CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

PROGRAMA DE POSGRADO EN AGROPLASTICULTURA

"Determinación de las Líneas de Referencia para la Programación del Riego en Base a Dendrometría para el Cultivo de Nogal en Dos Regiones Climáticas de Coahuila"

TESIS

Presentada por:

VICTOR HUGO AVENDAÑO ABARCA

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROPLASTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México. **Octubre de 2015**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA
Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura

TESIS

Determinación de las líneas de referencia para la programación del riego en base a dendometría para el cultivo de nogal en dos regiones climáticas de Coahuila

Presentada por:

VÍCTOR HUGO AVENDAÑO ABARCA

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Agroplasticultura

Asesorado por:

Dr. Juan Munguía López

SINODALES

Dr. Luis Ibarra Jiménez
Presidente

Dr. Marco Antonio Arellano García
Secretario

M.C. Adolfo Baylón Palomino
Vocal

Saltillo, Coahuila **Octubre, 2015**

DECLARACIÓN

Declaro que la información contenida en la Parte Experimental así como en la Parte de Resultados y Discusiones de este documento y que forman parte de las actividades de investigación y desarrollo realizadas durante el período que se me asignó para llevar a cabo mi trabajo de tesis, será propiedad del Centro de Investigación en Química Aplicada.

Saltillo, Coahuila a 14 de octubre de 2015

VÍCTOR HUGO AVENDAÑO ABARCA

Nombre y Firma

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por otorgarme el apoyo económico durante el periodo del programa de Maestría en Ciencias en la Agroplasticultura.

Al **Centro de Investigación en Química Aplicada** por darme la oportunidad para poder obtener un logro más en mi formación profesional y por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, poniendo a mi disposición todos los medios necesarios para llevarlo a cabo

Al **Dr. Juan P. Munguía López** por el apoyo brindado en la realización de esta investigación, por sus consejos, observaciones y enseñanzas así como por su dedicación, que me han permitido aprender y alcanzar las metas propuestas para este trabajo.

Al **MC. Adolfo Baylon Palomino** por su colaboración y apoyo en todo el proceso y desarrollo de este trabajo investigación en cada una de las actividades de campo y orientación en el procesado de información.

A mis compañeros y grandes amigos **Elder O. Díaz L., Clara Sánchez G., Eliud García S. y Lorenzo Zamorano** y especialmente a **Dulce C. González Sandoval** por su amistad, apoyo y actividades compartidas. A todos muchas Gracias.

DEDICATORIA

Por la fortaleza que me ha brindado en los momentos difíciles y por su amor infinito humildemente dedico este trabajo a Dios, así como a mi hermosa familia que me ha brindado su amor, confianza y apoyo incondicional. Con especial cariño y amor a mi hermano José H. Avendaño, abuela Sara Hernández y abuelo Rosemberg Avendaño personas que siempre llevare en mi mente y corazón.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS iv
ÍNDICE DE FIGURAS vi
RESUMEN vii
I. INTRODUCCIÓN 1
I.1 Generalidades del nogal pecanero 1
I.1.1 Historia y origen 1
I.1.2 Clasificación taxonómica 1
I.1.3 Características botánicas 2
I.1.4 Fenología del nogal pecanero 2
I.2 Requerimientos edáficos, climáticos e hídricos del cultivo 3
I.2.1 Temperatura 3
I.2.2 Horas frío 3
I.2.3 Humedad relativa 3
I.2.4 Suelo 4
I.2.5 Requerimientos hídricos 4
I.3 Agricultura de riego 5
I.4 Programación del riego 5
I.5 Evapotranspiración (ET) 6
I.5.1 Evapotranspiración de referencia (ET_O) 6
I.5.2 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc) 7
I.5.3 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{Caj}) 7
I.6 Cálculo de requerimientos hídricos del cultivo 7
I.6.1 Métodos climáticos 7
I.6.2 Métodos basados en el estado hídrico del suelo 9
I.6.3 Medidas puntuales tomadas en base a parámetros de la planta 10
I.6.4 Medidas continúas tomadas en base a planta 11
I.6.5 Protocolo para la programación del riego en base a máxima contracción diaria de tallo (MCD) 17
I.6.6 Requerimientos de un indicador del estado hídrico de la planta para la programación del riego 17
II. JUSTIFICACIÓN 18
III. HIPOTESIS 20
IV. OBJETIVOS 21
IV.1 Objetivo general 21

IV.1.1 Objetivos específicos 21
V. MATERIALES Y MÉTODOS 22
V.1 Sitios experimentales 22
V.2 Material biológico 22
V.3 Tratamientos y material utilizado 22
V.4 Variables evaluadas 23
V.4.1 Descripción de las variables evaluadas 23
V.5 Análisis estadístico 25
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 26
VI.1. Localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila 26
VI.1.1 Variables climáticas 26
VI.1.2 Contenido volumétrico de agua en suelo (Θ_v) 27
VI.1.3 Lámina total consumida por etapa fenológica 28
VI.1.4 Conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosinteticamente activa (PAR), temperatura del aire (T_a), temperatura de la hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA) 28
VI.1.5 Potencial hídrico de tallo (Ψ_{Xilema}) 30
VI.1.6 Mediciones dendrométricas 31
VI.1.7 Líneas de referencia 35
VI.1.9 Rendimiento y parámetros de calidad 38
VI.2 Localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila 40
VI.2.1 Variables climáticas 40
VI.2.2 Contenido volumétrico de agua en suelo (Θ_v) 41
VI.2.3 Lámina consumida y contenido de humedad de suelo en base a volumen promedio en cada etapa fenológica 42
VI.2.4 Conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosinteticamente activa (PAR), temperatura de aire (T_a), temperatura de hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA) 43
VI.2.5 Potencial hídrico de tallo (Ψ_{Xilema}) 47
VI.2.6 Mediciones dendrométricas 50
VI.2.7 Líneas de referencia 54
VI.2.8 Intensidad de Señal (IS) 59
VI.2.10 Rendimiento y parámetros de calidad 60
VI.3 SAnalisis global del comportamiento de las variables evaluadas entre ambas localidades. 61
VII. CONCLUSIONES 63

VIII. PERSPECTIVAS 64
IX. REFERENCIAS 65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones de segundo grado para corrección del cálculo de contenido volumétrico de agua en el suelo en base a tiempo de propagación de onda (t) con respecto a la conductividad eléctrica (CE) del suelo. 10

Cuadro 2. Lista de las mejores ecuaciones de referencia aptas para la máxima contracción diaria de tallo (MCD) en función de las variables ambientales de evapotranspiracion diaria de referencia (ET_O), radiación global (R_d), Temperatura media diaria (T_m), Temperatura diaria al medio día (T_{md}), deficit de presión de vapor medio diario (DPV_m), deficit de presión de vapor diaria al medio día (DPV_{md}), deficit de presión de vapor medio entre las 10 y 15 hr (tiempo solar) (DPV_{mx}) para varios cultivos leñosos, basado en Ortuño *et al*. (2010). 16

Cuadro 3. Promedios mensuales de temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), temperatura media (T_{med}), humedad relativa (HR), déficit de presión de vapor (DPV), radiación global (RG), evapotranspiración de referencia (ET_O) acumulada y precipitación acumulada correspondientes al periodo del mes de Junio al mes de Noviembre del año 2014, obtenidas de la estación meteorológica automatizada Rancho el Padrino, Saltillo, Coahuila. 26

Cuadro 4. Lámina consumida en las etapas fenológicas del nogal pecanero comprendidas entre el periodo 142 a 331 (días julianos) del año 2014 en la localidad rancho, San Juan de la Vaquería, Saltillo Coahuila. 28

Cuadro 5. Conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura de aire (T_a), temperatura de hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila, en el año 2014. 29

Cuadro 6. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{Xilema}) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería Saltillo, Coahuila del año 2014. 31

Cuadro 7. Líneas de referencia para MCD para el tratamiento Sobre-irrigado con variables meteorológicas más representativas para el cultivo de nogal pecanero para las etapas fenológicas comprendidas el periodo de evaluación de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila. 36

Cuadro 8. Rendimiento total, porciento de llenado y número de nueces por kilogramo obtenidas en la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo Coahuila del año 2014. 38

Cuadro 9. Promedios mensuales de temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), temperatura media (T_{med}), humedad relativa (HR), déficit de presión de vapor (DPV), radiación global (RG), evapotranspiración de referencia (ET_O) acumulada y precipitacion acumulada correspondientes al periodo del mes de Mayo al mes de Noviembre del año 2014, obtenidas de la estación meteorológica automatizada Campo Experimental Zaragoza, Zaragoza, Coahuila. 40

Cuadro 10. Lámina consumida en las etapas fenológicas del nogal pecanero comprendidas entre el periodo 142 a 331 (días julianos) del año 2014 en la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila. 42

Cuadro 11. Conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura de aire (T_a), temperatura de hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014. 44

Cuadro 12. Potencial hídrico de la planta (Ψ_{Xilema}) obtenido en la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014. 47

Cuadro 13. Líneas de referencia para MCD con variables meteorológicas más representativas para el cultivo de nogal pecanero para las etapas fenológicas comprendidas el periodo de evaluación para los tratamientos Testigo y Sobre-irrigado de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014 56

Cuadro 14. Media de intensidad de señal (IS) para el cultivo de nogal pecanero para cada una de las etapas fenológicas evaluadas para la relacion de los tratamientos Sobre-irrigado/Testigo, de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila en el año 2014. 59
Cuadro 15. Rendimiento total, porciento de llenado y número de nueces por kilogramo obtenidas en la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila en el año 2014..... 61
Cuadro 16. Comportamiento global de la conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura de aire (T_a), temperatura de hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA) entre las localidades rancho Tres Marías, y San Juan de la Vaquería del año 2014..... 61
Cuadro 17. Comportamiento global del potencial hídrico Xilemático (Ψ_{Xilema}), máxima contracción diaria de tallo (MCD) entre las localidades rancho Tres Marías, y San Juan de la Vaquería del año 2014..... 62
Cuadro 18. Análisis de las variables rendimiento, porcieno de llenado y número de nueces por kilogramo entre las localidades rancho Tres Marías, y San Juan de la Vaquería del año 2014. 63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Parámetros derivados de las fluctuaciones de diámetro del tallo: Máximo (MXDT) y mínimo (MNDT) diámetro de tallo, tasas de crecimiento del mínimo (CMNDT) y máximo (CMXDT) diámetro de tallo y máxima contracción de diámetro de tallo (MCD) (Goldhamer y Fereres, 2001)..... 13
Figura 2. Evolución del contenido de humedad en base a volumen (cm^3cm^{-3}) para el estrato 0-60 cm para los tratamientos Testigo (▬), Sobre-irrigado (▬) y Sub-irrigado (▬) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila, durante el periodo de evaluación comprendido entre los días 142 a 331 (días julianos) del año 2014. 27
Figura 3. Evolución de las fluctuaciones del diámetro de tallo (µm) de los tratamientos Sobre-irrigado (▬) y Sub-irrigado (▬) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (▬ ✱ ▬>) y etapas fenológicas (✱ ✱ ✱) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014..... 32
Figura 4. Comportamiento de la máxima contracción diaria (mm) de los tratamientos Sobre-irrigado (▬) y Sub-irrigado (▬) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila con ilustración de aplicaciones de riego (▬ ✱ ▬>) y etapas fenológicas (✱ ✱ ✱) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014 e ilustrasion de voltaje de batería (▬)..... 33
Figura 5. Evolución de la tasa de crecimiento acumulado de los máximos (líneas continuas) y mínimos (líneas discontinuas) de los tratamientos Sobre-irrigado (▬ y ▬) y Sub-irrigado (▬ y ▬) estudiados de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (▬ ✱ ▬>) y etapas fenológicas (✱ ✱ ✱) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014..... 34
Figura 6. Líneas de referencia en base a MCD para el tratamiento Sobre-irrigado con valores diarios de MCD y variables meteorológicas más representativas obtenidas para el cultivo de nogal pecanero por etapa fenológica a) Estado acuoso, b) Endurecimiento de cáscara y c) Maduración de fruto, de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila del año 2014..... 37
Figura 7. Evolución del contenido de humedad en base a volumen (cm^3 cm^{-3}) para el estrato 0-60 cm para los tratamientos Testigo (▬), Sobre-irrigado (▬) y Sub-irrigado (▬) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila, durante el periodo de evaluación comprendido entre los días 142 a 331 (días julianos) del año 2014. 41
Figura 8. Evolución de la tasa fotosintética (µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), para los tratamientos Testigo (▬), Sobre-irrigado (▬) y Sub-irrigado (▬) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila para el día 203 (Día Juliano) del año 2014. 46
Figura 9. Evolución diurna del Ψ_{Xilema} (líneas continuas) y FDT (líneas discontinuas) de los tratamientos Testigo (▬ y •••), Sobre-irrigado (▬ y •••) y Sub-irrigado (▬ y •••) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila correspondiente al día 203 (día juliano) del año 2014. 50
Figura 10. Evolución de las fluctuaciones del diámetro de tallo (µm) de los tratamientos Testigo (▬), Sobre-irrigado (▬) y Sub-irrigado (▬) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (▬ ✱ ▬>) y etapas fenológicas (✱ ✱ ✱) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014..... 51
Figura 11. Comportamiento de la máxima contracción diaria (mm) de los tratamientos Testigo (▬), Sobre-irrigado (▬) y Sub-irrigado (▬) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (▬ ✱ ▬>) y etapas fenológicas (✱ ✱ ✱) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014 e ilustrasion de voltaje de batería (▬)..... 52
Figura 12. Evolución de la tasa de crecimiento acumulado de los máximos (líneas continuas) y mínimos (líneas discontinuas) de los tratamientos Testigo (▬ y ▬), Sobre-irrigado (▬ y ▬) y Sub-irrigado (▬ y ▬) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (▬ ✱

⟶) y etapas fenológicas (✽ ✽ ✽) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014. 53
Figura 13. Líneas de referencia en base a MCD para el tratamiento Testigo con valores diarios de MCD y variables meteorológicas más representativas obtenidas para el cultivo de nogal pecanero por etapa fenológica a) Desarrollo de fruto, b) Estado acuoso y c) Endurecimiento de cáscara de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014. 57
Figura 14. Líneas de referencia en base a MCD para el tratamiento Sobre-irrigado con valores diarios de MCD y variables meteorológicas más representativas obtenidas para el cultivo de nogal pecanero por etapa fenológica a) Desarrollo de fruto, b) Estado acuoso, c) Endurecimiento de cáscara y d) Maduración de fruto de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014. 58

RESUMEN

Se determinaron las líneas de referencias en base a la máxima contracción diaria de tallo (MCD) para el cultivo de nogal pecanero en dos localidades agroclimáticas de Coahuila, la primera ubicada en el rancho Tres Marías municipio de Zaragoza y la segunda en el rancho San Juan de la Vaquería municipio de Saltillo. Los dos experimentos se realizaron en el periodo Mayo-Noviembre del 2014, en los que se establecieron 3 tratamientos de riego (Testigo, Sobre-irrigado y Sub-irrigado), en los cuales se instalaron un sensor LVDT para la medición de las fluctuaciones de diámetro de tallo (FDT), 2 TDRs a profundidad de 0-30 cm y 30-60 cm para el monitoreo de contenido de humedad en el suelo por tratamiento y un pluviómetro para el monitoreo de la lámina aplicada en el tratamiento control.

Las variables climáticas como evapotranspiración de referencia (ETo), déficit de presión de vapor (DPV), temperatura media (T_{med}), temperatura máxima (T_{max}) y humedad relativa (HR) presentaron fluctuaciones en sus valores a lo largo del tiempo de evaluación; pero con una tendencia anual esperada para ambas localidades, pero de diferente magnitud entre estas, presentándose condiciones mas severas en la localidad rancho Tres Marias.

Los valores de MCD mostraron una tendencia de disminución a lo largo del tiempo de evaluación, presentando un valor máximo de 0.59, 0.51 y 0.48 mm y mínimo de 0.03, 0.02 y 0.04 mm, con un descenso del 94.91, 96.07 y 91.66 % en los valores para los tratamientos Testigo, Sobre-irrigado y Sub-irrigado respectivamente para la localidad rancho Tres Marías y valor máximo de 0.43 mm y mínimo de 0.01 mm, con un descenso del 97.67 % para la localidad rancho San Juan de la Vaquería, esto como consecuencia de la disminución de los valores de las variables climáticas a través del tiempo. La relación que mostraron los valores de la MCD con respecto a las diferentes variables climáticas (líneas de referencia) varió conforme a las etapas fenológicas del cultivo e inclusive entre las localidades de estudio, siendo las más representativas T_{max} y T_{med} con valores de $r^2= 0.76^{**}$ y 0.77^{**} para la etapa de desarrollo de fruto en la localidad rancho Tres Marías, HR con valores de $r^2 =0.35^{**}$ y T_{max} con valor de $r^2=0.57^{**}$ para la etapa de estado acuoso para la localidad rancho Tres Marías y San Juan de la Vaquería respectivamente, DPV con valores de $r^2= 0.66^{**}$ para la etapa de endurecimiento de cáscara en la localidad rancho Tres Marías y ET_O con valor de $r^2=0.88^{**}$ y HR con valor de $r^2=0.63^{**}$ para la etapa de maduración de fruto en la localidad rancho Tres Marías y rancho San Juan de la Vaquería respectivamente.

I. INTRODUCCIÓN

I.1 Generalidades del nogal pecanero

I.1.1 Historia y origen

El nogal pecanero es originario del Norte de México y Sur de los Estados Unidos debido a los hallazgos de fósiles encontrados a lo largo de la mayoría de los arroyos y cauces de ríos localizados en estas regiones (Herrera, 2008), siendo uno de los productos agrícolas de gran importancia que nos heredaron los nativos; ya que les tomo más de 400 años para su domesticación (Campos *et al.*, 2005). Tanto en México como Estados Unidos se encuentran numerosas extensiones sujetas a aprovechamiento comercial. Los estados con mayor superficie de producción de nuez para Estados Unidos se localizan en Georgia, Kansas, Louisiana, Missouri, Oklahoma y Texas; en el caso de México los estados de Chihuahua, Coahuila y Nuevo León (Ojeda *et al*., 2003). Las primeras plantaciones de nogal pecanero se iniciaron a partir de 1871, y las plantaciones con aprovechamiento comercial iniciaron en el año de 1904 en el estado de Nuevo León contando con algunos árboles con edad estimada de más de 200 años (COMENUEZ, 2010). De acuerdo a Medina y Cano (2002) los españoles llamaron nogal al árbol pecanero y al fruto "nuez".

I.1.2 Clasificación taxonómica

Reino: Plantae
División: Magnoliophyta
Clase: Magnoliopsida
Orden: Juglandales
Familia: Juglandaceae
Género: Carya
Especie: *spp.

(*) En México se han reportado 6 especies; ***C. illinoinensis***, *C. aquatica, C. aciniocea, C. ovata, C. texana* y *C. alba.*

I.1.3 Características botánicas

El nogal pecanero es una planta dicotiledónea, la cual alcanza alturas de hasta 50 m con un diámetro de tronco aproximado de 2 m. Su tallo es un tronco corto muy robusto con ramificaciones que forman una copa amplia, con corteza gruesa y agrietada (Aragón, 2004). Posee una raíz pivotante, hojas caducifolias compuestas de 11 a 17 folíolos ovales, peciolados y una longitud de 29 a 40 cm de largo y 19 a 29 cm de ancho.

Es una planta monoica, es decir presenta flores femeninas y masculinas, pero separadas con una dicogamia muy marcada, las flores masculinas se sitúan en la parte media de las ramas y las femeninas en las partes terminales, o bien a la inversa (Aragón, 2004). Las flores son unisexuales, las flores masculinas son de color verdoso, con inflorescencias en amentos colgantes de 6 a 8 con una longitud de hasta 12 cm, que se forman en la madera del año anterior. Las flores femeninas se presentan en inflorescencias de espiga en ápices de la misma rama floral, son pistiladas y son originadas en el crecimiento del año en curso a diferencia de las flores masculinas (Brison, 1992).

La fruta del nogal se considera una drupa, la cual consta de un pericarpio, mesocarpio y semilla (almendra) (Aragón, 2004). Los frutos están agrupados de uno a cuatro, sobre un pedúnculo corto, son ovoides, adelgazados en la punta, tetra-alados, alcanzan de 25 a 65 mm de largo y 12 a 25 mm de grueso, cada uno constituye una drupa dehiscente, con cubierta carnosa (ruezno) el cual con el proceso de maduración de fruto se seca agrietándose en cuatro partes para dar salida al endocarpio leñoso el cual encierra la semilla o almendra que es la parte comestible (Brison, 1992).

I.1.4 Fenología del nogal pecanero

Cada año el nogal presenta un mismo ciclo fenológico, coincidiendo dentro de ciertos rangos de variación con la época del año en los que se encuentran las diferentes etapas (McWhorter *et al*., 1977) siendo estas:

a) Estado de dormancia. Cuando el árbol no posee hojas y acumula horas frío que son requeridas para la brotación.

b) Brotación. Cuando las yemas abren y dan lugar a las primeras ramas del brote.

c) Polinización. Esta etapa inicia cuando aparece la inflorescencia masculina y la femenina.

d) Estado acuoso. Ocurre cuando la nuez se encuentra llena de un líquido acuoso, es decir aún no posee la almendra.

e) Estado masoso. Cuando se lleva a cabo el proceso de formado de almendra y su consistencia no es muy firme.

f) Dehiscencia del ruezno. Es el momento en que abre el ruezno y la nuez puede ya ser cosechada.

g) Caída de hojas. Cuando el árbol tira las hojas para iniciar la etapa de dormancia.

I.2 Requerimientos edáficos, climáticos e hídricos del cultivo

I.2.1 Temperatura

El nogal es una planta que requiere de 10 a 14 horas luz. Con un ciclo vegetativo de 230 a 250 días, esto dependiendo de la variedad. La especie resulta medianamente sensible a las heladas, temperaturas menores que -2 ºC ocasiona daño y muerte a las flores. Al igual que otros frutales, tiene una temperatura mínima de crecimiento de 10 ºC, una óptima de 21 a 28 ºC y una máxima de 38 ºC. La suma de temperaturas acumuladas entre yema hinchada y madurez de cosecha es de 1,300 a 1,700 grados-días, base 10 ºC grados-días son las temperaturas que se van acumulando día a día, restando a la temperatura media diaria de 10 ºC como temperatura base.

I.2.2 Horas frío

El nogal pecanero requiere de exposición al frío durante el período invernal para tener una brotación uniforme y regular (Westwood, 1993). La presencia de frío ha sido considerada como un factor importante en la iniciación y formación de flores en frutales templados (Ambling y Hambling, 1983). El nogal tiene un requerimiento de frío mínimo de 400 horas con punto crítico de 7.2 °C. Sin embargo se ha observado que se requieren de 400 a 800 horas frío para que el nogal inicie su brotación (Herrera y Clevenger, 1996) esto dependiendo de la variedad. Los arboles de nogal de América del Norte tienen un requerimiento medio de menos de 500 horas frío; por ejemplo Western y Wichita tienen un requerimiento aproximado de 400 horas frío (Díaz, 1987).

I.2.3 Humedad relativa

Cuando la humedad relativa durante la polinización es superior al 80 % esta se limita debido a que las anteras no abren para liberar el polen. La humedad relativa alta causa la germinación de la nuez dentro del ruezno antes de cosecharla afectando su calidad para comercialización. Cultivares con ruezno grueso son los más susceptibles ya que esta característica impide su apertura.

Aunado a esto una humedad relativa alta promueve el desarrollo de enfermedades fungosas que atacan al follaje (Brison, 1976).

I.2.4 Suelo

El nogal puede establecerse en una amplia variedad de suelos, desde texturas de migajón arenoso hasta migajón arcilloso, se prefiere suelos de origen aluvial, profundos (1 a 1.5 m), permeables, sueltos, de buena fertilidad y con pH de 6.5 a 8.0, el crecimiento de las raíces del nogal es mayor cuando el pH del suelo es de 6.5 a 7.5 (Smith, 1990).

I.2.5 Requerimientos hídricos

En el nogal cuando se requiere calidad de nuez, el contenido de agua en el suelo tiene más efecto que cualquier otro factor del medio. El estrés hídrico afecta el tamaño y el llenado de la nuez, también afecta el crecimiento del brote y la hoja. Para la brotación es importante una adecuada humedad en el suelo, para estimular crecimientos vigorosos, es importante desde la floración hasta el endurecimiento de la cáscara para el tamaño y durante el llenado de la nuez y optimizar el porcentaje de llenado (Wells y Harrison, 2007). Godoy *et al*., (2000) coincide en que el agua es el principal factor de manejo que permite una alta tasa fotosintética de las hojas, y en consecuencia alta calidad y producción de nuez.

El cultivo requiere la aplicación de una lámina de riego de hasta 1.6 a 1.7 m·año^{-1} en sistema por gravedad y de 1.3 a 1.6 m·año^{-1} en sistema por aspersión (González *et al.* 2014), es decir varia dependiendo del sistema de aplicación del riego que se use, implicando con ello la consiguiente tecnificación de los sistemas productivos con nuevos métodos de aplicación de agua con lo que se ha evolucionado al desarrollo de sistemas de producción (Lagarda, 2007).

El máximo valor de consumo de agua se alcanza durante los meses de Junio, Julio y Agosto con valores de 9.5 a 10.7 litros·día^{-1}·árbol^{-1} durante el primer año; mientras que en el segundo año, durante los meses de Junio y Julio se alcanzan valores de 39 a 44 litros·día^{-1}·árbol^{-1} (Villareal, 1983) y en etapa de madurez (aproximadamente 25 años) un nogal con sistema de aplicación presurizado requiere de 360 litros·día^{-1}·árbol^{-1} (Hernández, 2003).

I.3 Agricultura de riego

El agua que requieren los cultivos es aportada en forma natural por las precipitaciones, pero cuando ésta es escasa o su distribución no coincide con los períodos de máxima demanda de las plantas, es necesario aportarla a través del riego.

En el siglo XX, mientras la población mundial se triplicó las extracciones de agua para los diferentes sectores se sextuplicaron. Esta situación aumenta el grado de presión sobre los recursos hídricos. México a nivel mundial ocupa el octavo lugar de mayor extracción de agua con 80.6 $km^3 \cdot año^{-1}$ destinando a la agricultura el 76.7 % (FAO-Aquastat, 2008). El principal uso del recurso hídrico a nivel mundial, conforme a estimaciones de la FAO, es para la agricultura, con el 72 % de la extracción total.

