 y 120-150 cm) para el mes de Marzo 2012 en la huerta de nogal pecanero en Zaragoza Coahuila

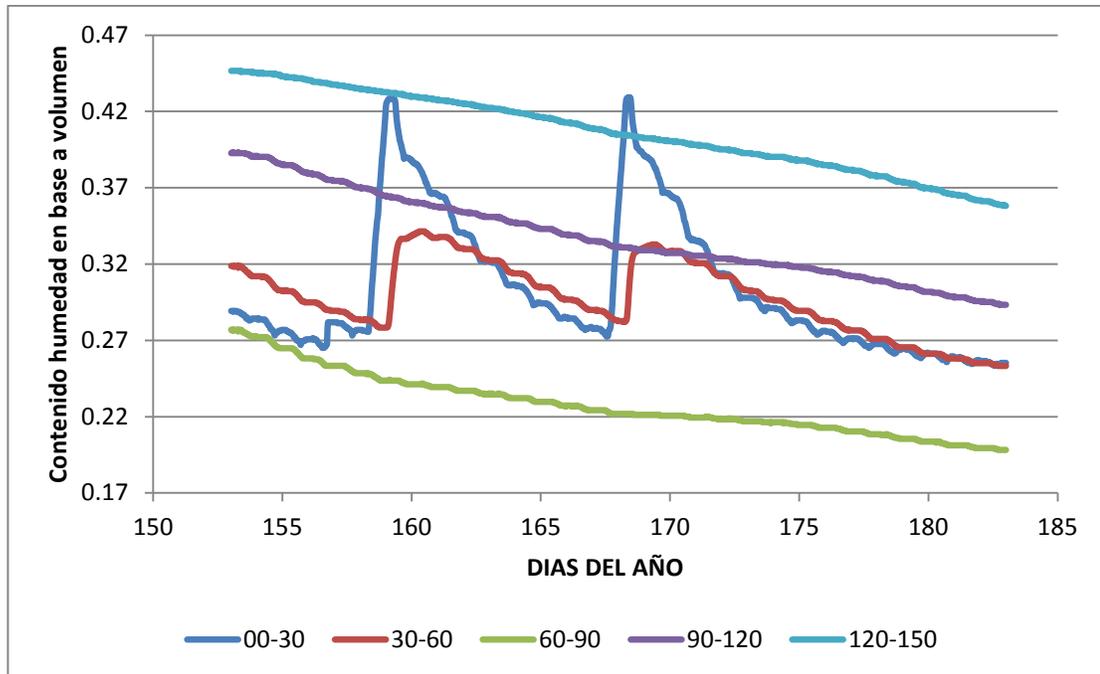
En la Figura 4 se muestra en mayo, la distribución de la humedad del suelo, el perfil de 90-120 y 120-150 tienen un mayor contenido de agua con respecto a las otras profundidades, con cambios muy apreciables en el contenido de humedad. Esto resultó de la infiltración desde la superficie por efecto de los riegos y a la poca actividad de las raíces a esta profundidad. Las fluctuaciones mayores en el contenido de agua en el suelo se observan en las profundidades de 0-30 y 30-60. y 20 cm.



**Figura 4** Contenidos de humedad en base a volumen medidos por los TDR a las profundidades (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 y 120-150 cm) para el mes de Mayo 2012 en la huerta de nogal pecanero en Zaragoza Coahuila.

En el mes de Junio (Fig. 5) observaron las fluctuación de la humedad en el suelo en los estratos de 0-30 y 30-60 en los siguientes estratos no hubo

fluctuaciones de humedad, esto se debe a la actividad de las raíces de los árboles y al efecto de la evaporación desde la superficie del suelo. Nótese que en la Figura 4 Se observan cambios en la humedad del suelo en todos los estratos.



