

**APROXIMACIÓN DEL RIEGO EN TIEMPO REAL;
A PARTIR DE VARIABLES AGROCLIMÁTICAS
(CASO DE ESTUDIO NOGAL PECANERO)**

EDUARDO CHÁVEZ RAMÍREZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS AGRARIAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIRECCIÓN DE POSTGRADO

**Director de tesis: PhD. Vicente De Paul Alvarez Reyna
Co-director de tesis: Dr. Guillermo González Cervantes**

Torreón, Coahuila, México

Octubre 2007

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIRECCIÓN DE POSTGRADO

**APROXIMACIÓN DEL RIEGO EN TIEMPO REAL;
A PARTIR DE VARIABLES AGROCLIMÁTICAS
(CASO DE ESTUDIO NOGAL PECANERO)**

TESIS

POR

EDUARDO CHÁVEZ RAMÍREZ

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito parcial para optar por el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AGRARIAS

COMITÉ PARTICULAR

Director de tesis:



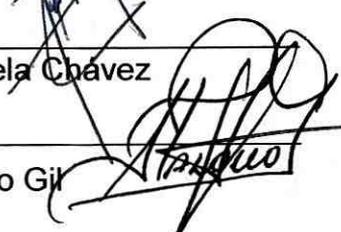
PhD. Vicente De Paul Alvarez Reyna

Co-director:



Dr. Guillermo González Cervantes

Asesor:

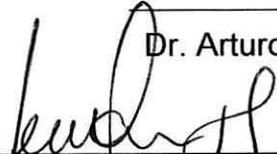


Dr. Esteban Favela Chávez

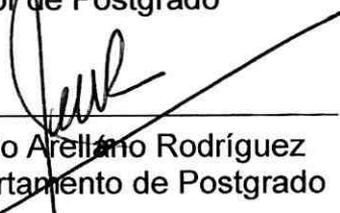
Asesor:



Dr. Arturo Palomo Gil



Dr. Jerónimo Landeros Flores
Director de Postgrado



M.C. Gerardo Arellano Rodríguez
Jefe de Departamento de Postgrado

Torreón, Coahuila, México, Octubre de 2007

AGRADECIMIENTOS

A DÍOS por mantenerme de pie, con fe para lograr los objetivos de la vida.

Agradezco infinitamente a la ALMA MATER Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por brindarme la oportunidad de realizar estudios a nivel Maestría en Ciencias.

Al CENID-RASPA INIFAP, CONACYT, CONACYT-SAGARPA, FUNDACIÓN PRODUCE y PIPNAC por los diversos apoyos otorgados a través de proyectos de investigación con la finalidad de realizar la presente publicación.

El más sincero agradecimiento al Dr. Guillermo González Cervantes por su diligente asesoría y apoyo incondicional para el culmino de esta investigación y por su apreciable amistad.

Al comité particular de asesoría: PhD. Vicente De Paúl Álvarez Reyna, Dr. Arturo Palomo Gil, Dr. Esteban Favela Chávez por sus valiosas aportaciones para este escrito y durante el proceso de M. C.

A los compañeros amigos de Maestría en Ciencias por su apoyo en los trabajos de campo.

Al Departamento de Postgrado de la UAAAN-UL por los diversos apoyos.

DEDICATORIAS

A mis padres, hermanos, amigos y a todos aquellos que hicieron posible el presente trabajo.

A mi esposa e hijas, sin ustedes esto hubiese sido un tanto insípido...

COMPENDIO

Aproximación Del Riego En Tiempo Real;

A Partir De Variables Agroclimáticas

(Caso De Estudio Nogal Pecanero)