El riego como una ciencia en constante evolución empezó después de los 80´s de tal manera que las técnicas año con año eran cada vez mejores ya que obtenían ahorros de agua y de energía, con un aumento importante en la producción. El riego es fundamental para la alimentación mundial. De la superficie cultivada, sólo el 19 % tiene infraestructura de riego (FAO-Aquastat, 2010), sin embargo produce más de una tercera parte de la producción mundial. México ocupa el sexto lugar a nivel mundial en superficie con infraestructura de riego, mientras que los primeros lugares están ocupados por China, India y los Estados Unidos. La agricultura de riego es la actividad en la que se destina la mayor parte del agua en el mundo (Fereres y Evans, 2006). En muchas zonas áridas y semiáridas la escasez de recursos hídricos junto con la creciente demanda de agua para otros usos está imponiendo una fuerte presión para limitar el uso de agua en la agricultura. Teniendo como resultado una constante necesidad de mejorar la eficiencia de su uso para los cultivos. Por ello, es necesario conocer con más precisión las necesidades hídricas de los cultivos para una mejor programación del riego**.**

I.4 Programación del riego

La programación del riego la definieron Trimmer y Hansen (1994) como el cálculo del aporte de agua que necesita la planta en cada momento. Por lo tanto, la programación del riego debe responder a dos preguntas básicas: a) ¿Cuándo es el momento adecuado para efectuar el riego? la respuesta determina el intervalo entre riegos (frecuencia) y b) ¿Cuál cantidad de agua hay que aplicar en cada uno de los riegos? la respuesta define el volumen de riego a aplicar.

La planificación del riego ha sido abordada a partir de métodos basados en tres parámetros; en variables climáticas, estado hídrico del suelo y, los más recientes, en el estado hídrico de la planta, cada uno de estos métodos presentan numerosas ventajas e inconvenientes (Jones, 2004). Para establecer la programación de riego para cierto cultivo el primer paso es conocer las necesidades de agua del mismo a lo largo de todo su ciclo vegetativo, desde la brotación hasta la caída de hojas. Las necesidades hídricas de una plantación son: el agua transpirada por los árboles y la evaporada por el suelo conocido en su conjunto como evapotranspiración (ET).

I.5 Evapotranspiración (ET)

La mayor parte del agua consumida por un cultivo, es el resultado de dos procesos: la evaporación a la atmósfera a través del proceso de transpiración y evaporación directamente desde la superficie del suelo. Estos procesos ocurren simultáneamente y se engloban en el término evapotranspiración (Campbell y Willianson, 1997; Cohen *et al*., 1997; Faci y Martínez-Cob, 1993; Fereres, 1978; Gill *et al*., 1996). El conocimiento de la ET es esencial para un uso eficiente del agua de riego. En estudios sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA), se presta una creciente importancia a la cuantificación de los componentes de la ET por separado, así como su interdependencia. Existe una gran cantidad de bibliografía en la que se encuentra la utilidad, eficiencia y limitaciones de la gran diversidad de los métodos desarrollados para medir y predecir la evapotranspiración, los más destacados en revisiones de Farahani y Ahujab (1996) y Salvucci (1997).

I.5.1 Evapotranspiración de referencia (ET_O)

El concepto de ET_O fue desarrollado para estudiar la demanda ET de la atmósfera, independientemente del tipo de cultivo y sus prácticas de manejo (Allen *et al.*, 1998). La ET_O corresponde a la tasa de ET de una superficie extensa de gramíneas de 8 a 15 cm de altura, uniforme, en crecimiento activo, que cubre completamente el suelo, sin estrés hídrico y libre de enfermedades (Pruitt, 1987). La ausencia de restricciones hídricas en el suelo hace que la ET_O sólo resulte afectada por los parámetros climáticos, representando el poder evaporante de la atmósfera en un tiempo determinado y localidad específica, no teniendo en cuenta ni las características del cultivo ni los factores del suelo. En la actualidad para la estima de la ET_O con parámetros climáticos se recomienda el método FAO Penman-Monteith (Allen *et al*., 1998).

I.5.2 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc)

Se entiende ET_C como la lámina de agua necesaria para recuperar las pérdidas por transpiración y evaporación de un cultivo. El cálculo de la ET_C se realiza mediante el uso de coeficientes de cultivo (K_C), estos dependen fundamentalmente del tipo de cultivo, edad, etapa fenológica, humedad del suelo y cubierta vegetal (Doorenbos y Pruitt, 1977). Los K_C relacionan la ET_O con la ET_C de la siguiente forma:

$$\mathbf{ET\ (mm \cdot d^{-1}) = K_C * ET_O\ (mm \cdot d^{-1})} \qquad \textbf{(EC. 1)}$$

I.5.3 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{Caj})

La ET_{Caj} se refiere a que bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de la ETc debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, aspectos de suelo como salinidad, baja fertilidad y limitación o exceso de agua. Estas desviaciones de la evapotranspiración real respecto de la ET_C se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico KS o ajustando K_C a los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo.

I.6 Cálculo de requerimientos hídricos del cultivo

La correcta planificación de una programación de riego requiere de un conocimiento detallado de la variabilidad espacial y temporal de las necesidades hídricas de los cultivos. El cálculo de los requerimientos hídricos de un cultivo es complejo debido a las muchas interacciones existentes entre los diferentes procesos fisiológicos de las plantas y a la influencia de un gran número de parámetros entre los que destacan las condiciones del medio, técnicas culturales, edad de la plantación, sistema de riego y variedad (Cohen, 1994; Couvillon *et al*., 1988; Gómez-Aparisi, 1991).

Existen diferentes métodos para estimar la ET en los que destacan:

I.6.1 Métodos climáticos

Debido a la dificultad de realizar mediciones de campo para la obtención del valor de ET, esta se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Para este fin se tiene una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semiempíricas, algunas de estas son solamente válidos para condiciones únicas impidiendo una aplicación generalizada. Muchos investigadores han analizado la efectividad de varios métodos para su cálculo en diversas localidades. Como resultado de una

consulta de expertos llevada a cabo en mayo de 1998, el método FAO-Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la ET_O.

I.6.1.1 Método FAO Penman-Monteith

En 1998, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) generó un manual para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos (Allen *et al*., 1998). En esta publicación se redefine el concepto ET_O y se adopta el método de Penman-Monteith como método estándar para su determinación. Esta metodología de cálculo había sido avalada previamente por la comunidad científica internacional (Allen *et al*., 1994; Smith, 1992), dando mejores resultados en comparación con otros métodos (Jensen *et al*., 1990). La aplicación de la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al*., 1994; Allen *et al*., 1998) ha resultado ser una herramienta importante para este fin, ya que en general ha proporcionado estimaciones aceptables de la ET_O diaria (Fuertes, 1995; Fuertes, 1998).

I.6.1.1.1 Ecuación FAO Penman-Monteith

$$\boldsymbol{\lambda ET} = \frac{\Delta(\boldsymbol{R_n} - \boldsymbol{G}) + \boldsymbol{\rho_a C_P} \frac{(\boldsymbol{e_s} - \boldsymbol{e_a})}{\boldsymbol{r_a}}}{\Delta + \boldsymbol{\gamma}\left(\mathbf{1} + \frac{\boldsymbol{r_s}}{\boldsymbol{r_a}}\right)} \qquad \textbf{(EC. 2)}$$

Dónde: λ es el calor latente de vaporización ($MJ \cdot kg^{-1}$), R_n es la radiación neta ($MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$), G es el flujo del calor en el suelo ($MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$), ($e_s - e_a$) representa el déficit de presión de vapor del aire (kPa), ρ_a es la densidad media del aire a presión constante ($kg \cdot m^{-3}$), C_P es el calor específico del aire ($MJ \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$), Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ($kPa \cdot °C^{-1}$), Υ es la constante psicrométrica ($kPa \cdot °C^{-1}$), y r_s y r_a son las resistencias de la cubierta vegetal total y resistencia aerodinámica ($s \cdot m^{-1}$).

I.6.1.2 Métodos de balance de energía

En este método, se realiza un balance total de energía que llega al cultivo, de manera que una parte de la energía recibida será la causante de producir la evapotranspiración. Dando como resultado una transformación de $W \cdot m^{-2}$ a mm de agua evaporada al dividirlo entre el calor latente de evaporación y la densidad del agua. La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía (2.45 $MJ \cdot kg^{-1}$ a una temperatura del aire alrededor de los 20 °C). El proceso de ET es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la

cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la ET aplicando el principio de conservación de energía, es decir, la energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de esta en el mismo período de tiempo. La ecuación de balance de energía se puede escribir como:

$$\mathbf{R_n - G - \lambda ET - H = 0} \qquad \textbf{(EC. 3)}$$

Donde Rn es la radiación neta ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$), H es el calor sensible ($MJ \cdot kg^{-1}$), G es el flujo de calor del suelo ($MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$) y λET es el flujo de calor latente de vaporización ($MJ \cdot kg^{-1}$). Se asume que la energía consumida en fotosíntesis y el calor almacenado son despreciable y solo se consideran flujos verticales y se ignora la tasa neta de energía que se transfiere horizontalmente por advección. Por tanto, la ecuación anterior sólo se aplica a vegetaciones homogéneas en superficies grandes. Los términos R_n y G pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos. Sin embargo, la medida del H es compleja, precisando de medidas de gradientes de temperatura por encima de la superficie.

I.6.2 Métodos basados en el estado hídrico del suelo

I.6.2.1 Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)

El método TDR fue desarrollado por Topp *et al.* (1980; 1982). Este método se basa en la evaluacion de la constante dieléctrica (K) la cual se define como una medida de la capacidad de un material no conductor de transmitir ondas o pulsos electromagnéticos de alta frecuencia. La constante dieléctrica de un suelo seco se encuentra entre los valores de 2 a 5, mientras que para el agua es de 80. Esto significa que cambios relativamente pequeños en la cantidad del agua libre en el suelo tienen grandes efectos sobre las propiedades de propagar una onda electromagnética del medio suelo-agua. Por lo anterior, conocer la constante dieléctrica es una medida sensible del contenido de agua del suelo.

I.6.2.1.1 Principio del funcionamiento TDR

Un sistema TDR consiste en un osciloscopio conectado a dos o tres varillas metálicas que se insertan paralelas en el suelo. Si se aplica una diferencia de potencia a un extremo de las varillas, la energía se trasmite a lo largo de las mismas hasta el otro extremo, donde son reflejadas hacia el osciloscopio. En el mismo se mide la evolución del potencial a lo largo del tiempo. La velocidad de transmisión de la onda en el viaje de ida y vuelta depende de la K del suelo que rodea las varillas.

El periodo de onda medido (t) se convierte a contenido de humedad volumétrico del suelo y mediante una ecuación de segundo grado se corrige el contenido de humeddad del suelo por efecto de sales, es decir, dependiendo de la conductividad eléctrica del suelo (CE) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ecuaciones de segundo grado para corrección del cálculo de contenido volumétrico de agua en el suelo en base a tiempo de propagación de onda (t) con respecto a la conductividad eléctrica (CE) del suelo.

CE ($dS \cdot m^{-1}$)	Polinomio
<1	$\Theta_v(t)=-0.187+0.037t+0.335t^2$
1.8	$\Theta_v(t)=-0.207+0.097t+0.288t^2$
3.0	$\Theta_v(t)=-0.298+0.361t+0.096t^2$

I.6.3 Medidas puntuales tomadas en base a parámetros de la planta

El estado de la planta es el resultado de las condiciones de su entorno, principalmente del clima y del suelo ya que esta se encuentra en medio del sistema suelo-planta-atmosfera y lo hace de forma simultánea por lo que parece lógico emplear medidas tomadas en base a planta como indicadores para la programación del riego. Una de estas medidas es el potencial hídrico foliar y de tallo. Estas medidas aportan información puntual del estado hídrico de la planta, y se limitan a la realización de medidas en partes individuales de esta.

I.6.3.1 Potencial hídrico foliar (Ψ_{hoja}) y potencial hídrico del tallo (Ψ_{Xilema})

El Ψ_{hoja} es un parámetro frecuentemente empleado para analizar el estado hídrico de la planta. Su valor depende de diferentes factores provocando que sus dimensiones sufran variaciones importantes en función del momento del día por las condiciones cambiantes de su entorno, de su etapa de crecimiento (Ruiz-Sánchez e*t al.*, 2007), de la edad de la hoja (Knipling, 1967), así como su orientación y la posición que ocupan (Ferreyra *et al.*, 2007). Esta dependencia podría limitar su uso aunque su medida es universalmente admitida, como la forma más rápida, fiable y económica de evaluar el estado hídrico de las plantas (Ruiz-Sánchez y Girona, 1995).

Diversos estudios han obtenido una buena correlación entre los valores del Ψ_{hoja} medido antes del alba y el estado hídrico del suelo, esto porque la transpiración es mínima por la noche, además es el momento en el cual la planta ha podido recuperar el agua perdida en el día y por tanto está en equilibrio con el contenido de agua del suelo (Sellin, 1999). Esta relación ha sido comprobada en

distintos cultivos (Domingo *et al*., 1996; Nortes *et al*., 2005, Santesteban *et al*., 2011), generando la propuesta de valores críticos de Ψ_{hoja} para iniciar el riego.

Por otro lado, Shackel *et al*. (1997) proponen al potencial hídrico del tallo (Ψ_{Xilema}), medido en hojas cubiertas en bolsa de plástico y aluminio en un tiempo aproximado de 2 horas antes de la medición, para alcanzar una estabilización por efecto de la eliminación de la transpiración como indicador del estado hídrico de la planta, sin embargo Fultron *et al.* (2001) indican que en nogales, almendros y ciruelos este equilibrio se logra después de diez minutos, así como, en condiciones de campo, el potencial hídrico debe ser medido en un lapso no superior a 1 minuto después de haber cortado la hoja (Ferreyra *et al.*, 2007). El principio reside en que al no existir transpiración, el potencial hídrico (Ψ) medido coincide con el Ψ del xilema de la hoja antes del corte y por esto puede ser utilizado para estimar Ψ_{Xilema} en el punto de unión de la hoja. Entre sus ventajas destacan su menor variabilidad y que refleja mejor la disminución de agua en el suelo que Ψ_{hoja}.

El equipo empleado en campo para determinar el Ψ_{hoja} y Ψ_{Xilema} es la cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965). Existe confusión en relación con lo que verdaderamente mide, es decir, si el Ψ de la muestra es el Ψ_{hoja} o Ψ_{Xilema}. Hsiao (1990) declara que el Ψ medido con la cámara de presión es el equivalente al Ψ_{Xilema} solo en los casos donde el equilibrio hídrico existía antes del corte, ya que en este caso no existe movimiento de agua y el Ψ de la hoja es igual al del xilema, y la presión medida en la cámara (P) representa la tensión a la que se encontraba la savia en el xilema antes del corte, es decir:

$$\mathbf{- P = \Psi_{Xilema} = \Psi_{hoja}\ (sin\ transpiración)} \qquad \textbf{(EC. 4)}$$

El principal inconveniente que presentan las mediciones de Ψ para su uso como indicador para la programación de riego es la dificultad de su automatización en campo.

I.6.4 Medidas continúas tomadas en base a planta

Los esfuerzos encaminados a programar el riego en base a medidas continuas del estado hídrico de la planta son cada vez de mayor interés (Goldhamer y Fereres, 2001). Esto se debe a que las estimaciones de la ET y las mediciones del contenido de agua en el suelo no son un reflejo directo del estado hídrico de las plantas, por lo que la propia planta es el mejor indicador de su estado hídrico (Jones, 2004). En la actualidad hay diferentes métodos que proporcionan mediciones y que se están sugiriendo para la programación del riego en base a medidas de planta, por ejemplo

flujo de savia, temperatura del dosel vegetal y FDT, estos son algunos de las más relevantes, destacando las variaciones micrométricas del diámetro del tallo que suelen ser, en la mayor parte de los frutales, los indicadores más sensibles al estrés hídrico (Ortuño *et al*., 2010).

I.6.4.1 Fluctuaciones de diámetro del tallo (FDT)

Desde hace más de un siglo se tiene conocimiento de que el crecimiento radial del tallo de los árboles es uno de los indicadores más sensibles del estrés hídrico (Friedrich, 1897; citado en Offenthaler *et al*., 2001). Gracias al desarrollo tecnológico en electrónica, informática y ciencia de los materiales, las mediciones de las variaciones radiales de distintas partes de las plantas han recobrado una notable importancia como indicadores del estado hídrico (Fereres y Goldhamer, 2000; Ginestar y Castel, 1996;), aunado a esto el gran potencial que poseen para ser empleadas en la programación automatizada del riego (Goldhamer y Fereres, 2001; Huguet, 1985; Schoch *et al*., 1989, 1990).

El comportamiento del diámetro de un órgano vegetal tiene dos componentes, una referente al crecimiento del órgano y otra a la pérdida de agua. Las variaciones del diámetro del tronco dependen mayormente del proceso de crecimiento (Kozlowski y Winget, 1964), sin embargo, a escala diaria ocurren ciclos de contracción y expansión del mismo (Kozlowski, 1967) pero principalmente a causa de los cambios de contenido de humedad de la planta (Simonneau *et al*., 1993). Las variaciones diarias en el diámetro de tronco poseen una base fisiológica. En el transcurso del día existe un desequilibrio entre la demanda evapotranspirativa de la atmosfera y la capacidad de absorción de agua de las raíces, como consecuencia se reduce el potencial hídrico en xilema, favoreciendo el movimiento lateral desde el floema hacia el xilema provocando la reducción del diámetro del tronco, alcanzando los puntos críticos después del mediodía solar (MNDT), en cambio durante la noche el proceso es inverso a causa de la disminución de la demanda evapotranspirativa de la atmosfera, causando que la planta recupere su equilibrio hídrico y el movimiento del agua adquiere sentido contrario, lo que provoca el hinchamiento del tronco, alcanzando valores máximos antes del alba (MXDT) (Molz y Klepper, 1972). Las diferencias entre los valores máximos y mínimos en dos días consecutivos constituyen las tasas de crecimiento del máximo (CMXDT) y mínimo (CMNDT) diámetro del tronco. La diferencia entre el valor del MXDT y el MNDT para un determinado día constituye la MCD (Figura 1).

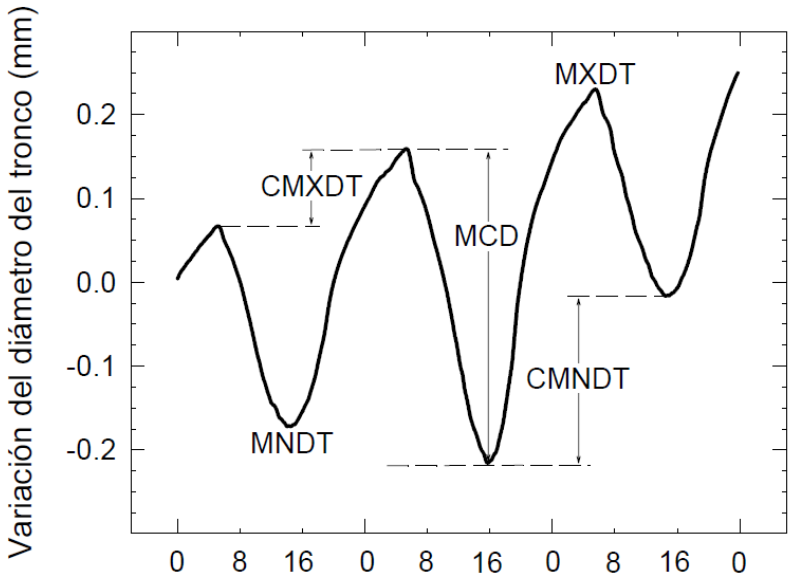

Figura 1. Parámetros derivados de las fluctuaciones de diámetro del tallo: Máximo (MXDT) y mínimo (MNDT) diámetro de tallo, tasas de crecimiento del mínimo (CMNDT) y máximo (CMXDT) diámetro de tallo y máxima contracción de diámetro de tallo (MCD) (Goldhamer y Fereres, 2001)

Para medir de las variaciones micrométricas se utiliza un transformador diferencial de variación lineal (LVDT por sus siglas en inglés), es un sensor que traduce el movimiento del tronco en una señal eléctrica. Las FDT provocan el movimiento del centro ferromagnético de forma cilíndrica que se encuentra entre dos circuitos eléctricos, este movimiento produce una señal eléctrica que esta linealmente relacionado con un desplazamiento (Mellisho, 2011). Estos sensores deben de estar sujetos en portasensores construidos con Invar, una aleación con coeficiente de dilatación térmico casi nulo (Katerji *et al*., 1994). Dichos portasensores deben evitar dañar el órgano a medir e interferir en su desarrollo normal. El contacto entre el extremo de la aguja y el órgano debe ser prácticamente perfecto, para lo que se puede usar una gran variedad de adherentes.

Este método es capaz de suministrar en tiempo real información automática del estado hídrico de las plantas, sin la necesidad de desplazamientos al campo. Además, otra ventaja adicional y muy importante destacar es la posibilidad de utilizar parámetros derivados de FDT en la programación automatizada del riego. La magnitud de MCD depende de múltiples factores, como son: 1) el módulo de elasticidad y las propiedades de difusión del agua de los tejidos del floema (Génard *et al*., 2001; Parlange *et al*., 1975), 2) espesor del floema y tamaño del árbol (Intrigliolo y Castel,

2005; Naor y Cohen, 2003) y 3) carga productiva (Intrigliolo y Castel, 2007a; Moriana y Fereres, 2004;). La evolución de MXDT se ve afectada, principalmente, por los procesos de rehidratación, los cuales dependen directamente del estado hídrico del suelo y sólo puede ser afectada, indirectamente, por la demanda evapotranspirativa del día precedente (Fereres y Goldhamer, 2000). La disminución en el tiempo de los valores de MNDT constituye uno de los signos más precoces de estrés hídrico (Goldhamer *et al*., 1999) y sus cambios conjuntan el efecto del estado hídrico del suelo y de la demanda evapotranspirativa en la MCD (Goldhamer y Fereres, 2001), siendo considerados un buen indicador de la magnitud de transpiración cuando el agua en el suelo se mantiene en un margen adecuado (Huguet *et al*., 1992; Ortuño *et al*., 2004a, 2005, 2006a). Según Daudet *et al*. (2005), existen cinco factores que pueden afectar en distinta magnitud las FDT, siendo: 1) el crecimiento radial irreversible, 2) los cambios en los niveles de hidratación, 3) la expansión térmica del tallo (Améglio y Cruiziat, 1992; Cochard *et al*., 2001; Kozlowski, 1971; Klepper *et al*., 1971; McBurney y Costigan, 1984; Simonneau *et al*., 1993; Zweifel *et al*., 2000), 4) la contracción y expansión de elementos conductores muertos (Irvine y Grace, 1997; Offenthaler *et al*., 2001; Sevanto *et al.*, 2002), inclusive 5) el efecto de las mareas, ocasionado por los ritmos lunares (Zücher *et al.*, 1998).

I.6.4.2 Líneas de referencia a partir de valores de MCD e intensidad de señal

Los primeros intentos de programación del riego en base a medidas de la MCD se basaron en el uso de valores absolutos y los resultados obtenidos manifestaron algunas ventajas respecto de la programación del riego con tensiómetros (Bussi *et al*., 1999; Li *et al.*, 1989). Sin embargo, los fundamentos de las ideas actuales de la programación del riego con medidas de la MCD se deben a Goldhamer y Fereres (2001) quienes recalcan el hecho de que el estado hídrico de las plantas depende de dos aspectos: la disponibilidad de agua en el suelo y las condiciones climáticas, por lo que propone la normalización de los valores de la MCD para ser utilizados en la programación del riego.

El término IS es definido como el valor normalizado de un indicador en relación al presentado en condiciones de referencia (testigo). Para el caso de MCD vendría definido como la relación entre el valor de MCD_{real} y la procedente de árboles bien regados ($MCD_{referencia}$) expresándose de la siguiente manera:

$$\mathbf{IS = MCD_{real} / MCD_{referencia}.} \qquad \textbf{(EC. 5)}$$

Una de las ventajas de este método de programación es que una vez hayan sido establecidos las intensidades de señal para cada estado fenológico, éstos pueden ser más fácilmente reproducibles en lugares distintos a los del ensayo. El principio del método consiste en partir de una dosis de riego determinada por el método tradicional e ir corrigiéndola en un porcentaje al alza o a la baja de modo que la relación MCD / $MCD_{referencia}$ (a partir de líneas base) o MCD / $MCD_{control}$ (MCD de árboles control) se situé lo más próximo posible al valor fijado.

Para la normalización de sus valores de MCD y obtención de la intensidad de señal, puede realizarse de dos formas:

a) Mantener en la misma plantación algunos árboles de referencia, es decir sin limitaciones de riego.

Partiendo del hecho de que el mantener árboles sin limitaciones de riego dificulta en gran medida el manejo de este en plantaciones comerciales, surge el interés de poder contar con líneas de referencia, generando la segunda metodología para la normalización de los datos de MCD.

b) Desarrollar líneas de referencia entre los valores del indicador seleccionado. En este caso MCD en árboles bajo condiciones no limitantes de suministro de agua en suelo y su dependencia con parámetros relacionados con la demanda evapotranspirativa de la atmósfera (variables climáticas). Con las relaciones obtenidas se puede acceder a conocer el valor de referencia del indicador a partir de los parámetros climáticos que más convenga, aunque deben de ser usadas dentro de sus límites de confianza.

I.6.4.2.1 Trabajos realizados para la obtención de líneas de referencia en base a MCD

Debido a que las plantas están en el medio del sistema suelo-planta-atmósfera, cualquier medición del estado hídrico de la planta, si se toma durante las horas de sol, dependerá no sólo del estado hídrico del suelo, sino también de las condiciones ambientales. Por lo tanto, antes que los indicadores de estrés hídrico a base de mediciones de plantas se puedan utilizar para la programación del riego, un valor de referencia debe ser obtenido en plantas bajo condiciones no limitantes de agua del suelo. Una opción podría ser definir previamente los efectos de la demanda evapotranspirativa en el indicador de estado hídrico de la planta y posteriormente utilizar esta relación o "línea de referencia” como una referencia para corregir los valores reales obtenidos de MCD.

En el Cuadro 2 se pueden observar líneas de referencia obtenidas en diferentes trabajos de investigación.

Cuadro 2. Lista de las mejores ecuaciones de referencia aptas para la máxima contracción diaria de tallo (MCD) en función de las variables ambientales de evapotranspiracion diaria de referencia (ET_O), radiación global (R_d), Temperatura media diaria (T_m), Temperatura diaria al medio día (T_{md}), deficit de presión de vapor medio diario (DPV_m), deficit de presión de vapor diaria al medio día (DPV_{md}), deficit de presión de vapor medio entre las 10 y 15 hr (tiempo solar) (DPV_{mx}) para varios cultivos leñosos, basado en Ortuño *et al*. (2010).