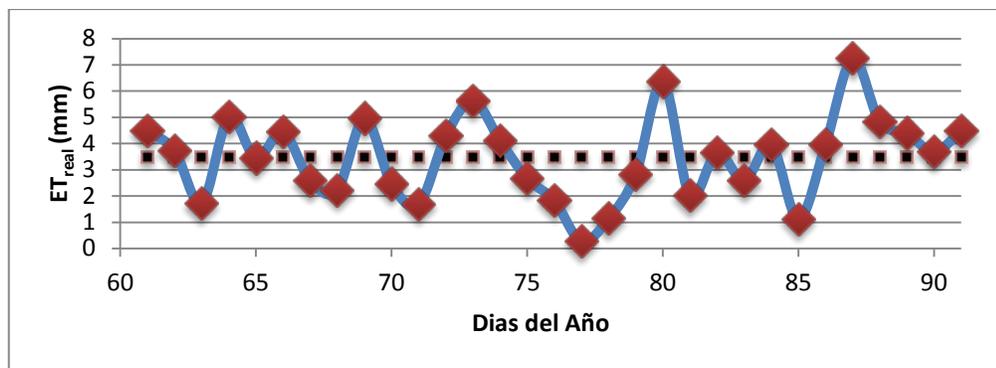
**Figura 5** Contenidos de humedad en base a volumen medidos por los TDR a las profundidades (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 y 120-150 cm) para el mes de Junio 2012 en la huerta de nogal pecanero en Zaragoza Coahuila.

#### 4.4.- Lamina evapotranspirada con mediciones de las sondas TDR

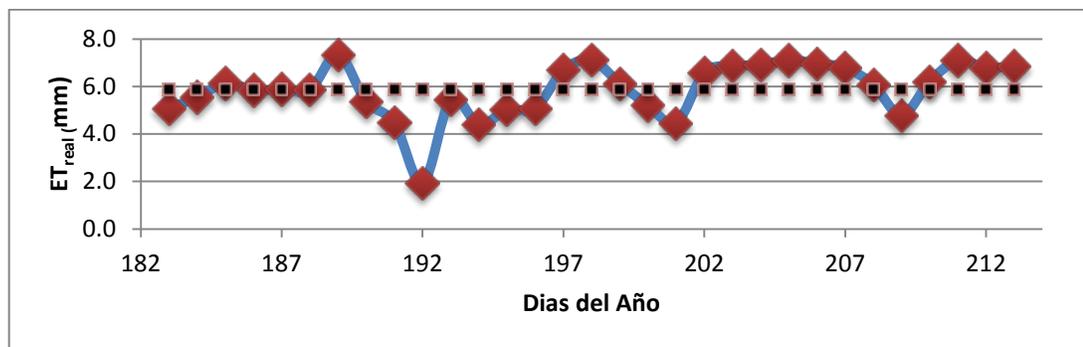
Las Figuras 6, 7 y 8 muestran la evapotranspiración calculada con mediciones de las sondas TDR en la huerta de nogal pecanero para los meses marzo, Julio y septiembre respectivamente.

Para el mes de Marzo (Fig. 6) se observó una evapotranspiración (ET) promedio diaria de 3.5 mm-d<sup>-1</sup>. En Julio (Fig. 7) la ET promedio diaria fue 5.9