En el nogal pecanero, el agua es el principal factor de manejo que permite incrementar la productividad del cultivo. En virtud de lo antes mencionado, el objetivo de esta investigación fue determinar el riego en tiempo real como aproximación de una agricultura de precisión, considerando la variabilidad climática integrada a tres modelos que determinan la evapotranspiración, utilizando información de las características de tipo de suelo y de cultivo en dos subregiones de la Cuenca del Río Nazas. Además, se determinó la productividad del nogal pecanero a partir de: la producción de nuez y crecimiento anual de madera, bajo diferentes sistemas de riego y suelo. En ello se utilizaron herramientas de precisión como el GPS, análisis de imagen y estaciones climáticas telemétricas en red. Así mismo se consideraron tres ecuaciones que estiman la evapotranspiración de referencia (ET_0) las cuales fueron comparadas localmente contra la ET_0 obtenida mediante el método del tanque evaporímetro tipo A. La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se estimó continuamente como componente esencial en el balance de humedad en el suelo, y así determinar y suministrar la demanda hídrica del nogal pecanero en tiempo real. Los resultados muestran que el método Penman-Monteith FAO presentó la mejor correlación con la evapotranspiración de referencia y por

consecuencia determina mejor la evapotranspiración del cultivo, seguida de Doorenbos-Pruitt y finalmente Hargreaves-Samani. Estos modelos, indican un consumo hídrico en nogal pecanero ligeramente superior para la cuenca baja con respecto a la cuenca media del nazas. Los resultados en productividad de los nogales aplicando manejo diferente de suelo y agua, indican que fueron ligeramente superiores en las zonas donde se observó mayor área foliar. Sin embargo, el análisis de varianza entre tratamientos para la producción de nuez y porcentaje de almendra indican que no existe diferencia significativa entre ellos. Esto indica que un año de observación para este tipo de investigación es insuficiente, lo que sugiere que el manejo de suelo y agua requiere de mayor tiempo para manifestar su efecto.

Palabras clave. Evapotranspiración, crecimiento de madera, nogal pecanero.

ABSTRACT

The Real Time Irrigation Approximation; From Agroclimatic Variables (Walnut Study Case)

In the walnut production water is the main management to increase the crop productivity. According with the before mentioned the purpose of this research was to determine the real irrigation time as approximation of an agriculture precision, considering the climatic variability. Three evapotranspiration methods were used to determine evapotranspiration using crop and soil characteristics of the two subregions of the Nazas river watershed. Additionately, was evaluated the walnut productivity and annual wood growth under different soils and irrigation systems using precision tools such as global position systems, image analysis and telemetric climatic stations in red. Three equations were used to estimate reference evapotranspiration (ET_0) which were compared versus the evapotranspiration obtained from the pan evaporation method. The crop evapotranspiration (ET_c) was estimated continuously as an essential component of the soil moisture balance to determine the walnut water requirements at real time. The results show that Penman-Monteith FAO had the best correlation with the ET_0 , and as a consequence to determine the ET_c , follow by Doorenbos-Pruitt and finally Hargreaves-Samani. The models showed walnut water requirements higher at the low area of the watershed versus the medium area of the watershed. The variance analysis of data did not found difference for walnut

productivity and almond percent. This study suggest that in perennial crops to evaluate in better way the effects of the treatments imposed are required several years.

Keyword. Evapotranspiration, pecan.