Especie	Edad	Periodo fenológico	Ecuación de referencia	r^2	Fuente
Almendra (*Prunus dulcis*) cv Fritz	Joven	Abril- Mayo	$MCD=0.01+0.07VPD_m$	0.77	Goldhamer y Fereres (2004)
Almendra (*Prunus dulcis*) cv Marta	Joven	Temporada Etapas fenológicas II-III Etapas fenológicas IV Etapas fenológicas V	$MCD= 0.16DPV_{mx}$ $MCD= 0.17DPV_{mx}$ $MCD= 0.17DPV_{mx}$ $MCD= 0.14DPV_{mx}$	0.80 0.78 0.74 0.68	Egea *et al*. (2009)
Almendra (*Prunus dulcis*) cv Price	Joven	Junio-Noviembre	$MCD=-0.02 + 0.05DPV_m$ $MCD=-0.11 + 0.01T_m$	0.64 0.59	Fereres y Goldhamer (2003)
Manzana (*Malus communis*) cv Golden Delicious	Joven	Temporada	$MCD= 0.03 + 0.07ET_O$	0.79	C. Biel (datos no publicados)
Limón (*Citrus limon*) cv Fino	Adulto	Temporada	$MCD=-0.04 + 0.01T_m$	0.77	Ortuño *et al.* (2009a)
Mandarina (*Citrus clementina*) cv Clementina de Nules	Adulto	Temporada	$MCD= 0.11 + 0.01R_d$	0.52	Velez *et al*. (2007)
Mandarina (*Citrus clementina Citrus reticulata*) cv Fortune	Adulto	Marzo-Octubre	$MCD=-0.17 + 0.01T_{md}$	0.81	Pagán *et al*. (2008)
Olivo (*Olea europaea*) cv Arbequina	Joven	Agosto-Septiembre	$MCD=-0.18 + 0.27DPV_m$	0.80	Moriana y Fereres (2004)
Olivo (*Olea europaea*) cv Manzanillo	Adulto	Junio-Septiembre	$MCD=-0.07 + 0.13DPV_{md}$ $MCD=-0.78 + 0.04T_{md}$	0.83 0.79	Moreno et al. (2006)
Olive (*Olea europaea*) cv Picual	Adulto	Temporada Agosto-Septiembre	$MCD= 0.03 + 0.16DPV_m$ (Carga baja de cultivos) $MCD= 0.05 + 0.22DPV_m$ (Alta carga de cultivo)	0.84 0.71	Moriana y Fereres (2004)
Durazno (*Prunus persica*) cv Flordastar	Joven	Junio Julio Agosto-Octubre	$MCD=-0.55 + 0.03T_{md}$ $MCD=-1.07 + 0.05T_{md}$ $MCD=-0.19 + 0.02T_{md}$	0.75 0.79 0.72	Conejero *et al.* (2007a)
Platano de sombra (*Platanus hispanica*)	Joven	Temporada	$MCD=-0.02 + 0.03ET_o$	0.38	C. Biel (datos no publicados)
Ciruelo (*Prunus salicina*) cv Black Gold	Adulto	Temporada Crecimiento de la fruta Poscosecha	$MCD= 0.01 + 0.11DPV_m$ $MCD= 0.01\ e^{0.01ETO}$ $MCD= 0.04 + 0.09DPV_m$	0.65 0.73 0.54	Intrigliolo y Castel (2006)
Ciruelo (*Prunus salicina*) cv Black Gold	Adulto	Mayo-Cosecha	$MCD= 0.04 + 0.11DPV_m$ (Carga baja de cultivos) $MCD= 0.04 + 0.15DPV_m$ (Alta carga de cultivo)	0.58 0.68	Intrigliolo y Castel (2007a)

I.6.5 Protocolo para la programación del riego en base a máxima contracción diaria de tallo (MCD)

Para la programación del riego en función de un de valor umbral de IS, en este caso basado en la MCD se debe de conocer los posibles impactos o repercusiones en la cosecha y calidad del fruto y además de elaborar criterios de manejo del riego ante los aumentos o disminuciones de los valores de IS.

Goldhamer y Fereres (2001) proponen protocolos para el riego de cultivos leñosos. En el caso de árboles adultos con frecuencias altas de riego (cada dos días o menos) sugieren el siguiente proceso:

a) Seleccionar una fecha de comienzo y aplicar una determinada dosis de riego

b) Cuando la IS exceda el valor umbral tres días consecutivos la dosis de riego se aumenta un 10 %. En el caso contrario, el riego se disminuye un 10 %.

Otros autores han utilizado pequeñas modificaciones, bien programando el riego semanalmente (Vélez, 2004), o bien modificando el número de días en los que la IS debe exceder el valor umbral para aumentar el riego (García-Orellana *et al*., 2007).

I.6.6 Requerimientos de un indicador del estado hídrico de la planta para la programación del riego

Para que un indicador del estado hídrico pueda ser considerado como una herramienta en la programación del riego debe de presentar un grado alto en sensibilidad y tiempo de respuesta para diagnosticar cambios en el estado hídrico de la planta, debiendo existir una determinada proporcionalidad entre la intensidad de señal del indicador y el nivel de estrés hídrico desarrollado. Uno de los principales inconvenientes de la utilización de indicadores del estado hídrico basados en medidas en la planta es la variabilidad entre árboles de las medidas realizadas (Ginestar y Castel, 1996; Naor, 2000). Por ello, es conveniente utilizar la metodología propuesta por Goldhamer *et al*. (2000) para caracterizar la relación señal/ruido de dichos indicadores, y poder comparar su utilidad para el manejo del riego. Se entiende por ruido el grado de dispersión como el coeficiente de variación (CV) del valor del indicador (Goldhamer y Fereres, 2001).

Si bien resulta imprescindible que el indicador utilizado para la programación del riego posea una adecuada sensibilidad para detectar una situación de déficit hídrico, este indicador debe ser igualmente sensible para detectar la recuperación desde una situación de estrés.

II. JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas, aun en condiciones normales de precipitaciones, el agua se ha convertido en un recurso cada vez más escaso debido a la mayor demanda originada por el aumento de población y el desarrollo económico. La grave situación que enfrenta la agricultura de las zonas áridas del norte de México debido a la baja disponibilidad de agua, da lugar a que actualmente México enfrente complicadas temporadas de sequías. La paradoja del agua en México es que para el Sur del país está el 68 % de la escorrentía total; teniendo sólo el 23 % de la población y produciendo sólo el 14 % del producto interno bruto (PIB) y para el Norte del país se encuentra el 32 % de la escorrentía total teniendo el 77 % de la población y produciendo el 86 % del PIB (Sánchez *et al.*, 2008). Por otro lado en cuanto a precipitación, el estado de Coahuila ocupa el tercer lugar con menor precipitación del país, superando solo a Baja California y Baja California Sur; cuya lámina media anual de acuerdo con los datos del Servicio Meteorológico Nacional, es de 423.9 mm, muy inferior al promedio nacional que asciende a 830.9 mm. En los distintos usos del agua es importante señalar que el 77 % que se utiliza en nuestro país se emplea en la agricultura (CONAGUA, 2008). México a nivel mundial ocupa el octavo lugar de mayor extracción de agua con 80.6 $km^3 \cdot año^{-1}$ destinando a la agricultura el 76.7 % (FAO-Aquastat, 2008) con un total de 258 acuíferos de los cuales 80 están sobre explotados. En estas condiciones de baja disponibilidad de agua resultante de las bajas precipitaciones pluviales o del abatimiento de las reservas de agua subterránea generan la necesidad de incrementar la eficiencia en el uso de este recurso (Lagarda, 2006).

El nogal pecanero es un frutal de gran importancia económica a nivel mundial. Los principales países productores son: Estados Unidos (72 %) y México (25 %). En México la superficie de nogal sembrada aumentó de 38,904 ha en 1980 a 103,866 ha en 2013, de las cuales se tienen establecidas 102,421 ha en condiciones de riego (SAGARPA-SIACON, 2013). Las zonas más productoras de nuez se encuentran localizadas en los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango y Nuevo León (Godoy-Ávila y López-Montoya, 2000), representando el 95.27 % del total de la producción de nuez (SAGARPA-SIACON, 2013). El estado de Coahuila tiene una superficie de 16,195 ha, que corresponde al 15.59 % de la superficie total nacional, con una producción de 13,582 ton y un rendimiento promedio de 1.11 $ton \cdot ha^{-1}$ (SAGARPA-SIAP, 2013).

Debido a la importancia comercial del nogal pecanero para el estado de Coahuila, su alto consumo hídrico (desde 1.20 a 2.0 m de lámina dependiendo del sistema empleado para su aplicasion), así como la calidad pobre y baja disponibilidad del agua de riego en las regiones de mayor producción en México, es evidente la necesidad de determinar la demanda hídrica de este cultivo (Chávez *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007), aunque esta necesidad no es reciente, los métodos de estimarla son cada vez más eficientes mejorando la toma de decisiones. El agua es el principal factor de manejo que permite alcanzar una alta producción y calidad de la nuez. La disponibilidad del agua para el nogal está en función de la cantidad y oportunidad con la que se suministra al suelo que permita al árbol abastecerse de acuerdo con su demanda por etapa fenológica (Godoy *et al*., 2000), de ahí la necesidad de buscar nuevos métodos para determinar el ¿Cuándo? y el ¿Cuánto? regar.

Los métodos para programación de riego están basados en tres parámetros: suelo, planta y atmosfera. Los métodos que más interés han tomado en los últimos años son los basados en el estado hídrico de la planta dado que las plantas se encuentran en medio del sistema suelo-planta-atmósfera, siendo el estado hídrico de la planta el resultado de la disponibilidad de agua del suelo y la demanda evapotranspirativa. Entre estos métodos destacan los parámetros obtenidos a partir de mediciones de FDT que han demostrado ser muy sensible a los cambios en el suministro de agua en la planta y déficit hídrico. Uno de los parámetros más comúnmente utilizado es la MCD que en diferentes investigaciones ha demostrado ser el mas adecuado para el desarrollo de la programación de riego automatizado en árboles frutales (Conejero *et al*., 2007b; Ortuño *et al*., 2009; Moriana, 2010), además de presentar mejor grado de correlación con las variables climáticas para el de desarrollo de líneas de referencia en frutales adultos. A esto surge la necesidad de desarrollar valores de referencia o de umbral para los parámetros escogidos. A la fecha hay una importante cantidad de experimentos en especies arbóreas que han confirmado la sensibilidad de los parámetros derivados de las medidas continuas de las FDT a la disponibilidad de agua en el suelo cuando son sometidas a diferentes aportes hídricos pero su aplicación en la programación de riegos en una especie implica la necesidad de experimentos previos para buscar los valores de referencia.

III. HIPOTESIS

Para los tratamientos evaluados las relaciones entre la máxima contracción diaria de diámetro de tallo (MCD) y variables climáticas son iguales en ambas localidades.

IV. OBJETIVOS

IV.1 Objetivo general

Generar las bases para la programación del riego en cultivo de nogal pacanero en la región Norte y Sureste de Coahuila desarrollando líneas de referencia basadas exclusivamente en las medidas de la máxima contracción diaria del tallo (MCD) para determinar la intensidad de señal (IS).

IV.1.1 Objetivos específicos

a) Determinar las líneas de referencia en base a la MCD y las variables climáticas más representativas medidas en una estación meteorológica automatizada local.

b) Determinar la IS para cada localidad y en base a este parámetro poder en un futuro diseñar la programación de riego en tiempo real.

c) Detectar los grados de estrés en base a la MCD que nos permita incrementar la eficiencia en el uso de agua de riego sin que el cultivo sufra algún estrés ni disminución en el rendimiento mediante las mediciones de la asimilación de CO_2/H_2O (eficiencia intrínseca del agua), medidas con un IRGA.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de investigación se desarrolló en dos localidades agroclimáticas del estado de Coahuila: la primera en el municipio de Zaragoza (región Norte) y la segunda en el municipio de Saltillo (región Sureste) en el cultivo de nogal pecanero para la determinación de las líneas de referencia en base a medidas de MCD para generar las bases del conocimiento y en un futuro la programación de riego automatizado en este cultivo, este estudio se llevó acabo en el periodo Mayo-Noviembre del 2014 comprendiendo 4 etapas fenológicas del cultivo.

V.1 Sitios experimentales

El experimento se desarrolló en dos localidades agroclimáticas de Coahuila. El primer sitio experimental se ubicó en la huerta de nogal pecanero del rancho Tres Marías ubicado en el municipio de Zaragoza, Coahuila con coordenadas geográficas 28º 28’ 31” de latitud N, 100º 55’ 10” de longitud O, a una elevación de 360 msnm, con características climáticas de temperatura mínima de 1 °C y máxima de 36.21 °C, humedad relativa de 62.53 % y precipitación de 471.4 mm (61.5 % en los meses de Mayo, Septiembre y Noviembre). El segundo sitio experimental se ubicó en la huerta de nogal pecanero del rancho San Juan de la Vaquería ubicada en el municipio de Saltillo, Coahuila con coordenadas geográficas 25º 15’ 58” de latitud N y 101º 12’ 57” de longitud O, a una altura de 1821 msnm, con características climáticas de temperatura mínima de 2 °C y máxima de 27.67 °C, humedad relativa de 56.03 % y precipitación de 499.2 mm (71.8 % en los meses de Junio, Julio y Septiembre).

V.2 Material biológico

En el rancho Tres Marías se utilizaron árboles de nogal pecanero variedad Wichita, nogales con una altura promedio de 12 m y un marco de plantación de 15 m x 15 m en marco real, con edad de 35 años y en el rancho San Juan de la Vaquería árboles de Nogal pecanero variedad Wichita con marco de plantación real de 10 m x 10 m con una edad de 25 años.

V.3 Tratamientos y material utilizado

En cada una de las regiones se establecieron 3 tratamientos de riego 75 % ET_O (Sub-irrigado), 100 % ET_O (Testigo) y 125 % ET_O (Sobre-irrigado). Teniendo en cada uno de ellos un dendrómetro LVDT en el tronco del árbol a una altura de 1.20 m y 2 TDRs a profundidades de 0-30 y 30-60 cm; comprendiendo un estrato total de suelo de 0-60 cm. En el tratamiento Testigo se instaló además

un pluviómetro para monitoreo de lámina de riego. Todos estos conectados a un Datalogger para el almacenamiento de datos.

V.4 Variables evaluadas

Se evaluaron: potencial hídrico, tasa fotosintética, conductancia estomática, transpiración, temperatura del aire, temperatura de la hoja, radiación PAR, eficiencia intrínseca del uso del agua, contenido volumétrico de agua en base a volumen en el suelo a profundidad de 0-30 y 30-60 cm, lamina real consumida, parámetros basados en fluctuaciones de diámetro de tallo, datos climáticos, rendimiento, porcentaje de llenado y contenido de humedad de nuez.

V.4.1 Descripción de las variables evaluadas

V.4.1.2 Potencial hídrico de planta (Ψ_{Xilema})

El potencial hídrico se midió con una cámara de presión Scholander modelo 3115 portable marca SoilMoisture Equipament Corp. California USA. Realizando 6 mediciones para cada uno de los tratamientos para ambas localidades, estas mediciones se tomaron en 5 orientaciones del lado Sur de la copa del árbol (S, S-SE, SE, S-SO y SO); en hojas sanas, bien desarrolladas y con tiempo de estabilización de 30 minutos (Ferreyra, 2007) (hojas cubiertas con aluminio para estabilizar el potencial evitando la transpiración) a una altura aproximada de 3.5 m del suelo en horario de mayor demanda evapotranspirativa.

V.4.1.3 Tasa fotosintética, conductancia estomática, transpiración, temperatura del aire, temperatura de la hoja, radiación PAR, eficiencia intrínseca del uso del agua

La tasa fotosintética, conductancia estomática (g_s), transpiración, temperatura del aire (T_a), temperatura de la hoja (T_h), radiación PAR y la eficiencia intrínseca del uso del agua para ambas regiones se obtuvieron de las mediciones realizadas con un IRGA modelo LI-6400XT marca LI-COR, Lincoln, Nebraska USA. Se llevaron a cabo 3 mediciones en todo el periodo de evaluación, en días con características climáticas de cielo despejado y hora de radiación máxima, en hojas sanas y bien desarrolladas a una altura aproximada de 3.5 m del suelo en 5 orientaciones del lado Sur de la copa del árbol (S, S-SE, SE, S-SO y SO).

V.4.1.4 Contenido de humedad en base a volumen en suelo y lámina real consumida.

El contenido de humedad en el suelo se evaluó con el método del reflectometría en dominio de tiempo (TDR). Se colocaron dos TDRs modelo CS615 marca Campbell SCI, Logan Utah, USA

por cada tratamiento en ambas regiones en el perfil del suelo para analizar el frente de mojado colocados a intervalos de profundidad de 0-30 y 30-60 cm esto porque en el estrato 0-60 cm se lleva a cabo el 80 % de la extracción de agua (Vásquez, 2013), la frecuencia de muestreo y almacenamiento de datos se realizó en periodos de 30 minutos mediante un Datalogger modelo CR1000 marca Campbell SCI, Logan Utah, USA.

Para lámina consumida por etapa fenológica se empleo la formula:

$$\boldsymbol{Lámina\ consumida} = \sum[(\boldsymbol{\theta_{vdr}} - \boldsymbol{\theta_{var}})(\boldsymbol{prof})(\mathbf{10})] \qquad \textbf{(EC. 6)}$$

Donde: Θ_{var} contenido de humedad en suelo en base a volumen despues del riego (cm^3cm^{-3}), Θ_{vdr} es contenido de humedad en suelo en base a volumen antes del riego (cm^3cm^{-3}) y prof es profundidad (cm).

V.4.1.5 Variaciones micrométricas de diámetro de tallo (MCD)

Para la medición de las variaciones micrométricas del diámetro de tallo se utilizaron dendrómetros de desplazamiento lineal y variable (LVDT) modelo DF 2.5 marca Solartron Metrology, Bognor Regis UK, montados en porta sensores construidos con Invar (aleación de 35 % Ni y 64 % Fe, con un coeficiente de dilatación térmico cercano a cero (Katerji *et al*., 1994) y aluminio Modelo R-150, Requena Co.) en cada uno de los tres tratamientos en ambas regiones. Las lecturas fueron tomadas con una frecuencia de 10 segundos y promediadas cada 30 minutos para después ser almacenados en un Datalogger modelo CR1000 marca Campbell SCI, Logan Utah, USA.

V.4.1.6 Variables climáticas: evapotranspiración de referencia FAO-Penman-Moteith (ET_O), precipitación, temperatura media (T_{med}), mínima(T_{min}) y máxima(T_{max}), déficit de presión de vapor (DPV), humedad relativa (HR) y radiación global promedio (RG)

Las variables climáticas para la región Norte se obtuvieron de la estación meteorológica CAMPO EXPERIMENTAL ZARAGOZA ubicada en Zaragoza, Coahuila con coordenadas: latitud 28° 35' 56" y longitud 100° 54' 43.8" y para la región Sureste de la estación meteorológica RANCHO EL PADRINO ubicada en Saltillo, Coahuila con coordenadas: latitud 25° 14' 14.9" y longitud 101° 10' 16" (INIFAP 2014).

V.4.1.7 Rendimiento, porcentaje de llenado y contenido de humedad de nuez

Se procedió a la cosecha, limpieza y pesado de nuez para obtener el rendimiento de cada uno de los tratamientos.

Para el porcentaje de llenado se calculó mediante la fórmula:

$$\%\mathbf{Llenado} = \frac{\mathbf{PA}}{\mathbf{PTN}} \times \mathbf{100} \qquad (\mathbf{EC.\ 7})$$

Dónde: PA es el peso de almendra (g) y PTN peso total de nuez (g).

Para contenido de humedad se utilizó un analizador de humedad portátil modelo M-3G marca Dickey-john Corp. USA.

V.5 Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables evaluadas se analizaron estadísticamente mediante el Software del Sistema de Análisis Estadístico (SAS) versión 9.1. El análisis de varianza se realizó en base a un diseño experimental bloques al azar y un análisis de medias LSD ($P \leq 0.05$).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos de las variables fisiológicas del cultivo, variables climáticas y condiciones de humedad de suelo para ambas localidades agroclimáticas estudiadas.

VI.1. Localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila

VI.1.1 Variables climáticas

Las características climáticas presentan una tendencia de comportamiento muy característico anualmente como se puede observar en el Cuadro 3. Los meses de mayor demanda evapotranspirativa son los meses de Junio, Julio y Agosto con 141.60, 139 y 132 mm de ET_O para después ir descendiendo con el paso del tiempo y llegar a sus valores mínimos en el mes de Noviembre. Se puede observar además la relación que guarda el DPV con la ET_O. Durante el periodo de evaluación, los meses con mayor precipitación fueron Junio y Septiembre con 152.80 y 137.60 mm respectivamente. Las mayores temperaturas se tuvieron en el mes de Junio, Julio y Agosto llegando hasta los 27.67 °C como máximo y los de menor temperatura Octubre y Noviembre de hasta 4.57 °C. Para el caso de la radiación los valores fueron muy parecidos a excepción del mes de Noviembre que presenta una disminución por efecto de la temporada y próxima llegada del invierno.

Cuadro 3. Promedios mensuales de temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), temperatura media (T_{med}), humedad relativa (HR), déficit de presión de vapor (DPV), radiación global (RG), evapotranspiración de referencia (ET_O) acumulada y precipitación acumulada correspondientes al periodo del mes de Junio al mes de Noviembre del año 2014, obtenidas de la estación meteorológica automatizada Rancho el Padrino, Saltillo, Coahuila.

Mes	Precipitación (mm)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)	HR (%)	DPV (kPa)	RG ($W \cdot m^{-2}$)	ET_O (mm)
Junio	152.80	27.67	14.34	20.60	60.01	0.97	495.82	141.60
Julio	68.20	26.58	14.34	19.63	63.49	0.83	484.48	139.00
Agosto	54.80	27.24	13.57	19.52	63.68	0.82	481.48	132.00
Septiembre	137.60	24.66	13.00	18.00	74.11	0.53	431.72	104.20
Octubre	0.00	24.61	8.50	16.33	60.10	0.74	506.30	115.60
Noviembre	0.00	18.69	4.57	11.00	64.52	0.47	398.39	76.30

Existe una diferencia de características climáticas en ambas localidades presentando mayores valores la localidad Zaragoza, Coahuila con promedios mensuales de T_{max} de hasta 36.21 °C, T_{media} mínima de 21.75 °C, DPV de 1.75 kPa y ET_O de hasta 182.10 mm.

VI.1.2 Contenido volumétrico de agua en suelo (Θ_v)

Las condiciones de humedad del suelo en base a volumen así como su evolución a través del tiempo se muestran en la Figura 2, en ella se puede observar que las frecuencias de riego fueron cada 5 o 9 días, esto basado en el paquete tecnológico del manejo del riego del agricultor cooperante, registrándose 19 riegos en el tiempo de evaluación (del día juliano 167 al 331), presentando fluctuaciones y diferencias en los contenidos de humedad entre los tres tratamientos. En el periodo comprendido del día 170 al 191 correspondiente al mes de Junio y principios de Julio (etapa fenológica de estado acuoso) se observó un mayor volumen de aplicación de riego y mayores contenidos de humedad esto por encontrarse en los meses de mayor demanda evapotranspirativa (Cuadro 3), pasado este periodo se presentó una disminución en los contenidos de humedad y un comportamiento más uniforme.

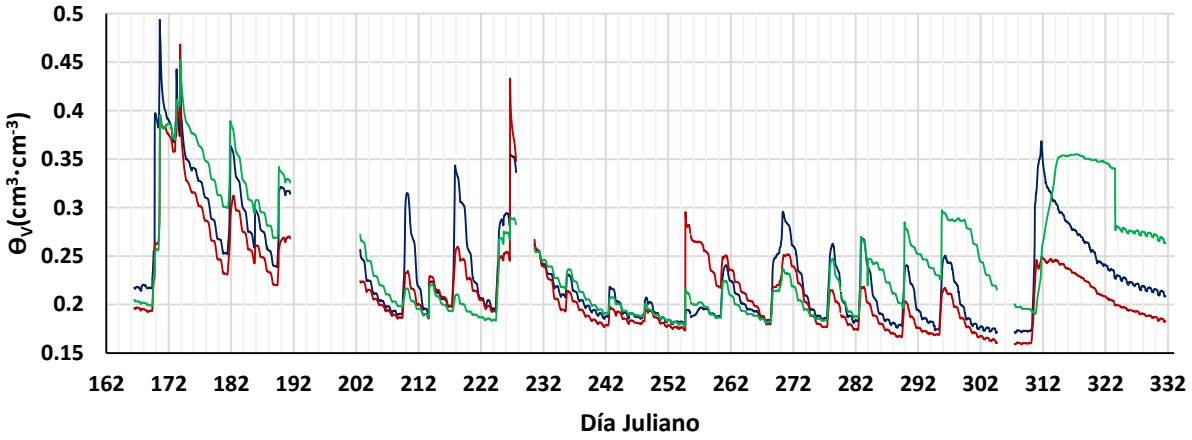

Figura 2. Evolución del contenido de humedad en base a volumen (cm^3cm^{-3}) para el estrato 0-60 cm para los tratamientos Testigo (—), Sobre-irrigado (—) y Sub-irrigado (—) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila, durante el periodo de evaluación comprendido entre los días 142 a 331 (días julianos) del año 2014.

Entre los periodos de riego se observaron pequeñas variaciones o recuperaciones de contenido de humedad del suelo durante la noche, esto se debe al fenómeno de ascenso capilar. Algo importante de señalar fue la realización de una evaluación del sistema de riego en el que se encontraron problemas de taponamientos a causa de que el sistema presenta un sistema de filtración deficiente generando caídas de presión y provocando que no se obtuviera un buen control entre los tratamientos de riego, a pesar de la limpieza y revison constante, estos se puede ver de forma más

marcada en los días 208 y 254. Durante el periodo de estudio existió un aporte de 409.40 mm de agua por precipitación.

VI.1.3 Lámina total consumida por etapa fenológica

El total de la lámina consumida durante el tiempo de evaluación fue un 17.25 % menos para el tratamiento Sub-irrigado y un 26 % más para el tratamiento Sobre-irrigado con respecto al tratamiento Testigo.

Como se muestra en el Cuadro 4, la etapa fenológica con mayor lámina consumida fue estado acuoso que corresponde al periodo del 26 Junio al 03 de Agosto, siendo los meses de mayor demanda evapotranspirativa, además de ser una de las etapas fenológicas más susceptible a estrés hídrico y que repercute directamente en la calidad de la almendra (Sparks, 1986). Para la etapa de maduración de fruto se observó una disminución en la lámina consumida para el tratamiento Testigo pero un aumento en comparación a la etapa fenológica de endurecimiento de cáscara para los tratamientos Sobre-irrigado y Sub-irrigado.

Cuadro 4. Lámina consumida en las etapas fenológicas del nogal pecanero comprendidas entre el periodo 142 a 331 (días julianos) del año 2014 en la localidad rancho, San Juan de la Vaquería, Saltillo Coahuila.

Etapa Fenológica	Periodo (Día Juliano)	Lamina Consumida (mm)		
		Testigo	Sobre-irrigado	Sub-irrigado
Desarrollo del fruto	142-173	--	--	--
Estado acuoso	173-215	240	306	210
Endurecimiento de cáscara	215-255	138	180	126
Maduración de fruto	255-294	180	240	204
Inter maduración-cosecha	294-323	72	126	60
Después de cosecha	323-333	48.6	12	12
	Total (mm)	697.35	900	630

VI.1.4 Conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosinteticamente activa (PAR), temperatura del aire (T_a), temperatura de la hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA)

Para esta localidad se llevaron a cabo dos muestreos de fotosíntesis en los días julianos 177 y 202 del año 2014. En el Cuadro 5 se presentan los resultados obtenidos, en los que observaron valores bajos de conductancia estomática en comparación a los obtenidos en Zaragoza, Coahuila.