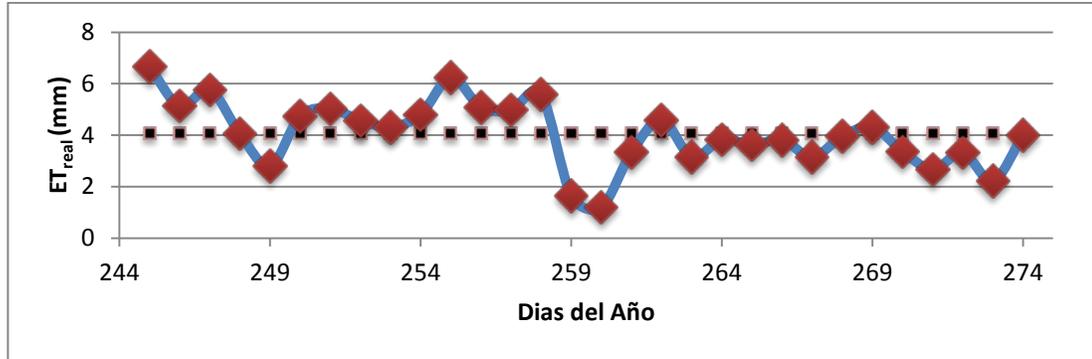
mm-d<sup>-1</sup> Por último en el mes de septiembre (Fig. 8) la ET promedio diaria fue 4 mm-d<sup>-1</sup> Chávez *et al* (2006) muestra un consumo hídrico máximo denominado evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) de 8.3 mm d<sup>-1</sup> para la parte baja de la cuenca del Nazas tiene el 77.4 por ciento de la superficie sembrada de nogal pecanero, para el mes de junio observaron un consumo hídrico mínimo de 4 mm d<sup>-1</sup> y se presentó en los meses de enero, febrero, octubre y noviembre. Con relación a la parte media de la cuenca (21.3 % área sembrada de nogal), la ET<sub>o</sub> fue de 8.5 mm día<sup>-1</sup> también para el mes de junio y el consumo mínimo fue de 4 mm d<sup>-1</sup> para los meses de octubre y noviembre.



**Figura 6 Evapotranspiración diaria (mm) de los árboles de la huerta de nogal pecanero en Zaragoza Coahuila, medida con las sondas TDR durante marzo de 2012.**



**Figura 7 Evapotranspiración diaria (mm) de los árboles de la huerta de nogal pecanero en Zaragoza Coahuila, medida con las sondas TDR durante julio de 2012.**



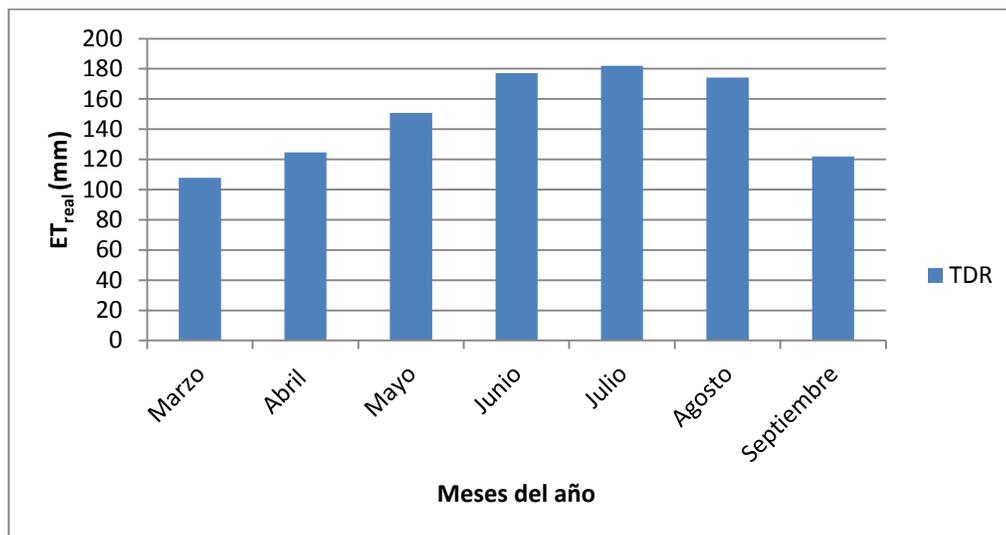
**Figura 8 Evapotranspiración diaria (mm) de los árboles de la huerta de nogal pecanero en Zaragoza Coahuila, medida con las sondas TDR durante septiembre de 2012.**

#### 4.4.1.- Evapotranspiración total mensual

En la Figura 9 se muestra el comportamiento de la evapotranspiración para el ciclo fenológico marzo-septiembre del nogal pecanero. En dicha figura se observa que en los meses de junio, julio y agosto se presenta la máxima demanda hídrica por el nogal con una evapotranspiración ( $ET_{real}$ ) que varía de 5.6 a 6  $mm\ d^{-1}$ . Chávez et al. (2006) observaron para el mes de julio una evapotranspiración diaria máxima con valores de 8 mm, mientras que Sammis et al. (2004) solo obtuvieron que la evapotranspiración diaria máxima fue de 8  $mm\cdot d^{-1}$  para el ciclo fenológico de la huerta de nogal.