Índice

| | pág |
|---|-----|
| COMPENDIO | iv |
| ABSTRACT | vi |
| I. Introducción | 1 |
| II. Revisión de Literatura | 5 |
| 2.1. La disponibilidad de los recursos hídricos en el contexto global | 5 |
| 2.1.1. Disponibilidad y uso de los recursos hídricos en México | 7 |
| 2.1.2. El agua y la agricultura | 12 |
| 2.2. El nogal pecanero y su medio ambiente natural | 14 |
| 2.2.1. El nogal en Estado Unidos de Norte América y México | 15 |
| 2.2.2. El habitat del nogal pecanero | 17 |
| 2.2.3. La producción de nuez pecanera | 19 |
| 2.3. Factores que influyen en la productividad del nogal pecanero | 20 |
| 2.3.1. Factores genéticos | 21 |
| 2.3.2 Factores climáticos | 22 |
| 2.3.3. Factores de manejo | 24 |
| 2.4. Respuesta del nogal pecanero a la disponibilidad de agua | 31 |
| 2.5. Técnicas y herramientas de precisión que impulsan al incremento de la productividad del agua | 34 |
| 2.5.1. Estaciones agroclimáticas, telemetría y percepción remota | 35 |
| 2.5.2. Sistema de posicionamiento global | 39 |
| 2.5.2.1. Fuentes de error en los GPS | 39 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5.2.2. El GPS en la agricultura | 41 |
| 2.5.3. Análisis de imagen | 42 |
| III. Objetivos del Estudio | 47 |
| IV. Materiales y Métodos | 48 |
| 4.1. Localización del área de estudio | 48 |
| 4.2. Distribución de estaciones agroclimáticas telemétricas y la aproximación del riego en tiempo real en la cuenca del nazas | 52 |
| 4.2.1. Estaciones agro climáticas telemétricas | 52 |
| 4.2.2. Procedimiento para la programación del riego en tiempo real | 56 |
| 4.3. Diseño del modulo de riego y factores de estudio | 64 |
| 4.3.1. Sistema de labranza | 66 |
| 4.3.2. Los sistemas de riego | 67 |
| V. Resultados y Discusiones | 74 |
| 5.1. Consumo hídrico del nogal pecanero y la aproximación del riego en tiempo real, en la cuenca del nazas | 74 |
| 5.1.1. Evapotranspiración de referencia | 74 |
| 5.1.1.1. Correlación de los métodos utilizados en la determinación de la evapotranspiración de referencia | 81 |
| 5.1.2. Evapotranspiración del cultivo (Consumo hídrico del nogal) | 85 |
| 5.1.3 Precipitación pluvial efectiva | 93 |
| 5.1.4. Aproximación a una programación del riego en tiempo real | 95 |
| 5.1.4.1. Método del balance de agua en el suelo | 95 |
| 5.1.4.2. Criterios a considerar en programación de riego en tiempo real | 97 |
| 5.1.4.3. Sistematización de criterios para el riego en tiempo real | 106 |

| | |
|---|------------|
| 5.2. El modulo de riego en la huerta de la UAAAN-UL | 111 |
| 5.2.1. El GPS y la Georeferenciación de la nogalera | 111 |
| 5.2.2. Crecimiento anual de madera | 114 |
| 5.2.3. Productividad del nogal pecanero | 116 |
| VI. Conclusiones | 119 |
| VII. Recomendaciones | 121 |
| VIII. Literatura Citada | 122 |
| IX. Nomenclatura | 140 |

Índice de cuadros

| Cuadro | | pág. |
|--------|---|------|
| 1 | Clasificación de la disponibilidad natural media de agua | 8 |
| 2 | Uso del agua en diferentes sectores | 12 |
| 3 | Rangos de suficiencia de nutrimentos para el nogal pecanero | 28 |
| 4 | Datos climáticos esenciales medibles, requeridos por los métodos de evapotranspiración de referencia. | 57 |
| 5 | Ecuaciones para cálculo de K_c en nogal pecanero | 61 |
| 6 | Análisis estadístico para ET_0 en la cuenca baja, durante los periodos de máxima demanda. | 83 |
| 7 | Balance de agua del suelo y cálculo de fecha y lámina de riego | 110 |

Índice de figuras

| Figura | | pág. |
|--------|---|------|
| 1 | Distribución global del agua | 6 |
| 2 | Clasificación de la disponibilidad natural media de agua | 9 |
| 3 | Precipitación media mensual histórica 1941-2002 | 10 |
| 4 | Origen geográfico de la nuez pecanera | 14 |
| 5 | Distribución geográfica del nogal nativo en EE.UU y México | 15 |
| 6 | Localización geográfica de la producción de nuez pecanera en México. | 17 |
| 7 | Potencial hídrico del la hoja del nogal durante el periodo comprendido antes del inicio en el llenado del fruto hasta su maduración, con tres intervalos de riego | 33 |
| 8 | Potencial hídrico del fruto del nogal durante el periodo comprendido antes del inicio en el llenado del fruto hasta su maduración, con tres intervalos de riego | 34 |
| 9 | Componentes atmosféricos relacionados con la evapotranspiración | 37 |
| 10 | Morfología de cuatro huertas de nogal pecanero | 10 |
| 11 | Localización geográfica de la región hidrológica 36 al norte de México | 49 |
| 12 | La presa Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco en la cuenca del río nazas y sus | 50 |
| 13 | Subregiones de la cuenca del río nazas | 51 |
| 14 | Estaciones climáticas automatizas en red | 54 |
| 15 | Localización de las estaciones climáticas automatizadas | 55 |
| 16 | Diseño espacial de tratamientos en la nogalera UAAAN-UL | 65 |