Cuadro 5. Conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura de aire (T_a), temperatura de hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila, en el año 2014.

Día				177			
Tratamiento	**g_s ($molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)**	**A ($\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)**	**PAR ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)**	**T_a (°C)**	**T_h (°C)**	**T ($mmolH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)**	**EIUA ($\mu molCO_2/mmol\ H_2O$)**
Sobre-irrigado	0.12a	34.04a	1562.60a	29.78c	31.37b	4.82a	7.06a
Testigo	0.09a	33.07a	1289.20a	30.80b	32.47ab	3.46a	9.56a
Sub-irrigado	0.07a	34.29a	1524.90a	31.10a	33.45a	4.55a	7.54a
Día				**202**			
Sobre-irrigado	0.17a	38.91a	1558.40a	33.08c	33.51a	7.37a	5.28a
Testigo	0.12a	37.11a	1578.10a	34.31b	35.13a	6.21a	5.98a
Sub-irrigado	0.15a	36.99a	1589.00a	35.33a	35.74a	7.01a	5.28a

Medias seguidas con la misma letra son estadísticamente iguales LSD (*$P \leq 0.05$)*

Las condiciones climáticas para estas dos fechas fueron una T_{max} de 25.2 y 27.3 °C, T_{min} de 11.9 y 14.2 °C, DPV de 0.64 y 1.22 kPa y contenidos de humedad de suelo en base a volumen (Θ_V) de 35 a 22 % respectivamente, ambas fechas con aportes de 56.8 y 52.4 mm por efecto de precipitación, es decir, condiciones parecidas en ambas fechas de muestreo. Los valores de conductancia estomática fueron de 0.07 a 0.17 $molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$ para el primer muestreo y de 0.12 a 0.17 $molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$ para el segundo, no encontrando diferencias significativas, estos valores difieren con respecto a los obtenidos en la localidad de Zaragoza, que fueron en promedio de 0.30 $molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para el tratamiento Testigo y 0.29 $molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para el tratamiento Sobre-irrigado y Sub-irrigado siendo valores superiores aun con valores de DPV de hasta 2.17 kPa. Esto puede deberse a la diferencia de edad entre los árboles de ambas localidades (diez años), así como las condiciones de manejo de riego (sistema de aplicación, frecuencias y láminas de riego aplicadas).

No se encontraron diferencias significativas en la variable fotosíntesis, teniendo valores promedios de 33.08 y 37.67 $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para los muestreos de los días julianos 177 y 202 respectivamente, siendo inferiores a los registrados en la localidad de Zaragoza y su comportamiento se explica por la relación que guarda con la g_s sin olvidar la radiación PAR incidente en el momento del muestreo. Estos valores de fotosíntesis difieren al valor de 12

$\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ encontrados por Rocha *et al*. (2009) en plántulas de nogal pecanero, y de 17.95 $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ en árbolers adultos (Zermeño *et al*. 2014).

Para el caso de la T_h y T_a mostró un comportamiento inverso a lo esperado, es decir, la temperatura de la hoja es mayor que la temperatura del aire, siendo una característica importante para evaluar el comportamiento estomático, explicando los valores bajos que presentó la g_s que está relacionada con la disponibilidad de agua en el suelo y como respuesta a las condiciones climáticas imperantes, combinado con valores bajos de transpiración (valor promedio de 4.27 $mmolH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para el primer muestreo), encontrándose diferencias de 2.35 °C como máximo y 0.41 °C como mínimos entre T_h y T_a.

Los valores de transpiración encontrados fueron bajos para el primer muestreo, aumentando en el segundo, registrando valores promedios de 4.27 y 7.10 $mmolH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (efecto del comportamiento de la g_s), no presentando diferencias significativas entre los tratamientos, los valores de DPV para los días de muestreo fueron de 0.64, 1.22 kPa respectivamente, sin olvidar que el potencial hídrico presento valores más negativos para el día 202, y menos negativos para el día 177 (Cuadro 6), esto se explica por los valores de DPV que se presentaron para estos dos días. En el caso de EIUA se presentaron valores de 5.28 a 9.56 $mmolCO_2$ / $molH_2O$, es decir, por cada mol H_2O transpirado se fijó 5.28 a 9.56 mmol CO_2, entre más alto sea este valor de eficiencia significa un mejor uso del agua. Estos valores son relativamente mayores a los obtenidos por Zermeño *et al*. (2014) de 3.44 mmol CO_2 / mol H_2O en cultivo de nogal.

VI.1.5 Potencial hídrico de tallo (Ψ_{Xilema})

El Ψ_{Xilema} es afectado tanto por las condiciones climáticas incidentes y las condiciones de humedad de suelo. Para este estudio las mediciones de potencial hídrico se presentan en el Cuadro 6. Se realizaron 6 muestreos que comprenden las etapas de estado acuoso (día juliano 117 y 202), endurecimiento de cáscara (día juliano 278 y 255) y maduración (día juliano 279 y 304). Su comportamiento a través del tiempo fue variable presentando sus valores más negativos en la etapa de estado acuoso y maduración de fruto.

Se observó que para los días 177, 202, 227 y 255 no existen diferencias significativas entre tratamientos. Para los días 227, 255 y 279 los valores de contenidos de humedad fueron altos ya que el riego fue aplicado un día antes a la medición; pero como se puede observar en el Cuadro 6

el Ψ_{Xilema} para el día 279 presentaron valores más negativos, llegando a valores de -1.1 MPa en comparación con los días 227 y 255 que presentaron el valor más alto de -0.69 y -0.38 MPa respectivamente. Para los días 227, 255 y 279 las condiciones fueron: HR de 62, 73.95 y 54 %, DPV de 0.86, 0.81 y 0.9 kPa y Θ_V de 32, 22 y 20 % respectivamente, explicando los valores de Ψ_{Xilema} obtenidos, además de que potencial hídrico se encuentra muy influido por las características climáticas del momento en que se realice la medida (Naor, 1998; Williams y Araujo, 2002).

Cuadro 6. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{Xilema}) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería Saltillo, Coahuila del año 2014.

Tratamiento	Día Juliano					
	177	202	227	255	279	304
	Ψ_{Xilema} (MPa)					
Testigo	-0.59a	-1.08a	-0.65a	-0.34a	-1.11a	-1.22a
Sub-Irrigado	-0.58a	-1.13a	-0.57a	-0.38a	-0.97a	-1.06b
Sobre-Irrigado	-0.56a	-1.13a	-0.69a	-0.30a	-0.73b	-1.06b

Medias seguidas con la misma letra son estadísticamente iguales LSD (*P ≤ 0.05)*

Para los muestreos de los días julianos 177 y 202, tomados 4 y 5 días después del riego; con aportaciones de 56.8 y 52.4 mm por precipitación y valores de DPV 0.64 y 1.22 kPa respectivamente, presentaron valores de hasta -0.59 y -1.13 MPa. Para el día 304 el Ψ_{Xilema} presentó valores negativos altos explicado por un Θ_V de 18 %, valor inferior en comparación a los muestreos anteriores, aunque algunos estudios discrepan en cuanto a la correlación entre el Ψ_{Xilema} y el contenido de agua en el suelo (Asenjo y Yuste, 2003; Martínez *et al*., 2013), debiéndose probablemente al grado de desequilibrio que surge entre la capacidad de absorción de la raíz y la demanda evapotranspirativa de la atmosfera en horas criticas del día.

VI.1.6 Mediciones dendrométricas

Para esta localidad agroclimática, el tratamiento Testigo se omite para el análisis de los parámetros dendrométricos a causa de inconsistencias en los datos obtenidos, esto causado por algún daño interno del sensor o problema de obstrucción a causa del sistema de guiado de la aguja.

VI.1.6.1 Evolución del diámetro de tallo

La evolución del diámetro de tallo en el periodo de evaluación para la localidad rancho San Juan de la Vaquería se presenta en la Figura 3 en el que se observó que los tratamientos siguen una misma tendencia de comportamiento al igual que la localidad Rancho Tres Marías pero en menor

magnitud, a partir del día juliano 231 para las etapas fenológicas de desarrollo de fruto y a mediados del estado acuoso comprendiendo finales de Mayo, mes de Junio y Julio mostraron un comportamiento ascendente a través del tiempo, para después tomar un comportamiento de meseta (paralelo al eje X) en las etapas de endurecimiento de cáscara y maduración de fruto comprendiendo los meses de Agosto, Septiembre y principios de Octubre. La bibliografía refleja en numerosas ocasiones la influencia del estado hídrico en el crecimiento radial de diversos cultivos.

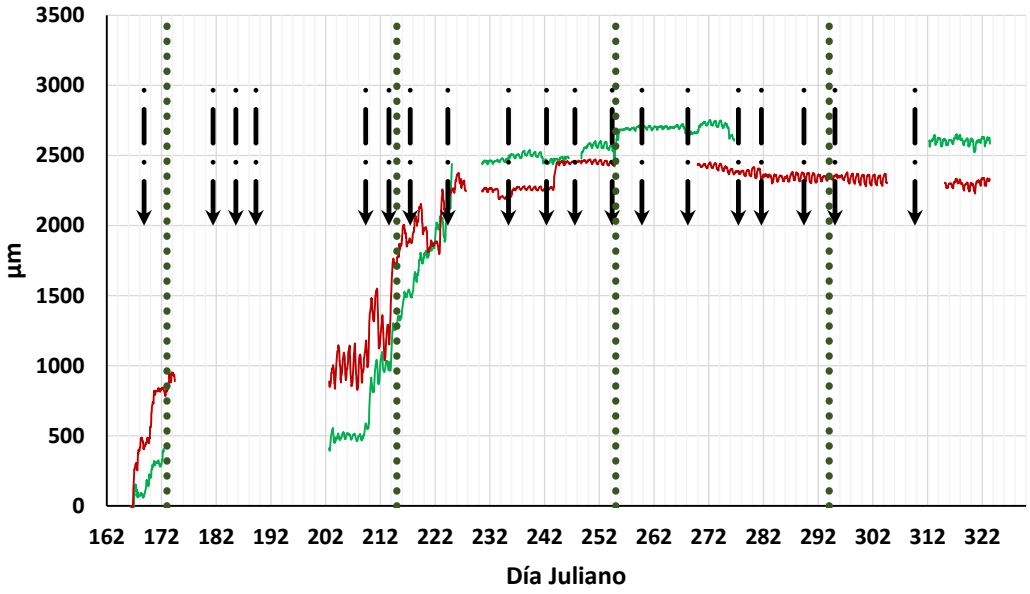

Figura 3. Evolución de las fluctuaciones del diámetro de tallo (µm) de los tratamientos Sobre-irrigado (—) y Sub-irrigado (—) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (—•—>) y etapas fenológicas (•••) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014.

VI.1.6.2 Máxima contracción diaria (MCD)

Los valores de MCD mostraron fluctuaciones durante todo el período experimental con diferentes magnitudes entre los tratamientos. Estas diferencias fueron evidentes por la diferencias en contenido de humedad del suelo que se presentaron (Figura 4), cuando se irrigaron las plantas, los valores de MCD cayeron y se mantuvieron de 2 hasta 3 días después del riego presentando valores muy parecidos. Los mayores valores de MCD registrados se presentaron entre los día 202 y 226 (mes de Julio y Agosto que fueron de alta demanda evapotranspirativa) presentando un máximo valor de 0.42 mm, después de este periodo los valores de MCD presentaron una disminución y una tendencia más estable con valores máximos de 0.11 mm y mínimos de 0.02 mm,

estos valores máximos de MCD son superiores a los encontrados por Baylon (2012) que reporto valores máximos de 0.22 mm para el día juliano 230 (mediados del mes de Agosto) en nogal pecanero; pero concordando con la disminución progresiva de los valores de máxima contracción diaria encontrando un descenso de hasta un 95 % del día juliano 230 al 358 (periodo de duración del experimento) hasta llegar a valores de 0.01 mm para el día juliano 358. El comportamiento de la MCD demuestra la sensibilidad de este parámetro a la disponibilidad de agua en el suelo y a un déficit hídrico (García-Orellana *et al*., 2007; Moriana y Fereres, 2002; Naor *et al*., 2006; Ortuño *et al*., 2006a; Ortuño *et al*., 2006b). La respuesta entre especies es variable, pero los valores MCD comúnmente aumentan cuando se presenta un déficit hídrico (Huguet *et al*. 1992).

Estudios realizados por Daudet *et al*., (2005) y Sevanto *et al*., (2003), sugieren que para la interpretación de las variaciones de diámetro del tallo se debe tener en cuenta la condición hídrica de la planta; pero también se deben considerar la presencia o ausencia de la carga frutal que tiene un efecto importante en el equilibrio de carbono y agua (Grossman y DeJong, 1994).

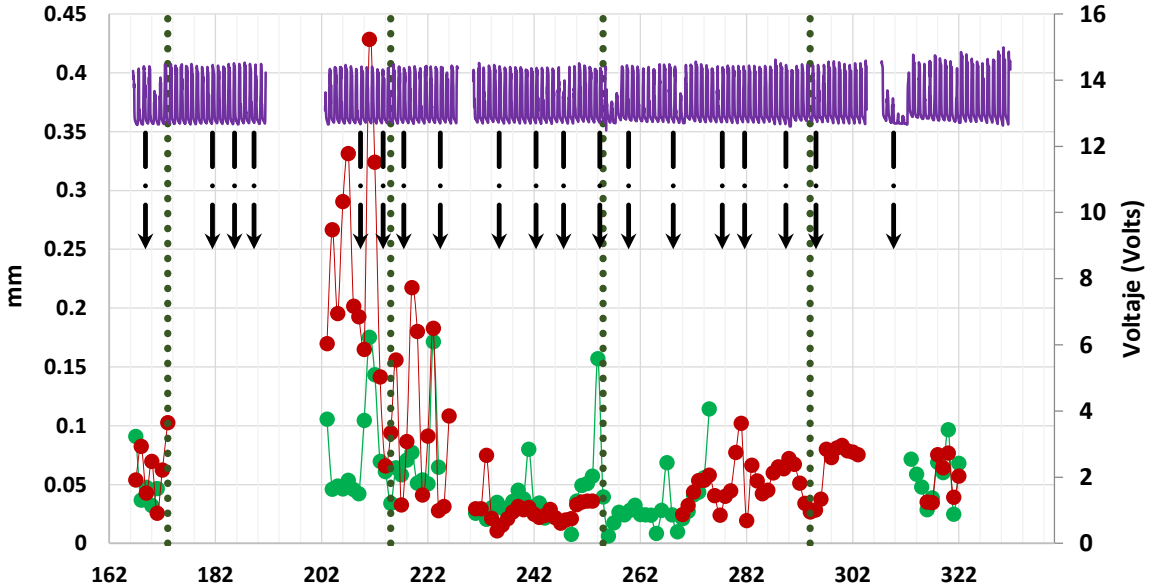

Figura 4. Comportamiento de la máxima contracción diaria (mm) de los tratamientos Sobre-irrigado (—) y Sub-irrigado (—) de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila con ilustración de aplicaciones de riego (—•—>) y etapas fenológicas (•••) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014 e ilustrasion de voltaje de batería (—).

Los sensores presentan un requerimiento mínimo de 10.5 volts para su óptimo funcionamiento, el voltaje es mostrado para ilustrar sus valores durante el periodo de evaluación y constancia de su funcionamiento (Figura 4).

VI.1.6.3 Tasa de crecimiento de máximos y mínimos

Ambos tratamientos presentaron un crecimiento parecido pero con un comportamiento diferente dividido en dos periodos: uno de mayor crecimiento comprendiendo los días julianos 168 a 225 y otro de menor crecimiento comprendiendo los días julianos 226 al 322 (Figura 5). El comportamiento de crecimiento es ascendente en la etapa de desarrollo de fruto y estado acuoso para la MXTD y MNTD. Intrigliolo y Castel (2007b), Myburg (1996) y Sellés *et al*. (2004) sugieren que el crecimiento es mayor en las primeras etapas del cultivo, siendo un proceso de mayor sensibilidad a la falta de agua. Las diferencias fueron acumulativas al paso del tiempo, tanto para MXTD y MNTD.

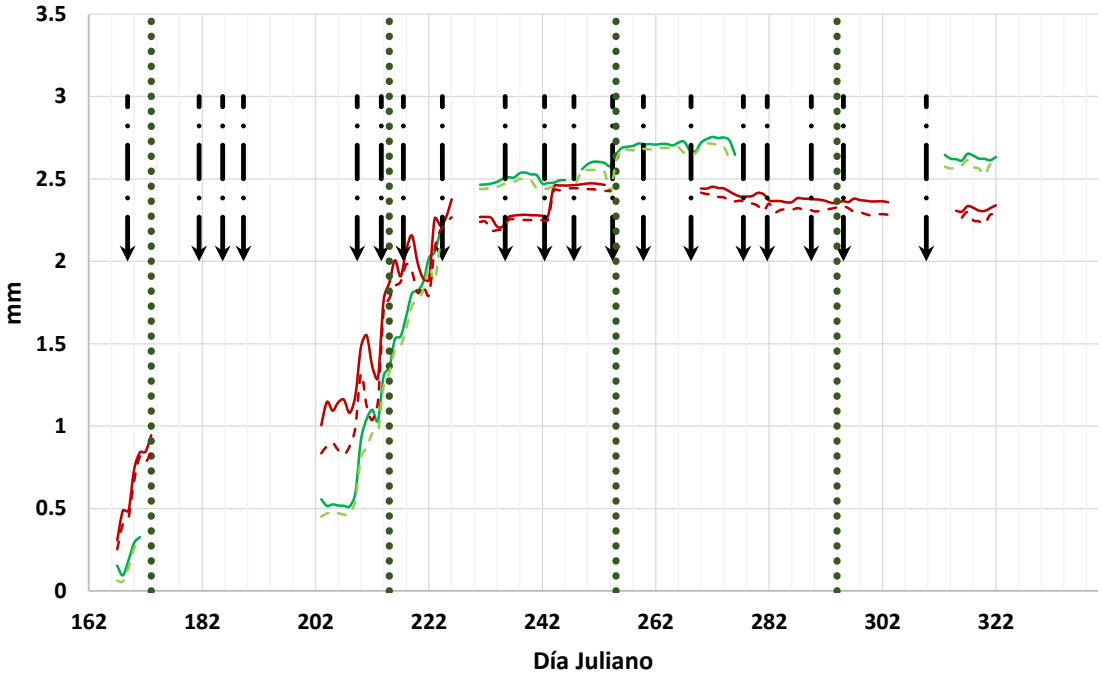

Figura 5. Evolución de la tasa de crecimiento acumulado de los máximos (líneas continuas) y mínimos (líneas discontinuas) de los tratamientos Sobre-irrigado (— y - - -) y Sub-irrigado (— y - - -) estudiados de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (—•→) y etapas fenológicas (•••) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014.

Durante el tiempo de evalución se obtuvo un crecimiento de diámetro de tronco de 2.61 y 2.31 mm (Figura 5) para los tratamientos Sobre-irrigado y Sub-irrigado respectivamente a diferencia de la localidad Rancho Tres Marías que obtuvo un crecimiento de 8.69 mm (Figura 12) no concordando con lo dicho por Chalmers y Van den Enden (1974) que mencionan que para árboles adultos se esperan tasas de crecimiento menores que en arboles jóvenes, esto por la carga de fruto que origina

una disminución en la asignación de materia seca a los tejidos leñosos pero puede ser explicado por el manejo agronómico del cultivo además de estar en condiciones climáticas diferentes. En la Figura 5 se pudo observar que para las etapas de endurecimiento de cáscara y maduración de fruto se redujo el crecimiento radial esto puede deberse a que el crecimiento de la fruta es predominante y también hay una redistribución del agua absorbida por la planta para suministrar el crecimiento reproductivo (Silva-Contreras *et al*., 2008).

En general la MCD es el parametro más empleado como indicador del estado hídrico de la planta en los trabajos en los que se usa las FDT (Ortuño *et al.*, 2010). Sus variaciones por efecto del estrés hídrico son grandes y prematuros (Goldhamer *et al*., 1999). Sin embargo, hay especies, como el olivo (Moriana y Fereres, 2002) o el mandarino (Ginestar y Castel, 1996), en las que no siempre se podría considerar el más adecuado. De ahí la importancia del estudio de cada uno de los parámetros obtenidos mediante el uso de la dendrometría.

VI.1.7 Líneas de referencia

Distintos grupos de investigación han elaborado líneas de referencia, en las que se relaciona la MCD de árboles bien regados con variables climáticas con fines de programación del riego y algunos de ellos las han puesto en evaluación (Ortuño *et al*., 2006b).

Durante el periodo de evaluación las condiciones climáticas fueron características de la región, en los que se alcanzaron temperaturas máximas de 27.67 ºC. Las mayores precipitaciones tuvieron lugar en los meses de Junio y Septiembre, teniendo un total de 413.4 mm a lo largo del periodo, mientras que ET_O supuso un valor de 708.7 mm, las variables climáticas estudiadas presentaron una tendencia similar, con valores máximos en Junio-Agosto y mínimos en Noviembre.

Se ha visto que la MCD también depende de la demanda climática. Por ello, es necesario normalizar sus valores para poder utilizarlos en la programación del riego y detectar estrés hídrico en planta (Fereres y Goldhamer, 2003; Ortuño *et al*., 2009). Los valores de MCD de árboles bajo condiciones no limitadas de agua en el suelo, reflejan los efectos de la demanda climática en la magnitud de la contracción del tronco; de modo que si se relacionan los valores de MCD, así obtenidos, con distintas variables meteorológicas (DPV, ETo, temperatura, etc.) se obtienen las denominadas líneas de referencia. Se han obtenido líneas de referencia entre la MCD y distintas variables climáticas para el tratamiento Sobre-irrigado para cada etapa fenológica comprendida en el periodo

de evaluación (Cuadro 7), cada una de ellas con diferentes coeficientes de determinación. Tanto unas como otras pueden ser consideradas útiles para la programación del riego, pero es necesario compararlas con las de años sucesivos para comprobar su estabilidad en el tiempo.

Cuadro 7. Líneas de referencia para MCD para el tratamiento Sobre-irrigado con variables meteorológicas más representativas para el cultivo de nogal pecanero para las etapas fenológicas comprendidas el periodo de evaluación de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila.

Etapa Fenológica	Variable Climática	a	b	r^2
	Sobre-irrigado			
Estado acuoso	T_{max}	-0.509	0.021	0.574**
	T_{med}	-0.356	0.021	0.437*
	HR	0.280	-0.003	0.435*
	DPV	-0.026	0.109	0.475*
Endurecimiento de cascara	T_{max}	-0.078	0.004	0.039ns
	T_{med}	-0.136	0.009	0.054ns
	ET_O	0.003	0.010	0.060ns
Maduración de fruto	**HR**	0.176	-0.001	0.638**
	DPV	0.008	0.063	0.392**
	R. G.	0.001	9E-05	0.204*

Coeficiente de determinación seguidas con un ns, * y ** representan no significancia, significancia y alta significancia.

Es evidente que mientas exista un mayor déficit hídrico, menor será el grado de asociación entre la MCD y las variables climáticas, esto porque no solo serán las condiciones climáticas las causantes del efecto de las FDT, si no también efecto de la disponibilidad de agua, que genera un desequilibrio de mayores magnitudes entre capacidad de absorción por parte de la raíz con respecto de la demanda climática. Para este estudio las variables climáticas mejor predictoras de la MCD fueron T_{med}, T_{max}, DPV y HR.

Para la etapa fenológica de estado acuoso (Cuadro 7 y Figura 6a) se obtuvieron valores de r^2 de 0.47^{*}, 0.57^{**}, con las variables climáticas T_{max}, y DVP, este bajo grado de asociación entre las variables climáticas, puede deberse a que es la etapa donde se lleva a cabo la acumulación de líquido en el fruto que más adelante pasara a formar la almendra, siendo la carga frutal un factor agregado en la magnitud del parámetro de MCD (Intrigliolo y Castel, 2007b).

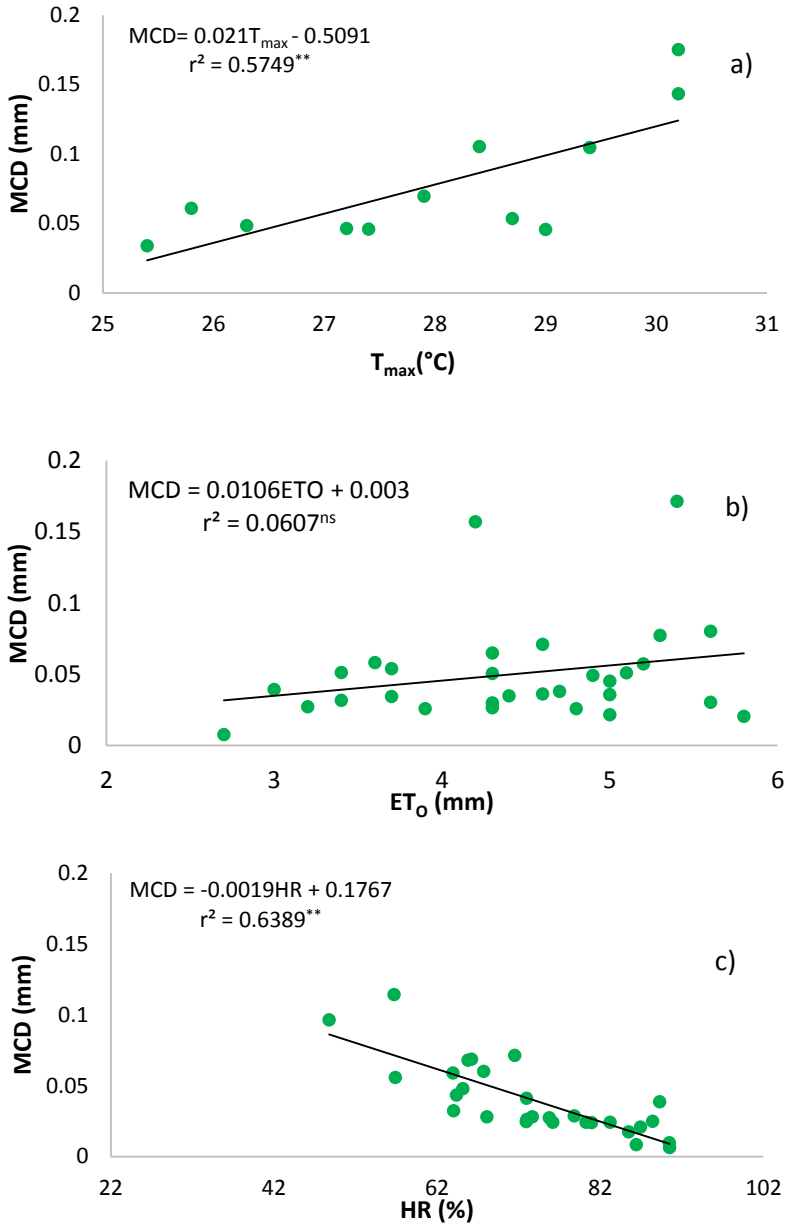

Figura 6. Líneas de referencia en base a MCD para el tratamiento Sobre-irrigado con valores diarios de MCD y variables meteorológicas más representativas obtenidas para el cultivo de nogal pecanero por etapa fenológica a) Estado acuoso, b) Endurecimiento de cáscara y c) Maduración de fruto, de la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coahuila del año 2014.