Se analizaron los meses de mayor tasa de ET, que corresponden a los meses de Junio, Julio y Agosto, para determinar si hubo un exceso o déficit en el agua de riego, tomando como referencia el riego de 60 mm de lámina

aplicada en promedio cada 10 días, la aplicación en mensual fue de  $1800 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . En junio el volumen mensual evapotranspirado correspondió a  $1772 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  y se aplicó un volumen de riego de 1800 de lo que se deduce que hubo un pequeño exceso de agua de agua ( $28 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) que los árboles de la huerta no consumieron. En julio el volumen mensual de agua evapotranspirado fue  $1820 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  y se aplicó un volumen de riego de  $1800 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  lo que se deduce que hubo un pequeño déficit de agua ( $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) que los arboles de la huerta consumieron de una fuente diferente al riego posiblemente lluvia. En agosto se aplicó el mismo volumen de agua de  $1800 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ; para este mes el volumen mensual de evapotranspirado corresponde a  $1741 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , se deduce que hubo un exceso de riego ( $59 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) que los arboles no consumieron.

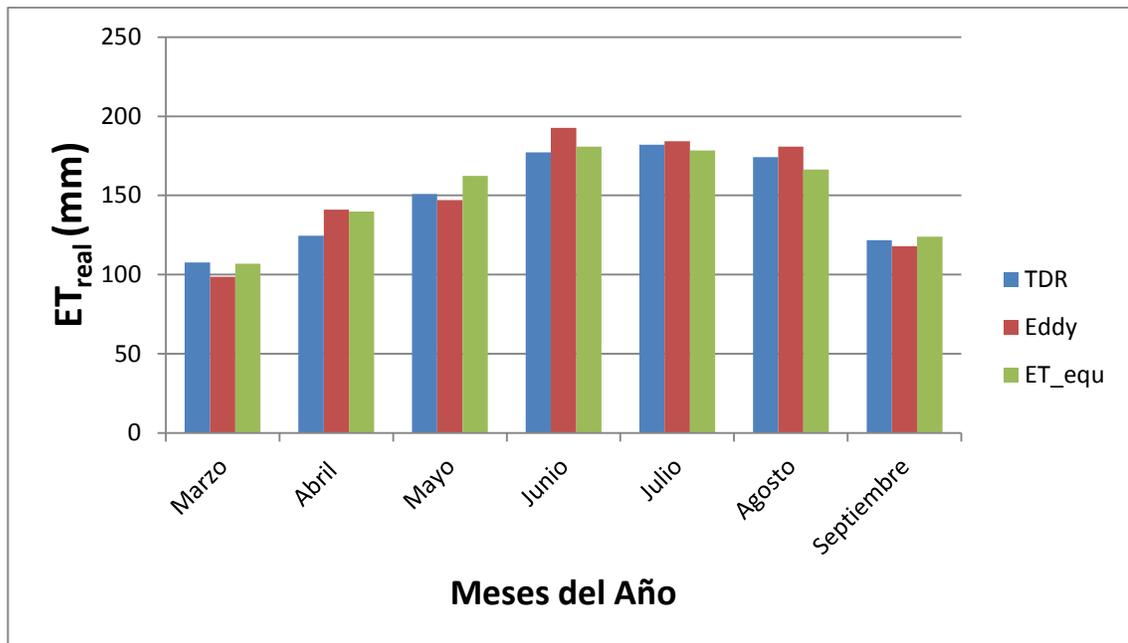


**Figura 9 Evapotranspiración real mensual de marzo a septiembre de 2012 en la huerta de nogal pecanero en Zaragoza Coahuila.**

#### **4.5.- Evaluación de la tasa de evapotranspiración mensual obtenida con las sondas TDR con la obtenida con el método de la covarianza eddy y el de la evaporación a equilibrio.**