| | | |
|----|---|-----|
| 17 | Labranza intensiva y de conservación | 66 |
| 18 | El riego por aspersión y labranza de conservación | 68 |
| 19 | Riego por microaspersión y labranza de conservación | 69 |
| 20 | El sistema de riego por goteo cintilla y labranza intensiva | 70 |
| 21 | GPS Trimble, con precisión de centímetros | 72 |
| 22 | Evapotranspiración de referencia, mediante el método de Penman-Monteih FAO | 76 |
| 23 | Evapotranspiración de referencia, mediante el método de Doorenbos y Pruitt | 78 |
| 24 | Evapotranspiración de referencia, mediante el método de Hargreaves y Samani | 80 |
| 25 | Diagrama de dispersión entre ET_0 del tanque y ET_0 de tres ecuaciones, para la cuenca baja del nazas | 84 |
| 26 | Coeficiente de cultivo para nogal (de 30 años) en función de DGC | 86 |
| 27 | Evapotranspiración real de nogal en la parte baja y media del nazas, aplicando el método de Penman-Monteih FAO | 88 |
| 28 | Evapotranspiración real de nogal en la parte baja y media del nazas, aplicando el método de Doorenbos-Pruitt | 90 |
| 29 | Evapotranspiración real de nogal en la parte baja y media del nazas, aplicando el método de Hargreaves y Samani | 92 |
| 30 | Precipitación para el periodo 2005 | 94 |
| 31 | Constantes de la humedad del suelo | 99 |
| 32 | Abatimiento de humedad del suelo permisible en diferentes periodos fenológicos de nogal | 104 |
| 33 | Perfil esquemático de humedad del suelo para la programación del riego | 108 |
| 34 | Levantamiento topográfico de la huerta de nogal UAAAN-UL | 112 |
| 35 | Diseño del modulo de riego huerta UAAAN-UL hortofoto (2007) | 114 |

| | | |
|----|--|-----|
| 36 | Crecimiento anual de madera en árboles de nogal pecanero correspondiente al año agrícola 2006 bajo diferentes tratamientos | 115 |
| 37 | Crecimiento anual de madera en árboles de nogal correspondiente al año agrícola 2004, 2005 y 2006 | 116 |
| 38 | Productividad promedio del nogal bajo diferentes tratamientos | 118 |

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el interés económico, social y ambiental por el agua en los diferentes componentes del ciclo hidrológico para los diversos usos, se ha incrementado de manera acelerada tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. Un uso relevante, particularmente en las zonas semiáridas y áridas, se refiere al sector agropecuario con un consumo de más del 80 por ciento del agua disponible a nivel mundial, mientras que en México se consume el 77.8 por ciento del agua que se obtiene de ríos, lagos y acuíferos (FAO/AQUASTAT, 2006; Becerra *et al.*, 2006).

En las regiones áridas y semiáridas de México la situación del agua para la agricultura es crítica. Algunas de las causas de esta condición son baja disponibilidad del agua de lluvia y manejo deficiente del riego, donde la eficiencia global es inferior al 51 por ciento, esto ha contribuido al incremento de sobreexplotación de los acuíferos subterráneos (González *et al.*, 2004a; Mejía *et al.*, 2002; CNA, 2004). Esta situación desde el punto de vista técnico obliga a plantear estrategias que permitan optimizar el uso y manejo de agua para el riego, e incrementar su productividad en este sector.

Una de las estrategias importante a considerar es la implementación de las nuevas tecnologías, que implícitamente incorporan técnicas y métodos cuantitativos que permitan tomar decisiones adecuadas en la programación del riego en tiempo real a nivel parcelario (Gutiérrez, *et al.*, 2005; Ruiz y Ojeda,

2007; Chávez *et al.*, 2006) hacia una agricultura de precisión. Sin embargo, para que estas tecnologías se consideren pertinentes, deben dar respuesta a algunos cuestionamientos básicos del riego: fecha y cantidad de agua (cuando y cuanto) y con una aproximación de una agricultura de precisión.