En la etapa fenológica de endurecimiento de cáscara (Cuadro 7 y Figura 6b) se presentó una ausencia de correlación con las variables climáticas, con valor de $r^2=0.06^{ns}$ con respecto a la ET_O. Casos similares se han presentado en diferentes estudios como por ejemplo: en mandarino en la fase de crecimiento III (Pagán, 2012) y en vid en la etapa de pinta (Intrigliolo y Castel, 2007). Esto puede deberse a cambios en el módulo de elasticidad o en la conductividad hidráulica de los tejidos

de la corteza conforme avanza la estación (Cuevas *et al*., 2010; Gènard *et al.*, 2001; Léchaudel *et al*., 2007).

Para la etapa de maduración de fruto (Cuadro 7 y Figura 6c) las variables climáticas más representativas fueron HR y DVP con una r^2=0.63** y 0.39**respectivamente con alta significancia. Se pudieron obtener varias líneas de referencia con diferente grado de asociación y con diferentes variables, pero las líneas de referencias más validas son aquellas en las que existe un mayor control de la humedad del suelo, es decir, que esto permitirá que las fluctuaciones de diámetro de tallo sean el efecto de la demanda evapotranspirativa (Conejero *et al.*, 2011; Fernández y Cuevas, 2010; Moriana *et al.*, 2011; Ortuño *et al*., 2009). Trabajos similares a éste se han realizado en diferentes especies con lo cual el número de líneas base publicadas es relativamente elevado incluso con varias sugerencias para la misma especie (Ortuño *et al.*, 2010), sin embargo, no está claro que estas ecuaciones puedan emplearse fuera de los lugares en las que han sido obtenidas.

VI.1.9 Rendimiento y parámetros de calidad

El rendimiento para cada uno de los tratamientos fue de 1.10 ton·ha^{-1} promedio, con un porcentaje bajo de llenado de almendra, teniendo un mínimo de 50 % y un máximo de 57.69 % y un número promedio de 195 nueces·Kg^{-1}, valor superior a 123 nueces·Kg^{-1} e inferior al porcentaje de llenado de hasta un 65.45 % obtenidos en la localidad rancho Tres Marías (Cuadro 8).

Cuadro 8. Rendimiento total, porciento de llenado y número de nueces por kilogramo obtenidas en la localidad rancho San Juan de la Vaquería, Saltillo Coahuila del año 2014.

Tratamiento	Rendimiento (ton·ha^{-1})	Porciento de llenado (%)	No. nueces·Kg^{-1}
Testigo	0.93b	50.01c	179c
Sobre-irrigado	1.50a	57.69a	201b
Sub-irrigado	0.88c	57.31b	205a

Medias seguidas con la misma letra son estadísticamente iguales LSD ($P \leq 0.05$)

En nogales adultos la producción está determinada por un número de variables considerables en los que destacan la región (cuestiones climáticas principalmente como horas frío), fertilización, el tipo y características del suelo así como el control de plagas y enfermedades.

Según Sparks (1992) en cuanto a calidad se refiere el parámetro de porcentaje de almendra está en primer lugar y su color en segundo término, pero además hay que agregar contenido nutricional y de aceites. Algunos valores de referencia en cuanto al porciento de llenado son de 54 a 60 % en variedad Western y 57 a 63 % en variedad Wichita en cuanto a peso de 6.9 y 8.1 g respectivamente

(Brison, 1976; Herrera, 1982; Madden *et al*., 1975). En base a esto el porcentaje de llenado es bajo para esta localidad.

VI.2 Localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila

VI.2.1 Variables climáticas

El clima varía en escalas de tiempo y espacio a través de los años, se han presentado fluctuaciones del clima en diversas escalas de tiempo. La causa de tales fluctuaciones es todavía un tema controvertido. La variabilidad climática de corto periodo se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente pequeños. Durante un año en particular, se registran valores por encima o por debajo de lo normal; pero presentando una tendencia de comportamiento muy característico anualmente (Montealegre y Pabón, 1999).

En el Cuadro 9 se presentan los promedios mensuales y acumulados (Precipitación y ET_O) de las variables climáticas más representativas de la localidad estudiada. Se observo que los meses de mayor demanda evapotranspirativa son los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto con 175, 158, 182 y 177 mm de ET_O respectivamente para después ir descendiendo con el paso del tiempo y llegar a sus mínimos valores en los meses de Octubre y Noviembre. En contra parte las mayores precipitaciones se presentaron en los meses de Mayo, Septiembre y Noviembre, es importante rescatar y señalar la existencia de un déficit de 536.6 mm con respecto a la demanda evapotranspirativa de referencia, debido a que la ET_O total durante el periodo de estudio fue de 982 mm, valor muy superior al de 445.4 mm aportados por la precipitación, sin olvidar el termino de precipitación efectiva definida como parte de la precipitación total que satisface los requerimientos de evapotranspiración, sin considerar las pérdidas producidas por escorrentía ni las pérdidas de agua debidas al drenaje en profundidad.

Cuadro 9. Promedios mensuales de temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), temperatura media (T_{med}), humedad relativa (HR), déficit de presión de vapor (DPV), radiación global (RG), evapotranspiración de referencia (ET_O) acumulada y precipitacion acumulada correspondientes al periodo del mes de Mayo al mes de Noviembre del año 2014, obtenidas de la estación meteorológica automatizada Campo Experimental Zaragoza, Zaragoza, Coahuila.

Mes	Precipitación (mm)	T_{max} °C	T_{min} °C	T_{med} °C	HR (%)	DPV (kPa)	Rad. G (W m^{-2})	ET_O (mm)
Mayo	123.60	31.52	16.70	24.36	55.99	1.34	493.66	175.60
Junio	34.40	33.82	22.66	28.14	63.25	1.40	461.31	158.90
Julio	22.60	35.42	22.00	28.90	57.29	1.70	509.43	182.10
Agosto	59.60	36.21	22.63	29.27	56.98	1.75	509.57	177.50
Septiembre	92.20	31.16	20.61	25.42	73.10	0.87	410.96	117.00
Octubre	38.60	28.83	15.09	21.75	70.24	0.78	426.66	109.70
Noviembre	74.40	18.97	5.54	11.98	73.22	0.38	320.00	61.20

VI.2.2 Contenido volumétrico de agua en suelo (Θ_v)

Las condiciones de humedad del suelo en base a volumen así como su evolución a través del tiempo de evaluación se presentan en la Figura 7, en ella se observó que las frecuencias de riego fueron de 7 a 10 días esto dependiendo de las condiciones ambientales predominantes, teniendo el registro de 15 riegos entre el periodo comprendido del día 144 al 309 (día juliano). Las diferencias en los contenidos de humedad entre los tres tratamientos se mantuvieron hasta el final del experimento, en algunos puntos (tratamiento Sobre-irrigado) se llegó a contenidos de saturación. En el intervalo de los días julianos 142 a 152 se observó que el contenido de humedad del tratamiento Sub-irrigado se encuentra ligeramente arriba del tratamiento Testigo, esto por el manejo antes del inicio del experimento llegándose a diferenciarse después de un periodo de 20 días aproximadamente.

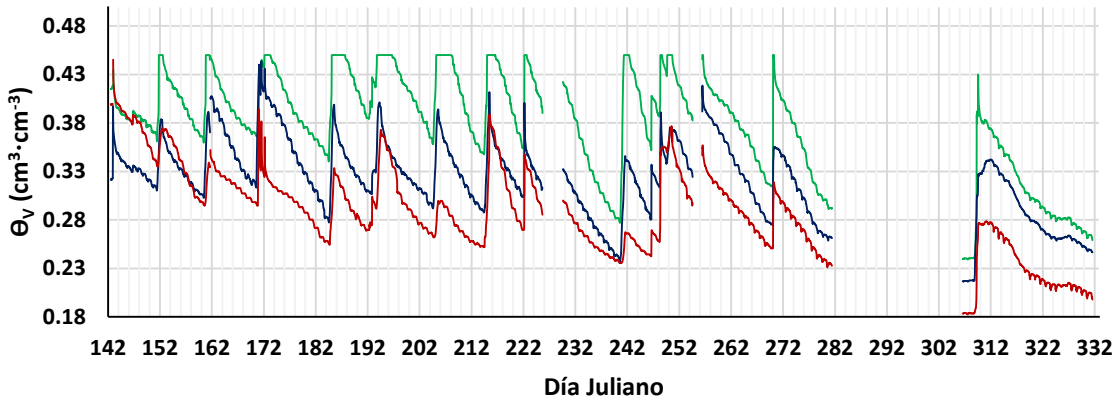

Figura 7. Evolución del contenido de humedad en base a volumen (cm^3 cm^{-3}) para el estrato 0-60 cm para los tratamientos Testigo (—), Sobre-irrigado (—) y Sub-irrigado (—) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila, durante el periodo de evaluación comprendido entre los días 142 a 331 (días julianos) del año 2014.

A pesar de los tratamientos de riego se puede ver similitudes en el Θ_v en los días julianos 172, 192, 217, 222, 252 entre los tratamientos Testigo y Sub-irrigado y en algunos puntos al Sobre-irrigado, esto por aportaciones hídricas a causa de las precipitaciones que estuvieron alrededor de los 16.6 hasta 65.5 mm. Se presentaron contenidos de humedad en base a volumen en suelo mínimas de 19, 20 y 24 % para Sub-irrigado, Testigo y Sobre-irrigado respectivamente.

Entre los periodos de riego se observan pequeñas variaciones o recuperaciones del contenido de humedad del suelo durante la noche, esto se debe al fenómeno de ascenso capilar.

VI.2.3 Lámina consumida y contenido de humedad de suelo en base a volumen promedio en cada etapa fenológica

Para el caso del total de lámina consumida por el cultivo de nogal durante el tiempo de evaluación se pudo observar un 38.46 % más de lámina consumida por parte del tratamiento Sobre-irrigado y un 21.50 % menos por parte del tratamiento Sub-irrigado en comparación al Testigo. Como se muestra en el Cuadro 10 la etapa fenológica con mayor lámina consumida se presentó en el endurecimiento de cáscara que corresponde al periodo del 3 de Agosto al 12 de Septiembre, teniendo el segundo mes de mayor demanda evapotranspirativa con una ET_O de 177 mm. Esta lámina consumida es muy parecida a la presentada en la etapa fenológica de estado acuoso.

Cuadro 10. Lámina consumida en las etapas fenológicas del nogal pecanero comprendidas entre el periodo 142 a 331 (días julianos) del año 2014 en la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila.

Etapa fenológica	Periodo (Día Juliano)	Lamina consumida (mm)		
		Testigo	Sobre-irrigado	Sub-irrigado
Desarrollo del fruto	142-173	179.28	246	141.66
Estado acuoso	173-215	317.7	379.1	175.17
Endurecimiento de cáscara	215-255	327.42	453.4	308.52
Maduración de fruto	255-294	126.72	246.4	130.14
Después de cosecha	280-331	78.3	100.4	52.56
	Total (mm)	1029.42	1425.42	808.05

Para la etapa de maduración de fruto (evaluación de toda la etapa fenológica a diferencia de desarrollo de fruto y después de cosecha) se observó una disminución en la lámina consumida en comparación a las 2 etapas anteriores, esto por la disminución de la demanda evapotranspirativa y presencia del proceso del secado de ruezno.

VI.2.4 Conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosinteticamente activa (PAR), temperatura de aire (T_a), temperatura de hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA)

El proceso de la fotosíntesis es de gran relevancia para el desarrollo de cualquier planta, sin embargo su eficiencia y magnitud se ve limitada por las condiciones de su entorno (estrés edáfico, climático e hídrico) en conjunto con las respuestas fisiológicas para reducir los efectos de estos tipos de estrés, provocando una reducción en su magnitud y eficiencia. El nogal es considerado un árbol de baja eficiencia fotosintética, es decir requiere valores considerables de radiación PAR, para lograr una adecuada actividad fotosintética (Andersen, 1994).

En el Cuadro 11 se concentra la información obtenida de 4 muestreos que comprenden las etapas de desarrollo de fruto (día juliano 161 y 162) y estado acuoso (día juliano 183 y 203). Las condiciones de humedad del suelo para los periodos de muestreo (Θv) se mantuvieron en un rango de 34.2 % para Testigo, 44.1 % para Sobre-irrigado y 29.7 % para Sub-irrigado no encontrándose diferencia significativa justificando los resultados, es decir que las condiciones de humedad del suelo eran buenas para los tres tratamientos, por lo que se puede hacer un uso menor de la lámina de riego

Se puede observar que la evolución de la conductancia estomática (g_s) a través del tiempo es descendente para los tres tratamientos, esto es porque en diferentes especies leñosas se ha demostrado que la g_s y A, se modifican conforme madura y envejece el follaje (Heinsoo y Koppel, 1998), como también la modifican las condiciones climáticas y estrés hídrico (Williams *et al*., 1994), este último indica que independiente de otros factores ambientales como el DPV o la temperatura, la apertura máxima o mínima de los estomas está también controlada por el estado hídrico de la planta (Ferreyra, 2002), esto se puede ver en el comportamiento del potencial hídrico en el Cuadro 12 para los días de muestreo, existiendo una relación en disminución de g_s con una aumento en el Ψ_{Xilema}, no encontrándose en el rango de estrés ya que estudios realizados por Godoy-Ávila *et al.* (2005) mencionan valores de -1.1 hasta -2.4 MPa en su tratamiento de mejores condiciones hídricas. En contra parte Ferreyra *et al.* (2001) encontraron un potencial máximo sin estrés hídrico de -0.8 MPa y con estrés hídrico del 50 % valores de -1.2 MPa en arboles de nogal variedad Serr de 3 años de edad.

Para los muestreos realizados en los días julianos 161 y 162 el comportamiento de la g_s se explica debido a que fueron medidos al término y un día después de riego en comparación de los muestreos en los días 183 y 203 tomados 2 y 3 días antes del riego; pero con aportes de 14.40 y 4 mm de lámina por precipitación respectivamente. La conductancia estomática promedio para los tratamientos fue de 0.30 $molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para Testigo, 0.29 $molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para Sobre-irrigado y Sub-irrigado, estos valores concuerdan con Ibarra (2013) que obtuvo un promedio de 0.30 a 0.35 $molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ en el periodo de 12:00 pm a 2:00 pm.

Cuadro 11. Conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura de aire (T_a), temperatura de hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014.

Día				**161**			
Tratamiento	**g_s ($molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$)**	**A ($\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)**	**PAR ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)**	**T_a (°C)**	**T_h (°C)**	**T ($mmolH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)**	**EIUA (mmol CO_2/mol H_2O)**
Testigo	0.33b	40.42a	1651.50a	41.33a	38.86a	15.28a	2.64a
Sobre-irrigado	0.36ab	38.66a	1531.80a	40.47b	37.80b	15.00a	2.58a
Sub-irrigado	0.40a	38.75a	1236.90a	40.23b	36.89c	14.55a	2.66a
Día				**162**			
Testigo	0.30a	49.27a	1680.62a	37.10b	35.99a	10.41a	4.73a
Sobre-irrigado	0.26a	44.98a	1763.97a	37.26ab	36.81a	9.77a	4.60a
Sub-irrigado	0.30a	48.27a	1649.79a	37.63a	37.19a	10.94a	4.41a
Día				**183**			
Testigo	0.29a	49.18a	1695.56a	36.36c	35.76b	9.69a	5.07a
Sobre-irrigado	0.26a	47.00a	1573.28a	37.43b	37.05a	9.67a	4.86a
Sub-irrigado	0.23a	47.29a	1596.13a	38.55a	38.10a	9.86a	4.79a
Día				**203**			
Testigo	0.29a	29.68a	698.92a	37.13c	34.89b	8.5a	3.49a
Sobre-irrigado	0.31a	29.06a	384.26b	37.72b	34.60b	8.69a	3.29a
Sub-irrigado	0.24b	29.49a	680.26a	38.34a	36.19a	8.44a	3.49a

Medias seguidas con la misma letra son estadísticamente iguales LSD (*$P \leq 0.05$)*

Para el caso de fotosíntesis no existieron diferencias significativas, su comportamiento se explica por la relación que guarda con g_s sin olvidar la radiación PAR incidente en el momento del muestreo. Los valores promedios fueron de 42.8 $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para Testigo, 40.6 $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para Sobre-irrigado y 40.25 $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para Sub-irrigado, equivalente a 1.88, 1.78 y

1.77 mg de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ respectivamente, estos valores difieren a los obtenidos por Andersen (1994) que encuentran valores de 16 mg de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ en hojas apicales de la copa expuestas a 1700 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ de radiacion PAR y por Areola *et al*. (2007) de 9 mg de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$en hojas ubicadas en el segundo tercio de la copa de árbol. Pero superior a valores de 12 $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ encontrados por Rocha *et al*. (2009) en plántulas de nogal pecanero, asi como los encontrados por Zermeño *et al*. (2014) con valores de 17.95 $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ entre las 11 y 16 horas.

La diferencia entre T_h y T_a es una característica importante para evaluar el comportamiento estomático y pérdida del calor latente a través de la transpiración de las hojas. Por otro lado, se han relacionado aumentos en la temperatura foliar con la disminución de la turgencia y del potencial hídrico de la hoja, además de reconocerse como un indicador de la disponibilidad de agua para la planta (Oliveira, 1996). Se encontraron diferencias significativas en T_h y T_a que van de 0.38 °C hasta 3.34 °C, este diferencial de temperatura se debe al proceso de transpiración, es decir, entre más transpiración exista más será la diferencia entre los valores de T_h y T_a; pero esta se ve regulada a su vez por la conductancia estomática que está relacionada con la disponibilidad de agua en el suelo y condiciones climáticas.

En cuanto a la transpiración su comportamiento a través del tiempo es descendente (relacionándose al comportamiento de la g_s), no presentando diferencias significativas entre tratamientos, llegando a valores de hasta 15.28 $mmolH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ y mínimos de 8.44 $mmolH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Los valores de DPV para los días de muestreo fueron de 2.17, 2.5, 1.7 y 1.5 kPa respectivamente, sin olvidar que el potencial hídrico presento valores menos negativos en los muestreos en los días julianos 161 y 162, y más negativos en los días 183 y 203 correspondientes a días del verano.

En el caso de la EIUA presenta valores de 2.58 a 5.07 $mmolCO_2$ / $molH_2O$, es decir, por cada mol H_2O transpirado se fija 2.58 a 5.07 $mmolCO_2$, valores más altos a los encontrados por Zermeño *et al*. (2014) que reporta como valor promedio máximo diario entre el mes de Mayo y Junio de 3.44 $mmolCO_2$ / $molH_2O$ mediante el uso de una estación Eddy-Covariance (método de análisis de flujos de CO_2 y H_2O de canal abierto de alta velocidad en tiempo real a nivel población a diferencia del IRGA 6400XT que es un analizador de gases no dispersivos de canal abierto y absoluto a nivel de hoja) y coincidiendo con estudios realizados que concluyen que la EIUA de superficies vegetales aumenta cuando el DVP disminuye, debido a que se reduce la tasa de evapotranspiración.

VI.2.4.1 Evolución diaria de fotosíntesis

La fotosíntesis, en días claros y en hojas bien expuestas a la radiación, aumenta desde las primeras horas de la mañana hasta alcanzar un máximo generalmente a medio día para después descender durante el resto del día por la disminución de la radiación incidente.

Las hojas de nogal requieren de alta intensidad de radiación para alcanzar su máxima capacidad fotosintética (Andersen, 1994; Wood, 1996). Esta intensidad de radiación PAR es de 1700 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, presentándose generalmente en las hojas de la periferia de la copa (Wood, 1996).

En el periodo de evaluación se llevó a cabo una medición de evolución diaria de la tasa fotosintética, realizada en el día juliano 203 en la etapa fenológica de estado acuoso, esta información se muestra en la Figura 8, en ella se pudo observar que los tres tratamientos presentan un comportamiento y tendencia similares, los valores máximos de tasa fotosintética (A) se presentan entre las 12:00 pm y las 3:00 pm, con valores de hasta 32.5 $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ y mínimos de 19.18 $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ a partir de las 7:00 pm.

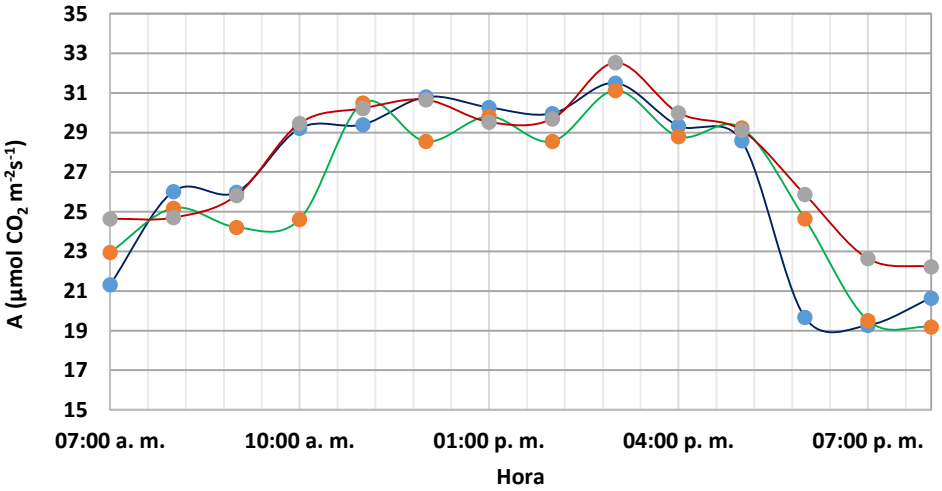

Figura 8. Evolución de la tasa fotosintética ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$), para los tratamientos Testigo (▬), Sobre-irrigado (▬) y Sub-irrigado (▬) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila para el día 203 (Día Juliano) del año 2014.

En esta medición de comportamiento de la tasa fotosintética no presentó una diferencia marcada entre los tratamientos ya que estos se encontraban en buenas condiciones hídricas del suelo, por lo que se puede reducir la aplicacion de lámina de riego.

VI.2.5 Potencial hídrico de tallo (Ψ_{Xilema})

La utilización de las medidas a base de plantas para el manejo del riego en frutales es cada vez más popular para el conocimiento de las respuestas de los árboles al déficit de agua y se aplica a la programación de riego, sobre todo en casos en los que imponen diferentes regímenes de riego llegando a déficit hídrico en ciertas etapas de crecimiento, teniendo la posibilidad de poder ser beneficioso (Mpelasoka *et al*., 2001). El procedimiento más común para evaluar el estado hídrico del árbol se basa en la medición del potencial hídrico foliar. Fereres y Goldhamer (1990), Klepper, (1968), Naor (2000) y Shackel *et al.* (1997) han propuesto medir al mediodía para obtener el Ψ_{Xilema} (medidas hechas en hojas cubiertas por una bolsa durante un período de tiempo de 2 horas antes del corte) como la medida estándar del estado hídrico en árboles frutales para la programación de riego.

El Ψ_{Xilema} es afectado tanto por las condiciones climáticas incidentes y las condiciones de humedad de suelo. Para este estudio los resultados de potencial hídrico se presentan en el Cuadro 12 se realizaron 7 muestreos que comprenden las etapas de desarrollo de fruto (día juliano 161 y 162), estado acuoso (día juliano 183 y 203), endurecimiento de cáscara (225 y 254) y un muestreo después de cosecha (día juliano 281). Su comportamiento a través del tiempo es variable presentando una disminución (valores más negativos) y un aumento de sus valores después de la cosecha.

Cuadro 12. Potencial hídrico de la planta (Ψ_{Xilema}) obtenido en la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014.

Tratamiento	Día Juliano						
	161	162	183	203	225	254	281
	Ψ_{Xilema} (MPa)						
Sobre-Irrigado	-0.96a	-0.53a	-0.61a	-0.96b	-1.09a	-0.95a	-0.40b
Sub-Irrigado	-0.94a	-0.53a	-0.66a	-1.05a	-0.962b	-1.25a	-0.61a
Testigo	-0.74b	-0.73a	-0.72a	-0.93b	-0.89b	-1.03a	-0.35b

Medias seguidas con la misma letra son estadísticamente iguales LSD ($P \leq 0.05$)

Se observó que para los días julianos 162, 183 y 254 no existen diferencias significativas entre tratamientos. En los días 161 y 162 los contenidos de humedad eran óptimos puesto que el riego fue aplicado antes del amanecer del día 161 pero como se puede observar en el Cuadro 12 el potencial es más negativo para los tratamientos Sobre-irrigado y Sub-irrigado en comparación al día juliano 162 inclusive altos para el día 183 medido dos días antes del riego, pero explicado por las condiciones ambientales imperantes que provocaron un aumento con respecto al muestreo del día 162, ya que se presentó una temperatura máxima de 39 °C y un DPV de 2.17 kPa a comparación del día 183 con condiciones de 34°C y un DPV de 1.77 kPa, ambos muestreos presentaron buenas condiciones de humedad.

Rescatando lo encontrado por Godoy-Ávila y Huitrón-Ramírez (1998) que obtuvieron que durante el llenado de la almendra el agua del suelo debe estar más disponible que en otras etapas fenológicas y concordando con Godoy y López (1997) que encontraron que en esta etapa se consume el 50 % del agua total anual, así como Godoy y López (2000) encontraron que una disminución en la frecuencia de riego genera una disminución en la tasa de acumulación de materia seca en la almendra de 0.164 $g \cdot día^{-1}$ a 0.067 $g \cdot día^{-1}$.

Para los días julianos 225 y 254 los muestreos se realizaron 5 y 2 días antes de riego con aportes de 39.6 y 11.6 mm por precipitación y condiciones de HR de 72.31 y 57.67 % respectivamente, el aumento de potencial hídrico se explica por un aumento en el DPV. Para el día 381 el potencial hídrico disminuye notablemente llegando hasta -0.35 MPa para el tratamiento Testigo en comparación de los muestreos anteriores, esto por la disminución de la demanda evapotranspirativa de la atmosfera, por un aporte de 20.2 mm por precipitación, además de que la medición se realizó después de la cosecha.