En la Figura 10 se muestra la comparación de los métodos TDR, covarianza Eddy y evaporación a equilibrio ( $ET_{equ}$ ). Tomando como referencia el método TDR para medir la evapotranspiración del nogal pecanero, el método covarianza Eddy sobreestima en tan solo en un 1.9 % la evapotranspiración de la huerta de nogal pecanero es un valor muy bajo, mientras que el método  $ET_{equ}$ , igualmente al método covarianza Eddy solo que con un valor un poco más alto el 2.3 % de la evapotranspiración del nogal.

Zermeño et al., (2010) analizaron los valores integrados diarios de ET y  $ET_{equ}$  mostró similitud significativa entre ellos. Los valores medios de ET y  $ET_{equ}$  fueron iguales entre los meses por lo que la evapotranspiración a equilibrio podría implementarse para determinar el consumo de agua de la huerta.



**Figura 10 Evapotranspiración mensual de marzo a septiembre de 2012, comparando los tres métodos TDR, covarianza Eddy y ETequ en la huerta de nogal pecanero Zaragoza Coahuila.**

Se observó que los datos de evapotranspiración mensual (marzo a septiembre) obtenidos con mediciones de la humedad del suelo (sonda TDR), método de la covarianza eddy y método de la evaporación a equilibrio son estadísticamente iguales ( $\alpha \leq 0.05$ ) de acuerdo con la prueba T student.

## **V.- CONCLUSIONES**

Se demostró que con el uso de las sondas TDR para medir la humedad del suelo, se puede obtener la tasa diaria de evapotranspiración de los árboles de la huerta, y los resultados son muy similares a los obtenidos con el método de la covarianza Eddy y el de la evapotranspiración a equilibrio. Por lo que es más viable medir la humedad del suelo con los equipos TDR debido a que son muchos más baratos, que adquirir una estación Eddy y el procesamiento de datos es más sencillo.

## VI.- BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G. 1996. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *J. Irrig. and Drain. Engng. Div., ASCE* 122(2): 97-106.
- Angus, D. E. and P. J. Watts. 1984. "Evapotranspiration — How good is the Bowen ratio method?". *Agricultural Water Management* 8(1-3):133-150.
- Baldocchi, D. 1994. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C3 (wheat) and an open C4 (corn) crop: II. CO<sub>2</sub> exchange and water use efficiency. *Agriculture and forest Meteorology*. 67: 291-321.
- Cassel, D.K., R. G. Kachanoski, y G. C. Topp. 1994. Practical consideration for using a TDR cable tester. *Soil Technology*. 7:113-126.
- Castellví, F. 2007. La estimación del flujo de calor latente. Una reflexión de futuro. *Tethys*. 4: 19-27
- Castro, M. P., F. A. Marín, A. Q. Nolasco, S. Kleisinger, L. T. Chávez, y E. M. Saenz. 2008. Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura técnica de México*. 34: 459-470.
- Chávez, E., G. González, M. Rivera, J. Estrada y J. L. González. 2006. El consumo hídrico en nogal pecanero, a partir del monitoreo ambiental y el uso de la telemetría. *Agrofaz* 6(3):315-322.
- Dalton, F. N. 1992. Development of Time-Domain-Reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. En: *advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. *Soil Sci. Soc. Am. Special pub.* 30:143-167.