Para dar respuestas a estas interrogantes destaca la cuantificación del requerimiento hídrico diario por superficie de cultivo que tiene su origen en el proceso de evapotranspiración (López *et al.*, 1991; Allen *et al.*, 1998; Jiyane y Zermeño, 2003). La medición de este proceso pueda darse mediante métodos directos (gravimétrico y lisímetro) e indirectos (modelos matemáticos), estos últimos requieren de la medición ambiental, para ello se utilizan, instrumentos como los sensores y controles electrónicos integrados en una estación agro climática, los cuales constituyen mejores sistemas para monitorear en forma más precisa y casi continua el tiempo atmosférico. Además, las variables climáticas integradas a modelos matemáticos dentro de un paquete informático en red permiten mejorar el procesamiento y uso de esta información de vital importancia en los procesos de interés agrícola a nivel regional y nacional, con fines de proporcionar la demanda hídrica de los cultivos en los tiempos óptimos requeridos (Ojeda, 1999; Tijerina, 2000).¹

El Nogal pecanero (*Carya illinoensis Koch*), por su rentabilidad económica es uno de los cultivos comercialmente explotado en las zonas áridas y semiáridas del Norte de país, pero que demanda volúmenes de agua importantes y contrasta con la fragilidad de estos ecosistemas. Actualmente existe en el norte

del país una superficie superior a las 70 mil hectáreas (Godoy y López, 2000; SAGARPA, 2006). En este cultivo el uso y manejo del agua mediante las diferentes formas de distribuir y aplicar este recurso se han utilizado diferentes sistemas de riego (gravedad, aspersion y goteo). El agua es el factor determinante para la explotación comercial de la nuez y es uno de los principales factores que determina la alternancia del cultivo, lo que impacta en el rendimiento y calidad del fruto. Cuando se presenta una deficiencia de agua, la primera función fisiológica afectada es el crecimiento celular, se inhibe el transporte de nutrimentos, fotosíntesis, translocación de fotosintatos dentro de la planta ocasionado por estrés hídrico, y por consecuencia disminución de brotes fructíferos y finalmente un reducción en cantidad y calidad de almendra (Herrera, 1990; Sparks, 1995; Godoy y López, 2000; Godoy *et al.*, 2005).

Tradicionalmente en las huertas de nogal pecanero del país, la programación del riego se realiza a través de un calendario fijo "receta de riego" fundamentado en una lámina total anual dividida en ocho riegos durante el ciclo reproductivo del nogal. Esta programación del riego no considera el desfase en el tiempo de las variables ambientales que se suscitan en el entorno del cultivo. Sin embargo, la aplicación del riego en este cultivo debe ser lo suficientemente dinámica y lo mas cercana a la realidad para compensar las variaciones agroclimáticas (Godoy *et al.*, 2000; Godoy, 2002). La particularidad principal de la programación del riego es predecir la cantidad de agua requerida y el momento optimo de su aplicación a lo largo del ciclo fenológico, considerando

factores de cultivo, climáticos, edáficos y de manejo (De Juan, 1993; Ojeda, 1999).

En esta investigación la finalidad fue diseñar el riego en tiempo real como aproximación de una agricultura de precisión, utilizando estaciones climáticas y comunicadas por telemetría, además de considerar los diferentes sistemas de riego que se utilizan en huertos de nogal pecanero del país.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. La disponibilidad de los recursos hídricos en el contexto global

Durante la pasada década, aumento notablemente la sensibilización y preocupación social por la necesidad de desarrollar métodos más sostenibles para la gestión uso eficiente de los recursos hídricos, y también la necesidad de proteger los ecosistemas donde se encuentran dichos recursos. Sin embargo, a pesar de la sensibilización acerca de este recurso; actualmente, las mejores prácticas y conocimientos científicos disponibles raramente se aplican a la toma de decisiones de manera adecuada. Mientras tanto, siguen incrementándose las presiones sobre nuestros recursos hídricos (ONU, 2006).

El agua a nivel global existe de manera natural bajo distintas formas y en distintos lugares: en el aire, en la superficie, bajo el suelo y en los océanos (Figura 1). Aunque una buena parte del agua dulce está “almacenada”, es más importante evaluar los flujos renovables anuales de agua teniendo en cuenta dónde y cómo se desplazan a lo largo del ciclo hidrológico.