Los valores encontrados de Ψ_{Xilema} presentaron valores ligeramente mayores a los establecidos por Villalobos *et al.* (2002) que mencionan que en condiciones hídricas adecuadas los valores de potencial hídrico en especies frutales se encuentran en el rango de -0.8 y -1.0 MPa, esto puede ser debido a la posición de las hojas estudiadas, ya que las hojas con más exposición al sol presentan valores de Ψ_{xilema} más negativos que las hojas de la cara expuesta a la sombra, aun cuando se haya bloqueado su transpiración (Ferreyra *et al*., 2007)

Para el caso de Ψ_{Xilema} y MCD para el día 162 se presentaron valores de MCD de 0.46, 0.54, 0.35 mm para los tratamientos Sobre-irrigado, Testigo y Sub- irrigado respectivamente presentando un mayor potencial y mayor contracción el tratamiento Testigo, esto por las condiciones de humedad, ya que las mediciones se realizaron a un día después de riego, a diferencia del día 203 con mediciones tomadas 3 días antes del riego con valores de MCD de 0.18, 0.15 y 0.20 mm para los tratamientos Sobre-irrigado, Testigo y Sub- irrigado respectivamente presentando la mayor contracción el tratamiento Sub-irrigado, se pudo observar que los valores de MCD son más bajos en el día 203 a pesar de ser tomados 3 días antes del riego, esto debido a la demanda evapotranspirativa de la atmosfera, es decir, un valor de DPV para el día 162 de 2.51 kPa a diferencia del día 203 que presento un valor de 1.5 kPa.

VI.2.5.1 Evolución diaria de potencial hídrico de tallo (Ψ_{Xilema}) y evolución de las fluctuaciones del diámetro de tallo (FDT)

La evolución diaria del Ψ_{Xilema} y FDT, del día 203, mostro un comportamiento similar, con valores máximos alcanzados antes del amanecer, seguido por una disminución en sus valores, sin importar el tratamiento de riego, alcanzándose valores mínimos alrededor del mediodía solar para el caso de Ψ_{Xilema} y para las FDT el valor más crítico se presentó a las 5:00 pm para los tres tratamientos.

Se observó que el Ψ_{Xilema} en el tratamiento Sub-irrigado fue ligeramente más negativo a los valores de Testigo y Sobre irrigado. Es importante señalar que las diferencias entre los tratamientos fueron poco notorias por las condiciones de humedad del suelo. El Ψ_{Xilema} presento un comportamiento similar independientemente del tratamiento de riego (Figura 9), que es típico de la mayoría de las plantas cultivadas (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2007; Sánchez-Blanco *et al.*, 1990; Tenhunen *et al*., 1982; Torrecillas *et al.*, 1988). Se pudieron observar valores mínimos de ΨXilema de -1.45 MPa, -1.3 MPa y de -1.1 MPa para los tratamientos Sub-irrigado, Sobre-irrigado y Testigo respectivamente, además se observaron potenciales muy semejantes al amanecer (-0.15 y -0.1MPa) y una recuperación de este a partir de las 6:00 pm, llegando a -0.15 MPa a las 8:00 pm. Para el caso de la evolución de FDT el descenso en sus valores se presenta a partir de las 9:00 am cuando las condiciones climáticas empiezan a presentar un aumento en sus valores y por consiguiente el incremento de la demanda evapotranspirativa de la atmosfera, con valores máximos de contracción

de 0.19, 0.17 y 0.14 mm para los tratamientos Sub-irrigado, Testigo y Sobre-Irrigado respectivamente (Figura 9).

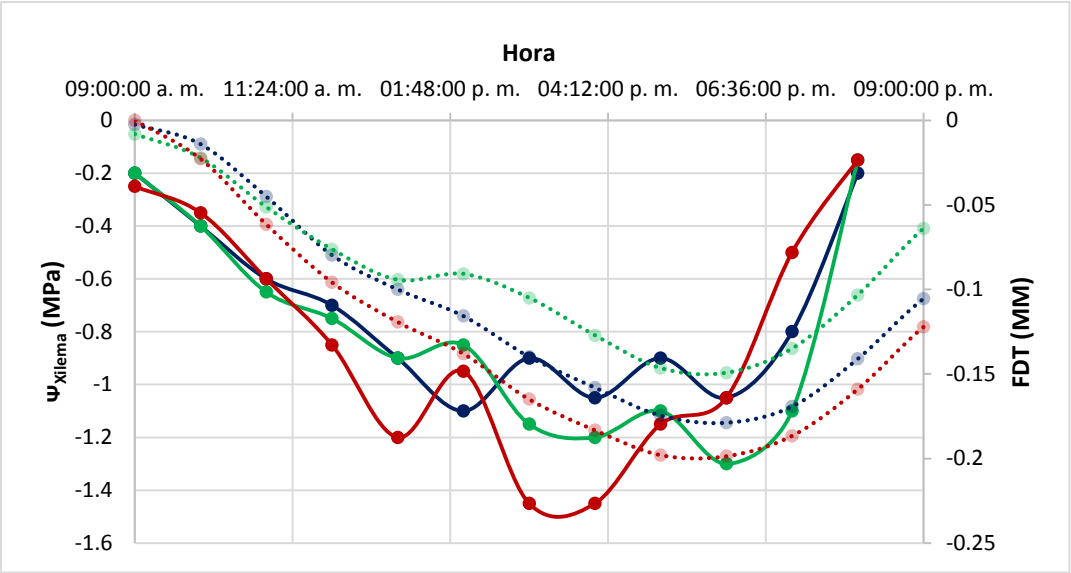

Figura 9. Evolución diurna del Ψ_{Xilema} (líneas continuas) y FDT (líneas discontinuas) de los tratamientos Testigo (— y •••), Sobre-irrigado (— y •••) y Sub-irrigado (— y •••) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila correspondiente al día 203 (día juliano) del año 2014.

VI.2.6 Mediciones dendrométricas

VI.2.6.1 Evolución del diámetro de tallo

La evolución del diámetro de tallo a través del periodo de evaluación se muestra en la Figura 10 en la que se pudo observar que los tratamientos siguen una tendencia de comportamiento, pero de magnitudes diferentes. Para las etapas fenológicas de desarrollo de fruto y estado acuoso comprendiendo a finales de Mayo, mes de Junio y Julio mostrando un comportamiento ascendente a través del tiempo, para después tomar un comportamiento de meseta (paralelo al eje X) en las etapas de endurecimiento de cáscara y maduración de fruto comprendiendo los meses de Agosto, Septiembre y principios de Octubre.

Para el caso de los tratamientos Testigo y Sub-irrigado mantuvieron una evolución muy semejante, e incluso igualándose en el periodo de endurecimiento de cáscara y maduración, esto porque las diferencias en contenido de humedad del suelo eran muy pequeñas entre ambos tratamientos en ese periodo

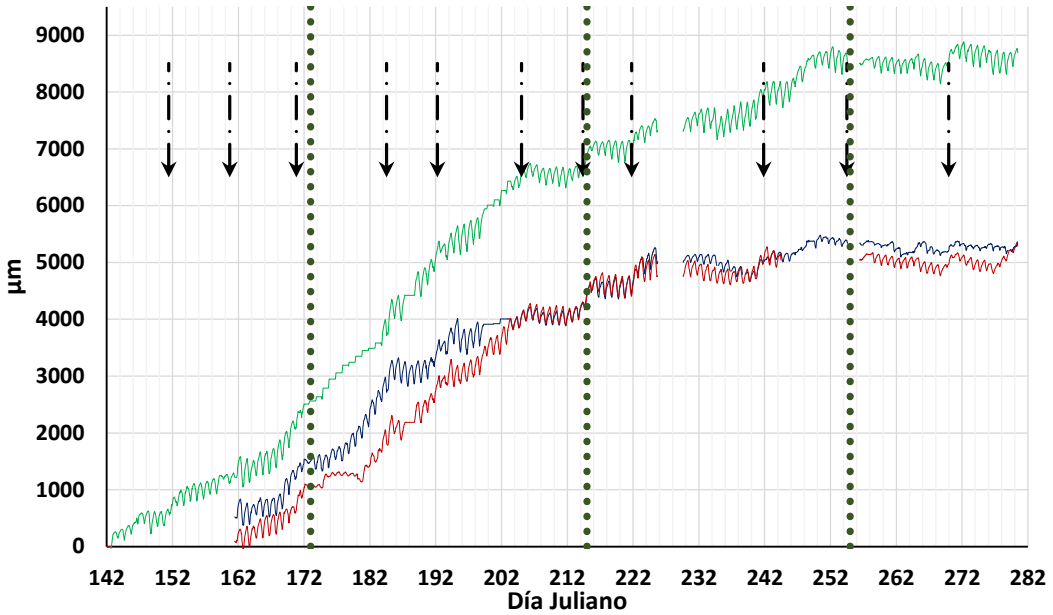

Figura 10. Evolución de las fluctuaciones del diámetro de tallo (µm) de los tratamientos Testigo (—), Sobre-irrigado (—) y Sub-irrigado (—) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (—•—>) y etapas fenológicas (•••) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014.

VI.2.6.2 Máxima contracción diaria (MCD)

Los valores de MCD mostraron fluctuaciones durante todo el período experimental con diferentes magnitudes entre los tres tratamientos de riego, así como entre los días de evaluación. Las diferencias entre los tratamientos fueron evidentes tan pronto se tuvo la imposición del régimen de riego (Figura 11). Cuando se irrigaron las plantas, los valores de MCD cayeron y se mantuvieron de 2 a 3 días después del riego presentando valores muy parecidos. Para el tratamiento Sub-irrigado se observó un aumento en los valores de MCD a partir del día juliano 142 a 242 presentando un máximo valor de 0.48 mm y menor de 0.14 mm. Después de esta etapa los valores de MCD presentaron una tendencia de disminución a través del tiempo pero no tan marcado como el caso del tratamiento Testigo. Este último presentó un máximo valor de 0.59 mm y un mínimo de 0.03 mm y con la misma tendencia de disminución en sus valores pasada la temporada de mayor demanda evapotranspirativa, para el caso del tratamiento Sobre-irrigado se registraron valores máximos de 0.51 mm y mínimo de 0.02 mm teniendo variaciones más pronunciadas y presentando

un comportamiento diferente a los demás tratamientos, es decir, en el caso de tratamiento Sub-irrigado y Testigo presentaron la tendencia de disminución de la MCD pasado el periodo de mayor demanda evapotranspirativa, cosa que no se observó en el tratamiento Sobre-irrigado.

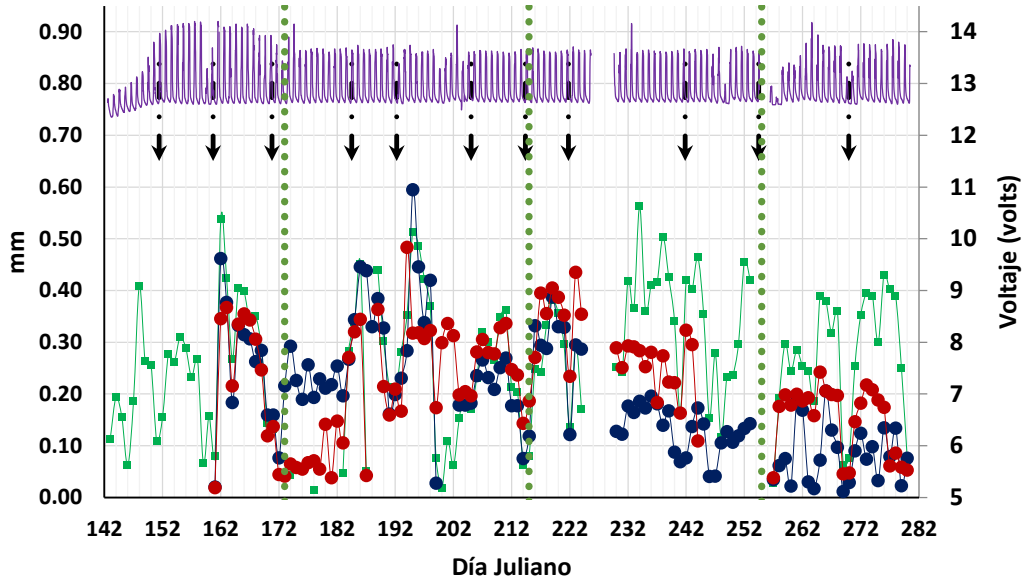

Figura 11. Comportamiento de la máxima contracción diaria (mm) de los tratamientos Testigo (—), Sobre-irrigado (—) y Sub-irrigado (—) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (—•—>) y etapas fenológicas (•••) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014 e ilustrasion de voltaje de batería (—).

El comportamiento de la MCD demuestra la sensibilidad de este parámetro a la disponibilidad de agua en el suelo y a un déficit hídrico (García-Orellana *et al*., 2007; Moriana y Fereres, 2002; Naor *et al.*, 2006; Ortuño *et al*., 2006a; Ortuño *et al*., 2006b).

La frecuencia y las cantidades altas de agua de riego suministrados fueron responsables de la cantidad elevada y constante de agua almacenada en el perfil del suelo. Estudios anteriores mostraron que a partir de los 90 a 150 cm existe una mínima fluctuación en contenido de humedad del suelo presentando además un mayor contenido de humedad que el estrato 0-90 cm, es decir, los árboles estaban en condiciones de agua en el suelo no limitantes, aunque con diferencias en cantidad disponible, un aspecto de importancia primordial cuando se considera el principal objetivo de nuestro trabajo, pero que afecto a los tratamientos Sobre-irrigado y Sub-irrigado.

VI.2.6.3 Tasa de crecimiento de máximos y mínimos

El diámetro de tallo para el tratamiento Sub-irrigado y Testigo presentó un crecimiento menor con respecto al tratamiento Sobre-irrigado, es decir, una disminución aproximada del 40 %. Datos similares se encontraron en las variables fenológicas evaluadas. El comportamiento del crecimiento es ascendente en la etapa de desarrollo de fruto y estado acuoso para la MXTD y MNTD para los tratamientos. Intrigliolo y Castel (2007b), Myburg (1996) y Sellés *et al*. (2004) mostraron que el crecimiento es mayor en las primeras etapas del cultivo siendo un proceso más sensible al estrés hídrico. La diferencia entre los tratamientos fue acumulativo al paso del tiempo, tanto para MXTD como para MNTD. La tendencia de crecimiento mostro una diferencia notablemente entre tratamiento Testigo y Sobre-irrigado, a diferencia del tratamiento Sub-irrigado comparado con el tratamiento Testigo, esto debido al hecho de que el déficit de agua no era grave (Figura 12).

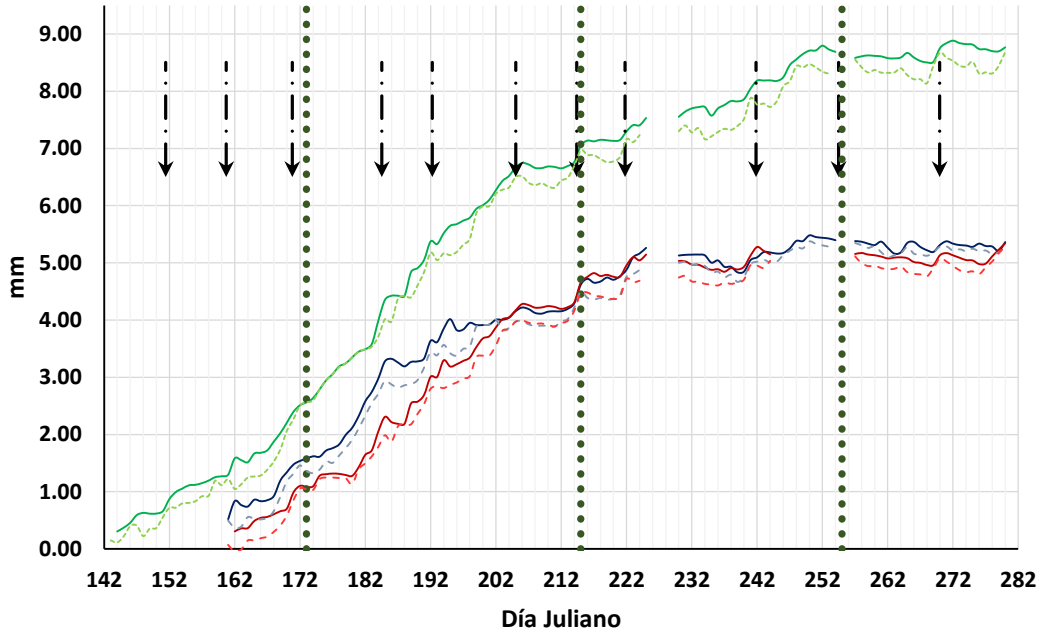

Figura 12. Evolución de la tasa de crecimiento acumulado de los máximos (líneas continuas) y mínimos (líneas discontinuas) de los tratamientos Testigo (— y - - -), Sobre-irrigado (— y - - -) y Sub-irrigado (— y - - -) de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila, con ilustración de aplicaciones de riego (— • →) y etapas fenológicas (• • •) durante el periodo experimental comprendido entre los días 142 a 282 (días julianos) del año 2014.

En la Figura 12 se pudo observar que para las etapas de endurecimiento de cáscara y maduración de fruto se redujo el crecimiento radial, esto pudo deberse a que el crecimiento de la fruta es predominante y también hay una redistribución del agua absorbida por la planta para suministrar

el crecimiento reproductivo (Silva-Contreras *et al*., 2008), es decir, la prioridad de la demanda es el fruto. Por otro lado Moriana *et al*., (2003) encontraron que en aceitunas sin estrés hídrico, la presencia de una carga de fruta suficiente da lugar a una reducción alta del crecimiento del tronco durante el endurecimiento masivo del hueso de aceituna. Encontrando dos fases bien diferenciadas, por una lado al inicio con valores positivos y elevados de la tasa de crecimiento y por otro valores mínimos cercanos a cero. En cambio en condiciones de descarga obtuvieron un crecimiento continuo a lo largo de la estación, con incremento de la tasa de crecimiento al final de la misma. La MXTD y MNTD mantuvieron un comportamiento parecido con mínimas diferencias entre sí, observándose ligeros aumentos en estos parámetros en las fechas de aplicación de riego.

VI.2.7 Líneas de referencia

Las FDT, y para el caso de la MCD, aparte de ser un indicador de referencia ha pasado a establecer criterios para la programación del riego basados en el estado hídrico de la planta, debido a la estrecha relación que existe entre este indicador y la demanda climática, diversos autores han manifestado la necesidad de normalizar los valores absolutos obtenidos a partir de arboles bien regados con respecto a distintas variables climáticas (Egea *et al*., 2009; Fereres y Goldhamer, 2003; Ortuño *et al*., 2010, Ortuño *et al*., 2009a). La normalización de estos valores se basa en que los valores de MCD de arboles bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo, reflejan los efectos de la demanda climática en la contracción del tronco; de modo que si se relacionan los valores de MCD, así obtenidos, con distintas variables metereológicas se obtienen las denominadas líneas de referencia.

Durante el periodo de evaluación las condiciones climáticas fueron características de la región, en los que se alcanzaron temperaturas máximas por encima de 36.21 ºC. Las mayores precipitaciones tuvieron lugar en los meses de Mayo, Septiembre y Noviembre, teniendo un total de 445.4 mm a lo largo del periodo mientras que ET_O supuso una lámina de 982 mm.

Se han obtenido líneas de referencia entre la MCD y distintas variables climáticas para los tratamientos Testigo y Sobre-irrigado, asi como para cada etapa fenológica (Cuadro 13), cada una de ellas con diferentes coeficientes de determinación. Para este estudio las variables climáticas

mejor predictoras de MCD fueron T_{med}, T_{max}, DPV, radiación global y HR para el tratamiento Testigo y ET_O, T_{med}, T_{max}, DPV, radiación global y HR para el tratamiento Sobre-irrigado.

El estudio demostro (Cuadro 13) que las variables climáticas presentaron mejor comportamiento cuando se tienen mejores condiciones de humedad del suelo. Para la etapa fenológica de desarrollo de fruto (Cuadro 13, Figura 13a y Figura 14a) las mejores líneas de referencia para los tratamientos Testigo y Sobre-irrigado se obtuvieron con las variables climáticas T_{max}, T_{med}, HR y DPV, este último calculado con respecto a la T_{med} y HR, por lo que integra el efecto de estas dos variables siendo el más representativo en los dos tratamientos, con valores de r^2 de 0.70^{**}, 0.76^{**}; pero ligeramente inferior con respecto a los valores de r^2 obtenidos con T_{max}, HR y T_{med} para los tratamientos Testigo y Sobre-irrigado respectivamente. La temperatura no es un índice preciso de la demanda evaporativa de la atmósfera (Hatfield y Fuchs, 1990), pero la temperatura media y máxima diaria del aire es la variable meteorológica más fácil y económica de medir.

Para la etapa fenológica de estado acuoso se obtuvieron valores de r^2 de 0.13^{*}, 0.35^{**}, con las variables climáticas T_{max} y HR para los tratamientos Testigo y Sobre-irrigado respectivamente (Cuadro 13, Figura 13b y Figura 14b), este bajo grado de asociación entre las variables climáticas, puede deberse que es la etapa donde se lleva a cabo la acumulación de líquido en el fruto que más adelante formara la almendra, siendo la carga frutal un factor agregado en la magnitud del parámetro de MCD (Intrigliolo y Castel, 2007a), además esta etapa fenológica se presenta en los meses de Junio y Julio siendo este último el mes de mayor demanda, y según la literatura el desequilibrio entre la capacidad de absorción de agua de la raíz y la demanda evapotranspirativa durante el día aumenta conforme crecen los valores de esta demanda.

En la etapa fenológica de endurecimiento de cáscara (Cuadro 13, Figura 13c y Figura 14c) se presentó una baja correlación para el tratamientos Testigo, siendo el contenido de humedad del suelo como mejor predictor de la MCD ($r^2=0.319^{*}$), presentando contenidos de humedad en base a volumen promedios de 34 % durante esta etapa. Para el caso del tratamiento Sobre-irrigado se obtuvo una r^2 de 0.66^{**} con la variable climática DPV seguida por HR y T_{med}.

Cuadro 13. Líneas de referencia para MCD con variables meteorológicas más representativas para el cultivo de nogal pecanero para las etapas fenológicas comprendidas el periodo de evaluación para los tratamientos Testigo y Sobre-irrigado de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014

Etapa fenológica	Variable climática	a	b	r^2
		Testigo		
Desarrollo de fruto	T_{max}	0.617	0.026	0.769**
	T_{med}	-0.794	0.037	0.672**
	HR	0.656	-0.006	0.704**
	DPV	0.089	0.123	0.705**
Estado acuoso	T_{max}	-0.409	0.019	0.137*
	HR	0.525	-0.004	0.131*
	Radiación	-0.005	0.0005	0.125*
Endurecimiento de cáscara	T_{min}	0.772	-0.025	0.215*
	Θ_V	-0.177	1.085	0.319*
		Sobre-Irrigado		
Desarrollo de fruto	T_{max}	-0.708	0.030	0.765**
	T_{med}	-0.987	0.046	0.771**
	HR	0.804	-0.007	0.783**
	DPV	0.095	0.152	0.768**
Estado acuoso	**HR**	0.737	-0.008	0.358**
	DPV	0.026	0.139	0.322*
	Radiación	-0.128	0.0008	0.315*
	ET_O	-0.043	0.054	0.327*
Endurecimiento de cáscara	T_{med}	-1.045	0.045	0.572**
	HR	0.851	-0.008	0.650**
	DPV	0.053	0.164	0.660**
	ET_O	-0.023	0.062	0.568**
Maduración de fruto	**HR**	1.024	-0.010	0.710**
	DPV	0.029	0.320	0.707**
	Radiación	-0.112	0.0009	0.871**
	ET_O	-0.059	0.091	0.880**

Coeficiente de determinación seguidas con un * y ** representan significancia y alta significancia.

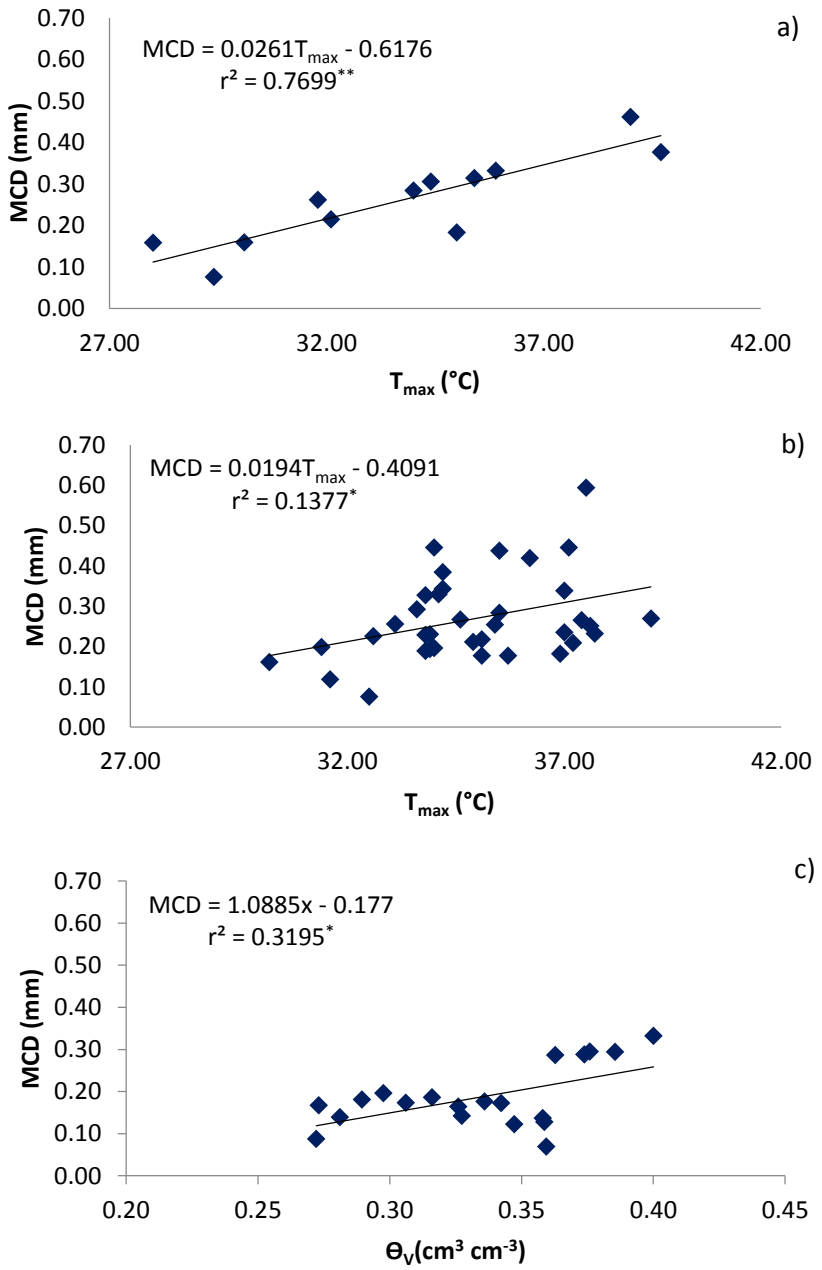

Figura 13. Líneas de referencia en base a MCD para el tratamiento Testigo con valores diarios de MCD y variables meteorológicas más representativas obtenidas para el cultivo de nogal pecanero por etapa fenológica a) Desarrollo de fruto, b) Estado acuoso y c) Endurecimiento de cáscara de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014.