- Dasberg, S., and F. N. Dalton. 1985. Time Domain Reflectometry measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:293-297.
- Drexler, J. Z., R. L. Snyder, D. Spano, U. K. T. Paw. 2004. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. *Hydrological Processes.* 18(11): 2071-2101.
- Enciso, J. M.; D. Porter, X. Périès. January (2007). Irrigation Monitoring with Soil Water Sensors. Texas Cooperative Extension. Publication Number B-6194.
- Ferre, 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*, pp. 434-446. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Florentino, A. (2006). Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. *Bioagro. Venezuela.* 14: 48-70
- Flores, E. H., y J. A. Ruiz. 1998. Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante en balance hídrico. *TERRA Latinoamericana.* 16(3):219-229.
- Fritschen, L. J. 1966. Evapotranspiration Rates of Field Crops Determined by the Bowen Ratio Method. *Agronomy Journal .* 58:339-342.
- García-Petillo, M. 2008. Manejo del riego: uso de instrumentos de medición de agua del suelo y del estado hídrico de los cultivos, presentación de casos de estudio incluso en riego deficitario. *Red riegos, CYTED Y AECID.* 40: 277-280
- Gee, G., & D. Hillel. 1988. Groundwater recharge in arid regions: Review and critique of estimation methods. *Hydrology Processes.* 2: 255-266.

- Godoy-Ávila., C. y I. López-Montoya. 2000. Desarrollo de la almendra y germinación del fruto del nogal pecanero bajo cuatro calendarios de riego. *Revista Interamericana Terra*. 18(4): 305-311.
- Gurovich, L. A. 1985. *Fundamentos y diseño de sistemas de riego*. Primera Edición, Publisher, IICA, 433 p
- Ham, J. M., and Heilman J. L. 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path eddy covariance. *Agron. J.* 95: 1393-1403.
- Hanna, G. W., and N. Siam. 1980. The estimation of moisture content in the top 10 cm of soil using a neutron probe. *The Journal of Agricultural Science*. 94: 251-254
- Hanson, B.R., Orloff, S., Peters, D., (2000). Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture* 54 (3), 38–42
- Heathman, G. C., Starks P. J., Brown M. A. 2003. Time domain calibration in the little Washita River Experimental Watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J* 67:52-61
- Jaramillo-Robledo, A. (2005) La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 29(112):371-382.
- Jiyane, J. y A. Zermeño-González. 2003. Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego en zonas áridas. *Agrociencia*. 37:553-563.
- Kanemasu E. T., M. L. Wesley, B. B. Hicks and J. L. Heilman, 1979. Techniques for calculating energy and mass fluxes, In B. J. Barfield and J. F. Gerber (Editors), *Modification of the Aerial Environment of Crops*, American Society of Agricultural Engineers, pp156-182.

- Kustas, W. P., J. H. Prueger, and J. L. Hatfield. 2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agric. For. Meteorol.* 103: 249-264.
- Lhomme, J. P. 1996. A theoretical basis for the Priestley-Taylor coefficient. *Boundary-Layer Meteorol.* 82:179-191.
- Munguía López, J. 2000. Análisis de los componentes del balance de energía en el cultivo del melón (*Cucumis melo* L.) con acolchado plástico. Tesis de doctorado. UAAAN
- Muñoz, C. R., y R. A. Ritter. 2005. Hidrología agroforestal. Edición Mundiprensa, 131-132 p.
- Navejas-Jiménez, J., Nieto-Garibay, A., Fraga-Palomino, H. C., Rueda-Puente, E. O., & Ávila-Serrano, N. Y. (2011). Comparación de métodos para estimar la evapotranspiración en una zona árida citrícola del noroeste de Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 147-155
- Orozco, A. C. 2009. Determinación del régimen de riego para manzano bajo micro aspersión mediante el uso de estaciones meteorológicas y sondas de capacitancia (FDR). Departamento de Investigación, Desarrollo, Innovación Y transferencia Tecnológica. (2): 56-66.
- Pereira, L. 2006. Caracterização do balanço de energia no Vale do Curaça – Bahia. Tesis de maestría. Universidad Federal de Bahía, Brasil
- Pérez, P. J. y F. Castellví. 2002. Análisis de la Evapotranspiración a escala local y regional en Cataluña. *Ingeniería del Agua*. Marzo de 2002. 9(1):59-72
- Ponizovsky, A. S., S. M. Chudinova and A. Pachepsky. 1999. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. *Journal of Hydrology* 218:35-43.
- Priestley, C. H. B and R. T. Taylor. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather. Rev.* 100: 81-92.