Para la etapa de maduración de fruto (Cuadro 13 y Figura 14d) solo se obtuvieron datos para el tratamiento Sobre-irrigado siendo la ET_O con mayor grado de asociación con una $r^2 = 0.88^{**}$. Se pudo observar que se pueden obtener varias líneas de referencia con diferente grado de asociación

y con diferentes variables, pero las líneas de referencias más validas son aquellas en el que existe un mayor control de humedad de suelo, es decir en aquellos tratamientos sin restricciones de humedad ya que esto permitirá que las fluctuaciones de diámetro de tallo sean el efecto de la demanda evapotranspirativa (Conejero *et al.*, 2011; Fernández y Cuevas, 2010; Moriana *et al.*, 2011; Ortuño *et al.*, 2009a y 2010), a pesar de este control existirán diversos factores que la modificaran pero en menor cantidad como lo son la carga frutal, la etapa fenológica, salinidad del suelo, edad del árbol, etc. Pero estas líneas de referencia individuales entre la MCD y las variables ambientales tienen el potencial de ser usadas para obtener valores de referencia de MCD, evitando el uso de árboles de referencia y las dificultades operacionales que este metodo genera.

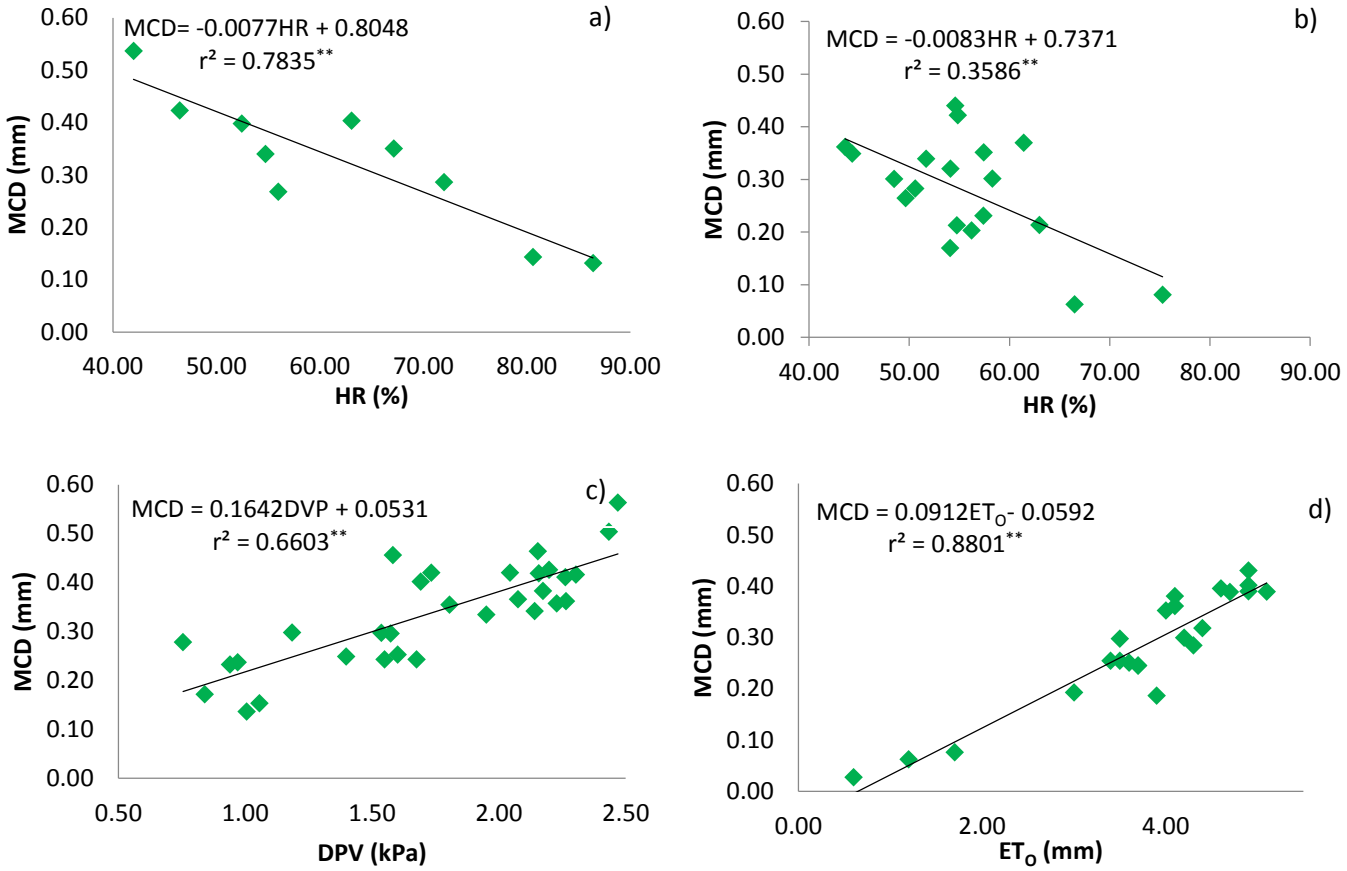

Figura 14. Líneas de referencia en base a MCD para el tratamiento Sobre-irrigado con valores diarios de MCD y variables meteorológicas más representativas obtenidas para el cultivo de nogal pecanero por etapa fenológica a) Desarrollo de fruto, b) Estado acuoso, c) Endurecimiento de cáscara y d) Maduración de fruto de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila del año 2014.

Se puede observar que para cada etapa fenológica el comportamiento en la MCD como los diferentes parámetros que ofrece el estudio de las FDT son cambiantes, por lo que para un mejor ajuste y precisión las líneas de referencia se deben obtener en base a la fenología y fisiología del cultivo ya que como se observo en este estudio se obtuvieron diferentes líneas de referencia con diferentes variables climáticas para cada etapa fenológica además de una mayor grado de asociación entre MCD $_{Vs}$ variable climática, a diferencia de una sola línea de referencia para todo el periodo de estudio (datos no mostrados), concordando con Intrigliolo y Castel (2006) que en ciruelo obtuvieron tres diferentes líneas de referencia una para toda la temporada y dos más para las fases de crecimiento de fruta y poscosecha, en ellas observaron que además de obtener una diferencia en el comportamiento de la MCD a través del tiempo, las variables climáticas que mejor predicen la MCD cambian, contrario a lo encontrado por Egea *et al*. (2009) en almendros en el que obtuvieron cuatro líneas de referencia, una para toda la temporada, y tres más para las fases de crecimiento II-III, IV y V en el cual el DPV_{max} fue la variable climática más importante para cada una de las ecuaciones de referencia y con mayor coeficiente de determinación en la línea de referencia para toda la temporada (r^2=0.80), la diferencia de esto es que el estudio se realizó en arboles jóvenes, por lo que demuestra un comportamiento muy diferente entre especies así como la edad de estos.

VI.2.8 Intensidad de Señal (IS)

Los valores promedios de IS y ruido obtenidos por cada etapa fenológica evaluada se presentan en el Cuadro 14. Cabe señalar que los valores de ruido (CV) son mayores en comparación a los obtenidos por Galindo *et al.* (2013) en el cultivo de granada, esto causado por las diferencias en la frecuencias de riego. En este sentido, García-Orellana *et al*. (2007) y Ortuño *et al*. (2009b) propusieron cambios en la frecuencia de riego.

Cuadro 14. Media de intensidad de señal (IS) para el cultivo de nogal pecanero para cada una de las etapas fenológicas evaluadas para la relacion de los tratamientos Sobre-irrigado/Testigo, de la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila en el año 2014.

	Etapa fenológica	$IS_{Promedio}$	Ruido
Sobre-irrigado/Testigo	Desarrollo de fruto	1.21	0.12
Sobre-irrigado/Testigo	Estado acuoso	1.16	0.15
Sobre-irrigado/Testigo	Endurecimiento de cascara	2.07	0.39

Para la programación de riego en base a IS es deseable frecuencias de aplicación de riego diarias para la reducción de los valores de dispersión, generando un mayor control en el valor de IS, esto debido a la disminución en la magnitud de las variaciones del contenido de humedad en el suelo, que es un factor que afecta a la MCD. Conejero (2008) a través del ajuste diario de las dosis de riego consiguió disminuir las desviaciones de IS respecto a IS fijado, además Ortuño *et al*. (2008) demostraron que manteniendo la IS en valores cercanos a la unidad es posible estimar la evapotranspiración del cultivo partiendo del hecho de que la $MCD_{referencia}$ (arboles control o líneas de referencia) es obtenida mediante la programación de riego en base a la ET_C o ET_O. Es importante también recalcar el establecimiento de umbrales de IS para cada etapa fenológica.

VI.2.10 Rendimiento y parámetros de calidad

Para los tratamientos evaluados no se obtuvieron diferencias significativas en el rendimiento así como para los parámetros de porcentaje de llenado y numero de nueces por kilogramo como se puede observar en el Cuadro 15. Esto probablemente debido a que las condiciones de humedad fueron buenas para el periodo de evaluación para los tres tratamientos, es decir, existió la ausencia de un estrés hídrico importante, sin olvidar de que es un frutal y la producción irregular está determinada en gran parte de sus reservas de carbohidratos y de nitrógeno con las que el nogal entra al reposo invernal (Wood, 2002) que son empleadas para la brotación, teniendo así un potencial de desarrollo foliar y por consiguiente buena capacidad de formación de carbohidratos; por lo que para observar cambios significativos en el rendimiento es necesario una evaluación de un periodo mayor a dos años, es decir, para éste estudio se requiere un año más de evaluación para obtener datos contundentes, e inclusive ver cuál es el efecto por alternancia del cultivo.

En comparación con el rendimiento promedio nacional y del estado de Coahuila bajo condiciones de riego que presenta valores de 1.68 y 1.20 $ton \cdot ha^{-1}$ respectivamente, los resultados obtenidos son superiores, esto por el buen manejo que tiene el cultivo, en cuanto a plagas y enfermedades, fertilización, poda, asi como el manejo de riego.

Cuadro 15. Rendimiento total, porciento de llenado y número de nueces por kilogramo obtenidas en la localidad rancho Tres Marías, Zaragoza, Coahuila en el año 2014.

Tratamiento	Rendimiento (ton/ha)	Porciento de llenado (%)	No. Nueces·Kg^{-1}
Testigo	2.60a	65.42a	121ª
Sobre-irrigado	2.67a	64.63a	124ª
Sub-irrigado	2.80a	64.03a	125ª

Medias seguidas con la misma letra son estadísticamente iguales LSD ($P \leq 0.05$)

La alternancia es un aspecto importante en el nogal pecanero llegando hasta un 83 % el cual es considerado como alto. Desde el siglo XIX a este problema se le considera como uno del más importante en este cultivo, como medidas a este problema los productores lo compensan mediante una fertilización adecuada. Según Medina-Morales *et al*. (2000) las huertas semiadultas (22 a 29 años) y adultas (33 a 49 años) tienen mayor índice de alternancia, pero el grado de alternancia es diferente entre las variedades de nogal pecanero, de las condiciones de manejo así como entre la localización geográfica (Núñez, 2001).

VI.3 SAnalisis global del comportamiento de las variables evaluadas entre ambas localidades.

El comportamiento de las variables medidas con el IRGA se muestran en el Cuadro 16, se pudo observar que para la g_s, T, EIUA existen diferencias significativas entre localidades mientras que para A y PAR solo se presentan diferencias numéricas, teniendo los valores más altos para la localidad Rancho Tres Marías pero menor eficiencia intrínseca del agua esto por la mayor tasa de transpiración. Los mayores valores promedios entre tratamientos para ambas localidades fueron para el caso de fotosíntesis el tratamiento Testigo y Sub-irrigado para las localidades rancho Tres Marías y San Juan de la Vaquería respectivamente, cabe señalar que es una diferencia numérica ya que en el análisis individual de las localidades no existieron diferencias significativas entre tratamientos.

Con respecto a la eficiencia intrínseca del agua (EIUA) se pudo observar que existió una mayor eficiencia en la localidad rancho San Juan de la Vaquería en comparación con la localidad rancho Tres Marías, esto debido a la baja tasa de transpiración que se presentó en el cultivo, provocado por el manejo del riego, ya que para esta localidad existieron condiciones de humedad del suelo y láminas consumidas menores en comparación a la localidad rancho Tres Marías, es decir, en la localidad rancho Tres Marías se perdió eficiencia pero se gano mayor calidad y rendimiento.

Cuadro 16. Comportamiento global de la conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética (A), radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura de aire (T_a), temperatura de hoja (T_h), transpiración (T) y eficiencia intrínseca del uso del agua (EIUA) entre las localidades rancho Tres Marías, y San Juan de la Vaquería del año 2014.

Localidad	Variable				
	g_s	A	PAR	T	EIUA
	($molH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	($\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	($mmolH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	(mmol CO_2/mol H_2O)
Rancho Tres Marías	0.29a	41a	1517a	10.9[a]	3.88b
Rancho San Juan de la Vaquería	0.12b	35.73a	1345a	5.57b	6.78a

Medias seguidas con la misma letra son estadísticamente iguales LSD ($P \leq 0.05$)

El potencial hídrico xilemático (Cuadro 17) presento un comportamiento variable durante el periodo de evaluación, no presentando diferencias significativas entre localidades. Las condiciones de humedad de suelo en ambas localidades variaron a lo largo del tiempo, existiendo pocos muestreos con diferencias significativas en los análisis individuales esto por la presencia de

muestreos con riegos anticipados para ambas localidades, por lo que los valores de potencial hídrico se encuentran en rangos aceptables basados en Villalobos *et al.* (2002) que mencionan que en condiciones hídricas adecuadas los valores de potencial hídrico en especies frutales se encuentran en el rango de -0.8 y -1.0 MPa, a pesar de las diferencias de láminas aplicadas y los contenidos de humedad manejados entre ambas localidades.

Cuadro 17. Comportamiento global del potencial hídrico Xilemático (Ψ_{Xilema}), máxima contracción diaria de tallo (MCD) entre las localidades rancho Tres Marías, y San Juan de la Vaquería del año 2014.

Localidad	Variable	
	Ψ_{Xilema} (MPa)	MCD (mm)
Rancho Tres Marías	-0.79a	0.24a
Rancho San Juan de la Vaquería	-0.78a	0.10b

Medias seguidas con la misma letra son estadísticamente iguales LSD ($P \leq 0.05$)

Para el caso de la variable MCD (Cuadro 17) presento diferencias significativas entre localidades, siendo la localidad rancho Tres Marías quien presento valores promedios globales mayores en comparación a la localidad rancho San Juan de la Vaquería debido a la mayor demanda atmosférica a pesar de las mejores condiciones hídricas que esta presento, esto por las condiciones mayores de demanda evapotranspirativa, así como las diferencias de edad y tamaño de árboles.

Par las variables rendimiento, porciento de llenado y numero de nueces por kilogramo (Cuadro 18) existieron diferencias estadísticas significativas entre localidades presentando los mejores resultados la localidad rancho Tres Marías esto por el buen manejo tanto agronómico como hídrico del cultivo por parte del agricultor. Superando el rendimiento promedio nacional y estatal bajo condiciones de riego que presenta valores de 1.68 y 1.20 ton·ha^{-1}respectivamente.

En cuanto al porciento de llenado con respecto a los valores mencionados por Brison (1976), Herrera (1982) y Madden *et al*. (1975).de 57 a 63 % en variedad Wichita los valores obtenidos en este estudio son inferiores para el caso de la localidad San Juan de la Vaquería, es decir, no se cumple con este estándar de calidad, mientras que para la localidad rancho Tres Marías estos valores de referencia fueron superados, además de presentar tamaños y pesos mayores en comparación a la localidad rancho San Juan de la Vaquería (datos no mostrados).

Cuadro 18. Análisis de las variables rendimiento, porcieno de llenado y número de nueces por kilogramo entre las localidades rancho Tres Marías, y San Juan de la Vaquería del año 2014.

	Variable		
Localidad	**Rendimiento ton·ha^{-1}**	**Porciento de llenado (%)**	**No. nueces·Kg^{-1}**
Rancho Tres Marías	2.69a	64.37a	195a
Rancho San Juan de la Vaquería	1.1b	55b	114.18b

VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demostraron que es posible la elaboración de líneas de referencia en base a la MCD con respecto de las variables climáticas que es una de las principales herramientas para la programación de riego basado en la medición de las FDT.

Las líneas de referencia basadas en la relación MCD y variables climáticas obtenidas, que son las bases generadas en este trabajo para la programación de riego, pueden ser empleadas para la predicción de valores de $MCD_{referencia}$, evitando así mantener árboles sin limitación de agua en el suelo en la misma parcela como referencia para la normalización de los valores de MCD_{reales} evitando complicaciones operacionales.

Para la elaboración de estas líneas de referencia es necesario considerar cada una de las etapas fenológicas por separado, ya que el comportamiento y magnitud de la MCD es variable a través del tiempo y del estadio del cultivo, evitando la consideración conjunta de toda la estación de crecimiento y de esta manera reducir el error en la predicción de esta variable.

La evaluación del comportamiento de las FDT y principalmente de la MCD y su relación con las variables climáticas requiere de un estudio profundo, así como en periodos de tiempo de 2 o más ciclos productivos para ver la repetitividad o consistencia de las líneas de referencia.

VIII. PERSPECTIVAS

A partir de los estudios y discusiones presentados en esta investigación las perspectivas de trabajos futuros se orientan en las siguientes direcciones:

En primer plano estarían los trabajos destinados a complementar los aspectos de obtención de líneas de referencia basadas en la MCD para cada una de las etapas fenológicas del nogal pecanero, recomendando estudios en periodos de 2 o más ciclos productivos, esto para ver si el componente climático de estas líneas de referencia son repetitivos interanualmente, ya que de existir una variabilidad, su empleo en la programación continua del riego no sería recomendable, pues solo seria valido para el año o ciclo en el que fue obtenida.

En segundo plano está el estudio del efecto que presentan factores como carga frutal, variedad, edad, salinidad de suelo, aplicaciones de estrés hídrico más severos, etc. en el comportamiento y magnitud de la MCD, ya que el mantener tratamientos en condiciones no limitantes de agua, el parámetro de MCD no solo depende de las condiciones climáticas totalmente, sino que también de los factores antes mencionados.

En tercer plano está el estudio de aplicaciones de grados de estrés hídrico diferentes en cada una de las etapas fenológicas de este cultivo, esto con la finalidad de detectar etapas no susceptibles a sierto grado de estrés que permita un ahorro mayor del recurso hídrico sin afectar el rendimiento o relación costo/beneficio, así como la calidad de la nuez.

IX. REFERENCIAS

Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S., y Perrier, A. (1994). An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bull. 43(2): 35–92.

Allen, R.G., Pereira, R.S., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage 56, FAO, Roma. pp 1–3.

Améglio, T. y Cruiziat, P. (1992). "Daily variations of stem and branch diameter: short overview from a developed example". En: Mechanics of Swelling, Karalis, T.K. (ed.). Vol. H64. Springer. Alemania. pp. 193–204.

Amling, J. H. y Hamling. K. A. (1983). Physiological differentiation of pistillate flowers and cold requirements for their initiation. Journal of the American Society for Horticultural Science. 108: 195–198.

Andersen, P. C. (1994). Lack of sunlight can limit pecan production in the Southeastern. U. S. the Pecan Grower. Georgia Pecan Gro. Assoc. 6(2): 20–21.

Aragón P. de L. M.C. (2004). El cultivo del nogal pecanero: sus perspectivas de producción, comercialización y transformación de la nuez. Texto de apoyo. FACIATEC-UACH. México. p 163.

Arreola, J. G., Hernández, M. A., Trejo, R. y Flores, A. (2007) Condiciones de luz y actividad fotosintética en arboles en produccion de nogal pecanero (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch). Revista Chapingo. Serie Zonas Aridas. 6: 219–222.

Asenjo, J.L. y Yuste, J. (2003). "Estimación del estado hídrico del suelo por tensiometría y volumetría y su relación con el estado hídrico del viñedo". En: Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VII. Álvarez-Benedí, J. y Marinero, P. (ed.). Valladolid. España. pp. 177–180.

Baylon, A. (2013).Uso de la Máxima Contracción Diaria del Tallo como un Indicador de Estrés Hídrico en la Programación del Riego en los Cultivos de Nogal Pecanero (Carya illinoinensis (Wangehn.) K. Koch.) y Durazno (Prunus persica (L.) Batsch cv. Flordastar). Tesis de Maestría. Mexico. Centro de Investigacion en Quimica Aplicada.

Biel, C., Savé, R., Grau, B., Aranda, X., de Herralde, F. y Casadesus, J. (2008). "Scheduling irrigation based on soil and plant sensors in Platanus hispanica submitted to root restriction". En: Proceedings of the European Congress of Arboricultura. 16-18 Junio. Italia.

Brison R F. (1976). Cultivo del nogal pecanero. 1ra ed. Comisión Nacional de Fruticultura (CONAFRUT). México. 350 pp.

Brison, R. F., (1992). Cultivo del nogal pecanero. 2da ed. Comisión Nacional de Fruticultura (CONAFRUT). México. p. 349.

Bussi, C., Huguet, J.G., Besset, J. y Girard, T. (1999). Irrigation scheduling of an early maturing peach cultivar using tensiometers and diurnal changes in stem diameter. Journal Fruits. 54: 57–66.

Campbell, D.I. y Willianson, J.L. (1997). Evaporation from a rained peat log. Journal of Hydrology, 193: 142–160.

Campos, J. S., Vázquez P., Olivares S., Treviño P., Santos M., Lemus H., Aguilar S. y Leyva R. (2005). Diagnóstico del cultivo de nogal en los municipios de Arambarri, Bustamante, Rayones, Villaldama y Zaragoza, Nuevo León. Gobierno del estado de Nuevo León, ALIANZA, SAGARPA y CPA.

Chalmers, O. y Van den Ende, B. (1974). Productivity of peach trees: factor affecting dry–weight distribution during tree growth. Journal Annals of Botany. 41: 707–714.

Chávez, E., González, G., Rivera, M., Estrada, J., y González, J. L. (2006). El consumo hídrico en nogal pecanero, a partir del monitoreo ambiental y el uso de la telemetría. Journal Agrofaz. 6(3): 315–322.

Cochard, H., Forestier, S. y Ameglio, T. (2001). A new validation of the Scholander pressure chamber technique based on stem diameter variations. Journal of Experimental Botany. 52: 1361–1365.

Cocozza, C., Giovannelli, A., Lasserre, B., Cantini, C., Lombardi, F. y Tognetti, R. (2012). A novel mathematical procedure to interpret the stem radius variation in olive trees. Journal Agricultural and Forest Meteorology. 161: 80–93.

Cohen, M. (1994). Funcionamiento Hídrico y Producción Frutal del Nogal en Zonas Semiáridas Aplicación al Manejo del Riego. Tesis Doctoral. España. Universidad de Lleida.

Cohen, S., Moreshet, S., Le-Guillou, L., Simon, J.C. y Cohen, M. (1997). Response of citrus trees to modified radiation regime in semi-arid conditions. Journal of Experimental Botany. 48 (306): 35–44.

Conejero, W. (2008). Programación del riego en melocotonero mediante el uso de sensores del diámetro del tronco. Tesis doctoral. España. Universidad Politécnica de Cartagena.

Conejero, W., Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Abrisqueta, J.M. y Torrecillas, A. (2007a). Daily sap flow and maximum daily trunk shrinkage measurements for diagnosing water stress in early maturing peach trees during the post-harvest period. Journal Tree Physiol. 27: 81–88.

Conejero, W., Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Nicolás, E. y Torrecillas, A. (2007b). Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors used for irrgation scheduling in early maturing peach trees. Journal Tree Physiology. 27:1756–1759.

Conejero, W., Mellisho, C.D., Ortuño, M.F., Galindo, A., Pérez-Sarmiento, F. y Torrecillas, A. (2011). Establishing maximum daily trunk shrinkage and midday stem water potential reference

equations for irrigation scheduling of early maturing peach trees. Journal Irrigation. Science. 29: 299–309.

Couvillon, G. A., Rieger, M., Harrison, R., Daniell, J. y Gómez, J. (1988). Stress mediated responses of own rooted peach cultivars. Journal Acta horticulturae. 243: 221–230.

Cuevas, M., Torres-Ruiz, J., Álvarez, R., Jiménez, M., Cueva, J. y Fernández, J. (2010). Assessment of trunk diameter variation derived indices as wáter stress indicators in mature olive trees. Journal Agricultural Water Management. 97: 1293–1302.

Daudet, F.A., Améglio, T., Cochard, H., Archilla, O. y Lacointe, A. (2005). Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. Journal Experimental Botany. 56:135–144.

Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Sánchez-Blanco, M.J. y Torrecillas, A. (1996) Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated déficit irrigation. Journal Irrigation Science, 16: 115–123.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1977). Guidelines for predicting crop wáter requirements. Irrigation and Drainage 24 .FAO. 2ª ed. Roma. 156 pp.

Egea, G., Pagán, E., Baille, A., Domingo, R., Nortes, P.A. y Pérez-Pastor, A. (2009). Usefulness of establishing trunk diameter based reference lines for irrigation scheduling in almond trees. Journal Irrigation Science. 27: 431–441.

Faci, J.M. y Martínez-Cobb, A. (1993). Necesidades de riego. Determinación en las plantaciones de frutales del Valle del Ebro. Journal Hortofruticultura. 4: 47–52.

Farahani, H.J. y Ahuja, L.R. (1996). Evapotranspiration modelling of partial canopy/residue-covered fields. Transactions of the ASAE. 39: 2051–2064

Fereres, E. y Evans, R.G. (2006). Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. Journal Irrigation Science. 24: 55–57.

Fereres, E. y Goldhamer, D.A. (2000). Avances recientes en la programación de los riegos. Journal Ingeniería del Agua (7): 47–54.

Fereres, E. (1978). Irrigation of almond. En: Almond orchard Management. Micke, W. y Kester, D. Eds. Division of Agricultural Science, University of California. E.U.A. pp. 71–76.

Fereres, E. y Goldhamer, D. (2000). Avances recientes en la programación de los riegos. Journal Ingeniería del Agua. 7: 47–54.

Fereres, E. y Goldhamer, D.A. (2003). Suitability of stem diameter variations and wáter potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. Journal of Horticultural Science and Biotechnology. 78: 139–144

Fereres, E. y Goldhamer, D. (1990). “Deciduous fruit and nut trees”. En: Irrigation of agricultural crops. Steward, B.A. y Nielsen, D.R. (eds). E.U.A. American Society of Agronomy. pp. 987–1017.

Fernández, J.E. y Cuevas, M.V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. Journal Agricultural and Forest Meteorology. 150: 135–151.