- Puente González, A. 2002. Nuez, análisis de su rentabilidad. Claridades Agropecuarias. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA): 3-33.
- Raj, G. M., M. L. Rivera, y R. M. Crespo. (2007). Manejo de riego por goteo. Editado General, Mayagüez, Puerto Rico. 107p
- Rivera, L. M., M. R. Goyal, y M. C. Ruiz. 2007. Manejo de riego por goteo. Segunda Edición. Puerto Rico. 519 p.
- Rodríguez, J. C., Grageda, J. G., Watts, C., Payan, J. G., Erraki, S., 2010. M. E. R. Índices de vegetación y evapotranspiración de nogal (*Carya illinoensis* K. Koch) en la costa de Hermosillo, México. in *XI Simposio internacional de nogal pecanero* (p. 76).
- Rodríguez, R., & Pire, R. (2008). Evapotranspiración diaria del tomate determinada mediante un lisímetro de pesada. *Agronomía Tropical*, 58(1), 73-76.
- Sammis, T. W., Mexal, J. G., & Miller, D. (2004). Evapotranspiration of flood-irrigated pecans. *Agricultural water management*, 69(3), 179-190.
- Santa-Olalla, F. M., P. L. Foster, y A. C. Belmonte. 2005. Agua y agronomía. Edición Mundi-prensa. 583 p.
- Schwankl, L. y Schulbach, H. (1998) .Measuring Soil Moisture. Chapter 21 (167-170). Walnut Production Manual. UCA-DANR. Publication 3373
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (SIAP). 2012. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. México.
- Seyfried, M. S., and M. D. Murdock. 2004. Measurement of soil water content with a 50 Mhz soil dielectric sensor. *Soil Sci. Am. J.* 68:394-403.

- 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.
- Topp, G. C., and J. L. Davis. 1985. Measurement of soil water content using time-domain Reflectometría (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:19-24.
- Topp, G.C., J. L. Davis, y A. P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*. 16: 574-582.
- Tuñón, J. (2000). Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. Departamento de Ciencias Experimentales, Universitat Jume I, Catellon, Tesis Doctoral. 367 p.
- Van Bavel, C. H. M., E. E. Hood, and N. (1954) Underwood. Vertical resolution in the neutron method for measuring soil moisture. *Transactions, American Geophysical Union*. 35 (1954): 595-600
- Villaman, R., L. Tijerina., A. Quevedo y G. Crespo 2001. Comparación de algunos métodos micro-meteorológicos para estimar la evapotranspiración en el área de Montecillo, México. *Terra* 19: 281-291.
- Wang, J., T. W. Sammis, A. A. Andales, L. J. Simmons, V. P. Gutschick, and D. R. Miller. 2007. Crop coefficients of open-canopy pecan orchards. *Agric. Water Manage.* 88(1- 3): 253-262.
- Yu, C., Warrick A. W., Conklin M. H. 1999. Derived funtions of the domain reflectometry for soil moinsture measurament. *Water Resources. Res.* 35:1789-1796
- Zermeño-González, A. 2001. Métodos micrometeorológicos para medir flujos de calor y vapor de agua entre los cultivos y la atmósfera. Memoria de la

XIII Semana Internacional de Agronomía. 5-7 de septiembre de 2001.  
Gómez Palacio, Durango, México.

Zermeño-González, A., Flores-Guerrero, J. A., Munguía-López, J. P., Gil-Marín, J. A., Rodríguez-García, R., Catalán-Valencia, E. A. (2010). Evapotranspiración y su relación con la evaporatranspiración a equilibrio de una huerta de nogal pecanero (*Carya illinoensis*) del norte de México. *Agrociencia*, 44(8), 885-893.

Zermeño-González, A., J. Munguia-Lopez, M. Cadena-Zapata, S. G. Campos-Magaña, L. Ibarra-Jiménez, and R. Rodriguez-Garcia. 2012. Critical evaluation of different techniques for determining soil water content. En: M. Kumar. Problems, perspectives and challenges of agricultural water management. (Eds.), INTECH. Pp. 200-214.