Ferreyra, R., Selles, G., y Lemus, G. Effect of water stress during fruit growth phase II of peach trees cv. Kakamas on yield and tree water status. (2002). Chilean Journal of Agricultural Research 62 (4): 565–573.

Ferreyra, R., Selles, G., Maldonado, P., Celedón de A., C., y Gil, P. (2007). Efecto del clima, de las características de la hoja y de la metodología de medición en el potencial hídrico xilemático en palto (Persea Americana Mill.). Chilean Journal of Agricultural Research 67(2): 182–188.

Ferreyra, R., Selles, G. y Selles, I. (2001). Estratejias de riego para enfrentar situaciones de escases de agua en frutales.Riego deficitario en nogales. Instituto de investigaciones agropecuarias Santiago, Chile .Boletin INNIA No. 5836p

Friedrich, J. (1897). Über den Einfluß der Witterung auf den Baumzuwachs. Centralbl Gesamte Forstwes. 23: 470–495.

Fuertes, S. J. (1995). Calibración de métodos de cálculo de la evapotranspiracion de referencia (ET_O) con lisímetros. Trabajo final de carrera. España. Universidad de Zaragoza.

Fuertes, S. J. (1998). Evaluación de dos métodos de determinación de la evapotranspiración de referencia en condiciones semiáridas. Proyecto fin de carrera. España. Universidad de Lleida.

Fulton, A., Buchner, R. y Gilles, C. (2001). Rapid equilibration of leaf and stem water potential under field conditions in almonds, walnuts, and prunes. Journal HortTechnology 11: 502–673.

Galindo, A., Rodríguez, P., Mellisho, C.D., Torrecillas, E., Moriana, A., Cruz, Z.N., Conejero, W., Moreno, F. y Torrecillas, A. (2013). Assessment of discretely measured indicators and maximum daily trunk shrinkage for detecting water stress in pomegranate tres. Journal Agricultural and Forest Meteorology. 180: 58–65.

García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Nicolás, E. y Torrecillas, A. (2007). Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. Journal Agricultural Water Management. 89: 167–171.

Génard, M., Fishman, S., Vercambre, G., Huguet, J., Bussi, C., Besset, J. y Habib, R. (2001). A biophysical analysis of stem and root diameter variations in woody plants. Journal Plant Physiology. 126 (1): 188–202.

Gill, K.S., Gajri, P.R. y Chaudhary, M.R. (1996). Tillage, mulch and irrigation effects on corn (Zea mays L.) in relation to evaporative demand. Journal Soil & Tillage Research. 39: 213–227.

Ginestar, C. y Castel, J.R. (1996). Utilización de dendrómetros como indicadores de estrés hídrico en mandarinos jóvenes regados por goteo. Riegos y Drenajes XXI. 89: 40–46.

Godoy-Ávila, C. y M.V. Huitrón-Ramírez. (1998). Relaciones hídricas de hojas y frutos de nogal pecanero durante el crecimiento y desarrollo de la nuez. Journal Agrociencia. 32: 331–337.

Godoy-Ávila, C., Xopiyaxtle-Jarquín, Z., Reyes-Juárez, I. y Torres, C. A. (2005). Comportamiento hídrico de hojas y frutos de nogal pecanero y su relación con la calidad y germinación de frutos. Journal Terra Latinoamericana. 23 (4): 505–513

Godoy-Ávila, C., López-Montoya, I. (2000). Desarrollo de la almendra y germinacion del fruto del nogal pecanero bajo cuatro calendarios de riego. Journal Terra Latinoamericana 18 (4): 305–3011.

Godoy, C. y López J. (1997). Patrón de extracción y requerimientos de agua en diferentes etapas fenológicas en el nogal. Journal Terra Latinoamericana 15: 1–6.

Gody, C., Reyes, I., Torres, C. A., Huitrón, M. V., Cristian, J. y Morales, J. (2000). Tecnología de riego en nogal pecanero. Libro Científico No. 1. 1ra ed. México. pp 11–37

Goldhamer, D., Fereres, E., Cohen, M., Girona, J. y Mata, M. (2000). Comparison of continuous and discrete plant-based monitoring for detecting tree wáter deficitsand barriers to grower adoption for irrigation management. Journal Acta Horticulturae. 537: 431–445.

Goldhamer, D., Fereres, E., Mata, M., Girona, J. y Cohen, M. (1999). Sensivity of continuous and discrete plant and soil water stress monitoring in peach trees subjeted to déficit irrigation. Journal of American Society for Horticultural Science. 124: 437–444.

Goldhamer, D.A. y Fereres, E., (2001). Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. Journal Irrigation Science. 20: 115–125.

Goldhamer, D.A.y Fereres, E. (2004). Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. Journal Irrigation Science. 23: 11–19.

Gómez-Aparisi, J. (1993). Necesidades de agua de riego. Determinación en las plantaciones frutales del Valle del Ebro. Hortofrut. 4: 47–52.

González, G., González, J., Potisek, C., Valenzuela, L. y Lópe, A. (2014). Crecimiento radial de madera de nogal pecanero (Carya illinoinensis (Wangenh.) K. Koch) bajo diferentes láminas de riego. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas. 13: 9 - 13

Grossman, Y.L. y DeJong, T.M. (1994.) Peach: a simulation model of reproductive and vegetative growth in peach trees. Journal Tree Physiol. 14: 329–345.

Hatfield, J.L. y M.F. Fuchs. (1990). Evapotranspiration models. In Management of farm irrigation systems. Hoffman, G.J., Howell, T.A. y Solomon, K.H. Eds. ASAE Monograph, St. Joseph, pp 33–60.

Heinsoo, K. y Koppel, A. (1998). Minimum epidermal conductance of Norway spruce (Picea abies) needles: Influence of age and shoot position in the crown. Journal Annales Botanici Fennici. 35: 257–262.

Hernández, C. J. (2003). Estimación de los requerimientos hídricos de nogales en desarrollo y producción en Jiménez, Chihuahua. Informe de investigación. México. CEDEL-INIFAP.

Herrera, E. (1982). Growing pecan in new Mexico. Circular 461. CES-New Mexico State University

Herrera, E. y Clevenger, T. (1996). Importancia económica de la industria Nogalera en E.U.A. (Guía Z–501) Servicio Cooperativo de Extencion Agricola. NMSU. Nuevo México, EUA. pp. 2–5.

Herrera, E.A. (2008). Manejo de huertas de nogal. 1a. ed. México. Universidad Auntónoma de Chihuahua

Hsiao, TC. (1990). Measurements of plant water status. En Irrigation of Agricultural Crops Steward, B A y Nielsen, D R. (Eds). E.U.A. American Society of Agronomy. pp. 243–279.

Huguet, J.G., Li, S.H., Lorendeau, J. y Pelloux, G. (1992). Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. Journal of Horticultural Sciences. 67: 631– 640.

Ibarra, L. (2013). Evaluacion de variables relacionadas con fotosíntesis en nogal pecanero (Carya illinoinensis (Wageh.) K. Koch), establecidos en alta densidad. Tesis de licenciatura. Mexico. Univercidad Autonoma Chapingo

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. (2007a). Crop load affects maximum diurnal trunk shrinkage in plum trees. Journal Tree Physiology. 27:89–96

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. (2007b). Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations. Journal Irrigation Science. 26:49–59.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. (2006). Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a wáter stress indicator in plum trees. Journal Tree Physiol. 26: 303–311.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. (2004). Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. Journal Irrigation Science 23: 93–102.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. (2005). Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of young Japanese plum trees. Journal of Horticultural Science and Biotechnology. 80: 177–182.

Jensen, M. E., Burman, R. D. y Allen, R. G. (eds.). (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. on Eng. Practice No. 70. Am. Soc. Civ. Engr. Manuals and Repts. E.U.A. 360 pp.

Jones, H.G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. Journal of Experimental Botany. 55: 2427–2496.

Katerji, N., Daudet, F. A., Carbonneau, A. y Ollat, N. (1994). Etude a 1'echelle de la plante entire du fonctionnement hydrique et photosynthetique de la vigne: Comparaison des systemes de conduite traditionnel et en Lyre. Journal Vitis. 33: 197–203.

Klepper, B. (1968). Diurnal pattern of water potential in woody plants. Journal Plant Physiology. 43: 1931–1934.

Klepper, B., Browning, V.D. y Taylor, H.M. (1971). Stem diameter in relation to plant water status. Journal Plant Physiology. 48: 683–685.

Klepper, B., Molz, F.J. y Peterson, C.M. (1973). Temperature effects on radial propagation of water potential in cotton stem bark. Journal Plant Physiology. 52: 565–568.

Knipling, E.B. (1967). Measurement of leaf water potential by the dye method. Journal Ecology. 48: 1038–1041.

Kozlowski, TT, y Winget, CH. (1964). Diurnal and seasonal variation in radii of tree stems. Journal Ecology. 45:149–155.

Kozlowski, T.T. (1967). Diurnal variations in stem diameters of small trees. Journal Botanical Gazette. 128: 60–68.

Kozlowski, T.T. (1971). Growth and development of trees. Vol. II. 1a ed. E.U.A. Academic Press.

Lagarda, M. A. (2007). Plantaciones de alta densidad en nogal pecanero. III Jornada Nacional y I Congreso internacional sobre el cultivo del pecan. 22–23 de Noviembre del 2007.Argentina. Universidad de Buenos Aires.

Lagarda, M. A. (2006) Altas densidades de plantación de nogal. Memoria. XIV Congreso Nacional de nogal. México. Nogatec. pp. 26–32.

Lang, A. 1990. Xylem, phloem and transpiration flows in developing apple fruits. Journal of Experimental Botany. 41: 645–651.

Lappi, J. y Stenberg, P. (1998). Joint effect of angular distribution of radiation and spatial pattern of trees on radiation interception. Jouernal Ecology. 112: 45–51.

Léchaudel, M., Vercambre, G., Lescourret, F., Norman, F. y Génard, M. (2007). An analysis of elastic and plastic fruit growth of mango in response to various assimilates supplies. Journal Tree Physiology. 27: 219–230.

Li, S.H., Huguet, J.G. y Bussi, C. (1989). Irrigation scheduling in a mature orchard using tensiometers and dendrometers. Journal Irrigation and Drainage Systems. 3: 1-12.

Madden, G., Brison, F.R. y McDaniel, J.M. (1975). “Pecans”. In: Handbook of northamerica nut trees. Jaynes (ed.). E.U.A. Northern Nut Growers Association. pp. 163–169.

Marsal, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonés, A. y Girona, J. (2002). Phenology and drought affects the relationship between daily trunk shrinkage and midday stem water potential of peach trees. Journal of Horticultural Science and Biotechnology. 77: 411–417.

McBurney, T., Costigan, P.A. (1984). The relationship betwwenn stem diameter and water potentials in stem young cabbage plants. Journal of Experimental Botany 35 (161): 1787–1793.

McWhorter, G. M., Thomas, J. G. Harris M. K. y Van Cleave H. W. (1977). Pecan insects of Texas. Texas Agricultural Extension Service. Texas A&M University, College Station, Texas. p.16.

Medina M., M.D.C., Samaniego, J.A., Santamaría, J., Faz, R., Herrera, T., Ramírez, M. y González, G. (2000). Alternancia en la producción del nogal pecanero en la Comarca Lagunera de México. Información Técnica Económica Agraria (ITEA). 96 (2): 132–138.

Medina, M. M. y Cano, R. P. (2002). Tecnología de producción en nogal pecanero. Aspectos generales del Nogal Pecanero. Libro técnico 3. 1ra ed. Mexico. CELALA, CIRNOC. INIFAP.

Mellisho, C.D. (2011). Programación del riego deficitario controlado en melocotonero extratemprano con sensores del diámetro del tronco. Tesis Doctoral. España. Universidad Politécnica de Cartagena.

Molz, F. y Klepper, B. (1972). Radial propagation of water potencial in stems. Journal Agronomy 64: 469 – 473.

Montealegre, J.E. y Pabón, J.D., (1999). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo el niño–la niña–oscilación del sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. . Meteorologia Colombiana. 2:7-21.

Moreno, F., Conejero, W., Martín-Palomo, M.J., Girón, I.F. y Torrecillas, A. (2006). Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. Journal agricultural water management 84: 290–294.

Moriana, A. y Fereres, E. (2002). Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. Jurnal Irrigation Science (21):83–90.

Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M. y Fereres, E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. Journal American Society for Horticultural Science. 128: 425–431.

Moriana, A. y Fereres, E. (2004). Establishing reference values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. Journal Acta Horticulturae. 664: 407–412.

Moriana, A., Moreno, F., Girón, I.F., Conejero, W., Ortuño, M.F., Morales, D., Corell, M. y Torrecillas, A. (2011). Seasonal changes of maximum daily shrinkage reference equations for irrigation scheduling in olive trees: influence of fruit load. Agric. Journal Water Manage. 99: 121–127.

Mpelasoka, B.S., Behboudian, M.H. y Green, S.R. (2001). Water use, yield and fruit quality of lysimeter-grown apple trees: responses to deficit irrigation and crop load. Journal Irrigation Science 20:107–113.

Myburg, P.A. (1996). Response of Vitis vinifera L. cv. Barlika/ Ramsey to soil water depletion levels with particular reference to trunk growth parameters. South Africa Journal of Enology and Viticulture. 17:3–14.

Naor, A. (1998). Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field-grown woody species. Journal of Horticultural Science and Biotechnology.73: 431–436

Naor, A. (2000). Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. Journal Acta Horticulturae. 537: 447–454

Naor, A., Gal, Y. y Peres, M. (2006). The inherent variability of water stress indicators in apple, nectarine and pear orchards, and the validity of a leaf-selection procedure for water potential measurements. Journal Irrigation Science. 24:129–135.

Naor, A. y Cohen, S. (2003). Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field – grown apple trees. Journal HortSience. 38: 547–551.

Nortes, P.A., Pérez-Pastor, A., Egea, G., Conejero, W. y Domingo, R. (2005). Comparison of changes in stem diameter and water potential values for detecting water stress in Young almond trees. Journal Agricultural Water Management. 77: 296–307.

Núñez, J. H. (2001). Desarrollo del nogal pecanero. En: El nogal pecanero en sonora. Mexico. Libro técnico No. 3. 1ª ed. México. CECH-INIFAP. pp 23–38

Offenthaler, I., Hietz, P. y Richter, H. (2001). Wood diameter indicates diurnal and long-term patterns of xylem water potential in Norway spruce. Journal Trees 15: 215–221.

Ojeda, D. L., Reyes, A., Ramírez, H., Lagarda, A., Chávez, F. J., Uvalle, J. X., Rivero, R. M. y Romero, L. (2003). Uso eficiente de la fertilización nitrogenada en el cultivo del nogal pecanero. *Carya illinoensis* (Wangenh) K. Koch. 1ra ed. España. Editorial Placido Cuadros. 111pp

Oliveira, N.S. (1996). Comportamento fisiológico de plantas jovens de acerola, carambola, pitanga, cupua- çu, graviola, pupunha e biribá em função da baixa disponibilidade de água no solo. Tésis de Maestría. Brasil. Universidade Federal de Lavras

Ortuño, M.F., Alarcón, J, J., Nicolás, E. y Torrecillas, A. (2004a). Comparison of continuously recorded plant-based water stress indicators for young lemon trees. Journal Plant Soil. 267: 263–270.

Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E.y Torrecillas, A. (2004b). Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. Journal Plant Science 227: 275–280.

Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E. y Torrecillas, A. (2005). Sap flow and trunk diameter fluctuations of young lemon trees under water stress and recovery. Journal Environmental and Experimental Botany. 54: 155–162

Ortuño, M.F., Brito, J.J., García-Orellana, Y., Conejero, W. y Torrecillas, A. (2009a). Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential reference equations for irrigation scheduling of lemon trees. Journal Irrigation Science. 27: 121–127.

Ortuño, M.F., Brito, J.J., Conejero, W., García-Orellana, Y. y Torrecillas, A. (2009b). Using continuously recorded trunk diameter fluctuations for estimating water requirements of lemon trees. Journal Irrigation Science. 27: 271–276

Ortuño, M.F., Conejero, W., Moren, F., Moriana, A., Intrigliolo, D.S., Biel, C., Mellisho, C.D., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Casadesus, J., Bonany, J., y Torrecillas, A. (2010). Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. Journal Agricultural Water Management. 97: 1–11

Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J. y Torrecillas, A. (2006a). Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. Journal Trees-Structure and Function. 20: 1–8.

Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J. y Torrecillas, A. (2006b). Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. Journal Plant and Soil. 279: 229–242.

Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Pérez-Sarmiento, F. Y Torrecillas, A. 2008. Assessment of maximum daily trunk shrinkage signal intensity threshold values for déficit irrigation in lemon trees. Journal Agricultural Water Management. 96: 80–86

Pagá n, E., Pé rez-Pastor, A., Domingo, R., Conesa, M.R., Robles, J.M., Botía, P., García- Oller, I. y Caro, M. (2008). Feasibility study of the maximum daily trunk shrinkage for scheduling mandarin trees irrigation. Italian Journal of Agronomy. 3: 691–692.

Pagán, Elisa. (2012). Uso de Indicadores del Estado Hídrico de la Planta para la Optimización del Riego en Cultivos Leñosos. Tesis doctoral. España. Universidad Politécnica de Cartagena

Pruitt, W. O. (1987). Reference evapotranspiration (ET_O) for California. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. Series title: Bulletin; 1922. Berkeley Agricultural Experiment Station.

Ruiz-Sánchez M.C., Domingo, R., Pérez-Pastor, E. (2007). Daily variations in water relations of apricot trees under different irrigation regimes. Journal Biologia Plantarum 51: 735–740.

Ruiz-Sánchez, M.C. y Girona., J. (1995). "Investigaciones sobre riego deficitario controlado en melocotonero". En: Riego deficitario controlado, Fundamentos y aplicaciones. Vol. I Zapata, M. y Segura, P. (eds). España. Mundi-Prensa. pp. 67–95.

SAGARPA-SIACON (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Sistema de Información Agroalimentario de Consulta). 2013. Informe de estadisticas diciembre de 2013. México.

Salvucci, G.D. (1997). Soil and moisture independent estimation of stagetwo evaporation from potential evaporation and albedo or Surface temperature. Journal Water Resources Research. 33: 111–122.

Sánchez-Blanco, M. J., Torrecillas, A., Del Amor, F. y León, A. (1990). The water relations of Verna lemon trees from flowering to the end of rapid fruit growth. Journal Biologia Plantarum. 32: 357–363.

Sánchez-Blanco, M. J., Alarcón, J.J., Planes, J. y Torrecillas, A. (1994). Differential flood stress resistance of two almond cultivars based on survival, growth and water relations as stress indicators. Journal of Horticultural Science, 69: 947–953.

Sánchez-Cohen, I.; Díaz, P. G.; Estrada, A. J. y Cueto, W. J. (2008b). Incertidumbre climática y toma de decisiones. Consideraciones de riesgo y vulnerabilidad social. Folleto científico Núm. 25. INIFAP CENID RASPA. 55pp.

Santesteban, G., Miranda, C. y Royo, B. (2011) Suitability of pre-dawn and stem water potential as indicators of vineyard water status in cv. Tempranillo. Australian Journal of Grape and Wine Research. 17: 43-51

Sellés, G., Ferreyra, R., Muñoz, I. y Silva, H. (2004). Physiological indicators of plant water status as criteria for irrigation scheduling in table grapes cv. Crimson Seedless, irrigated by drip. Journal Acta Horticulturae. 664:599–605.

Sellin A. (1999). Does pre-dawn water potential reflect conditions of equilibrium in plant and soli water status?. Journal Acta Oecologica. 20(1): 51–59.

Sevanto, S., Vesala, T., Perämäki, M. y Nikinmaa, E. (2003). Sugar transport together with environmental conditions controls time lags between xylem and stem diameter changes.Journal Plant, Cell and Environment. 26:1257–1265.

Sevanto, S., Vesala, T., Perämäki, M., Nikinmaa, E. (2002). Time lags for xylem and stem diameter variations in Scots pine tree. Journal Plant, Cell and Environment. 25: 1071–1077.

Schoch, P.G., L'Hôtel y Brunel, B. (1990). Croissance du diametre de la tige de tomate: Effets du rayonnement et de la temperature nocturne. Journal Agricultural and Forest Meteorology. 50 (3): 229–238.

Schoch, P.G., L'Hôtel, J.C., Dauplé, P., Conos, G. y Fabre, M.J. (1989). Microvariations de diamètre de tige pour le pilotage de l'irrigation. Journal Agronomie. 9: 137–142.

Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D. y Hemingsen, E.A. (1965). Sap pressure in vascular plants. Journal Science. 148: 339–346.

Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D.A., Gurusinghe, S.H., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L.J., Sibbet, S., Snyder, R., Southwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S. y Yeager, J. (1997). Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. Journal HortTechnology. 7: 23–29.

Silva-Contreras, C., Silva-Robledo, H., Sellés-Von Schouwen, G. y Ferreyra-Espada, R. (2008). Relaciones de crecimiento entre el tronco y la baya en Vitis vinifera con uso de sensores de desplazamiento variable. Journal Agrociencia. 42: 903–912.

Simonneau, T., Habib, R., Goutouly, J., Huguet, J. (1993). Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: direct evidence in peach trees. Journal of Experimental Botany. 44: 615–621.

Smith, M.W. (1990). "Pecan nutrition". En: Pecan Husbandry: Challenges and Opportunities. First National Pecan Workshop Proceedings. U.S.D.A. Agricultural Research Service. Georgia, USA. pp. 152–158

Smith, M., Allen, R.G., Monteith, J.L., Perrier, A., Pereira, L. y Segeren, A. (1992). Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop wáter requirements. FAO. Roma. 54 pp.

Sparks, D. (1986). "Pecan". En: CRC Handbook of fruit set and development. Monselise, S. P. (ed). E.U.A. CSC Press. pp. 323–337

Sparks, D. (1992). Pecan cultivars. The orchard´s foundation. Pecan production innovations. E.U.A. 443 pp.

Tenhunen, J.D., Lange, O.L., Jahner, D. (1982). The control by atmospheric factors and water stress of midday stomatal closure in Arbutus unedo growing in a natural macchia. Journal Oecologia. 55: 165–169.

Tognetti, R., Giovannelli, A., Lavini, A., Morelli, G., Fragnito, F. y d'Andria, R. (2009). Assessing environmental controls over conductances through the soil–plant–atmosphere continuum in an experimental olive tree plantation of southern Italy. Journal Agricultural and Forest Meteorology. 149: 1229–1243.

Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil wáter content: measurement in coaxial transmission lines. Journal Water Resources Research. 16: 574–582.

Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P. 1982. Electromagnetic determination of soil wáter content using TDR: I. Aplications to wetting fronts and steep gradients. Soil Science Society of America Journal. 46: 672–678.

Torrecillas, A, Ruiz-Sánchez, MC, Del Amor, F. y León, A. (1988). Seasonal variations on wáter relations of Amygdalus communis L. under drip irrigated and non-irrigated conditions. Journal Plant Soil. 106: 215–220.

Trimmer, W.L. y Hansen, H.J. (1994). Irrigation scheduling. Extension Services of Oregon State University, Washington State University and University of Idaho. Publication PNW 288.

Vasquez, J. C. (2013). Tasa diaria de evapotranspiración de una huerta de nogal pecanero con mediciones de la humedad del suelo. Tesis de licenciatura. México. Departamento de riego y drenaje, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Vélez, J.E., (2004). Programación de riego en cítricos en base a sensores de medida del estado hídrico del suelo y la planta. Tesis Doctoral. España Universidad Politécnica de Valencia

Velez, J.E., Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. (2007). Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. Journal Agricultural Water Management. 90: 197–204.

Villalobos, Mateos F.J., Orgaz, F. y Fereres E. 2002. Fitotecnia: Bases y tecnología de la producción agrícola 1ª ed. España. Mundi-prensa. 496pp.

Villareal, E.H. (1983). Determinación de la evapotranspiración de un nogal joven cultivar Wichita en lisímetro gravimétrico localizado en General Terán, N. L. Tesis de Maestria. Mexico. División de Ciencias Agropecuarias y Marítimas, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Wagenmakers, P. (1994). Light relations in orchard systems. Thesis Ph.D.. Paises bajos. Wageningen Agricultural University. 151pp.

Wang, J., Sammis, T. W., Andales, A. A., Simmons, L. J., Gutschick, V. P. y Miller, D. R. (2007). Crop coefficients of open-canopy pecan orchards. Journal Agricultural Water Management. 88(1-3): 253–262.

Wells, M. L. y Harrison, K. (2007). Water Requirements in: Southeastern Pecan Growers´Handbook. Bulletin 1327. Cooperative Extension Service. The University of Georgia College of Agricultural and Environmental Sciences. pp. 72–75

Westwood, M. N. (1993). Temperate zone pomology. Physiology and culture. 3ra ed. EUA. Timber Press. 536pp.

Williams, L. E. (1994). “Grape”. In: Handbook of environmental physiology of fruit crops. Schaffer, B. y Andersen, P. (ed.). Volumen I. E.U.A. crc press. pp. 86–118.

Williams, L.E. y Araujo, F.J. (2002). Correlations among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in Vitis vinifera. Journal of the American Society for Horticultural Science.127 (3): 448–454.

Wood, B. (1996). Sunlight management. En: Proc. 38th Western Pecan Conference. Proc. Western Pecan Grow. Assoc E.U.A. pp.98–107.

Wood BW (2002). Late nitrogen fertilization in pecan orchards: a review. En: Thirty-sixth West. Pecan Conf. Proc. NMSU-WPGA. E.U.A. pp. 47-59.

Zermeño, A., Cruz, C. I., Munguía, J. P., Catalán, E. A., Campos, S. G. y Cortés J. (2014). Efecto del sistema de riego y clima en la eficiencia del uso de agua de nogal pecanero. Journal Terra Latinoamericana. 32: 23–33.

Zücher, E., Cantiani, M.G., Sorbetti-Guerri, F. y Michel, D. (1998). Tree stem diameters with tide. Journal Nature. 392: 665–666.

Zweifel, R., Item, H. y Häsler, R. (2000). Stem radius cahnges and their relation to stored water in stems of young Norway spruce trees. Journal Trees. 15: 50–57.

COMENUEZ, 2010. http://www.comenuez.org, consultada el 3 Marzo 2010.

FAO. Information System on Water and Agriculture, Aquastat. 2010. En: FAO, página principal [En línea]. Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es [accesado Julio 2015]

FAO-Information System on Water and Agriculture, Aquastat. (2008). En: FAO, página principal [En línea]. Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es [accesado Julio 2015]

Martínez, E.M., Fandiño, M., Cancela, J.J. y Rey, B.J. (2013). Evaluación del estrés del \1CV\2 . Albariño en la DO Rías Baixas. En: Revista Digital Interempresas Industria Vitivinícola. [En Línea]. Universidad de Santiago de Compostela. Disponible en www.interempresas.net/Vitivinicola/Articulos/103889-Evaluacion-delestrés-del-cv_Albarino-en la-DO-Rias-Baixas.html. [Accesado Agosto 2015]