La disponibilidad de agua en los continentes depende fuertemente de la circulación del aire en la tierra. Las variaciones en velocidad y dirección de estas corrientes obedecen a su vez a las diferentes cantidades de calor disponible en la superficie terrestre. De acuerdo al balance de energía, la atmósfera transporta aire caliente hacia los polos y aire frío hacia el ecuador (Eduards, 2000).

Agua total global

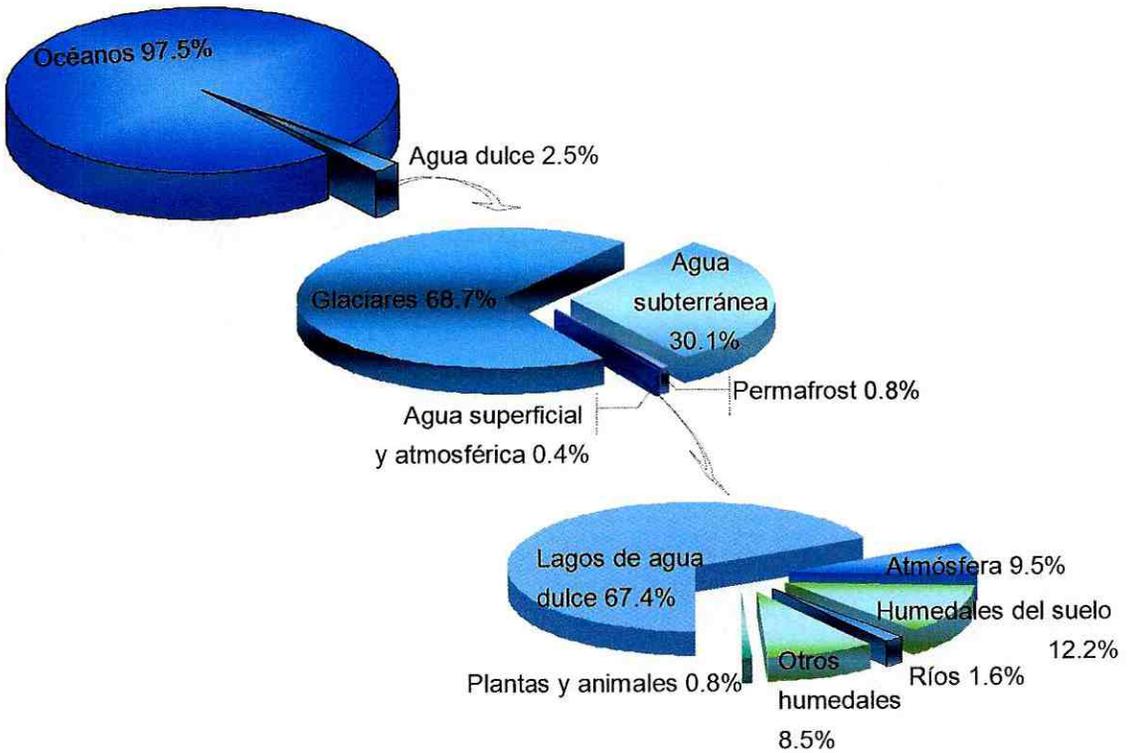


Figura 1. Distribución global del agua (Adaptado de datos de Shiklomanov y Rodda, 2003).

El esquema moderno del ciclo hidrológico es un ejemplo de la agrupación de elementos como parte de un modelo conceptual que ha nacido de la ecohidrología, una nueva disciplina que hace hincapié en las relaciones y etapas más importantes que comparten los sistemas hidrológicos y ecológicos (Zalewski *et al.*, 1997). Este modelo conceptual tiene en cuenta los flujos de toda el agua y trayectos que ésta sigue, a la vez que distingue entre dos componentes: “agua azul” y “agua verde”. El agua azul está directamente

relacionada con los ecosistemas acuáticos y fluyen en masas de agua superficial y en acuíferos. El agua verde abastece los ecosistemas terrestres y la agricultura de secano a través de la humedad del suelo y también es agua verde la que se evapora de las plantas y superficies acuáticas a la atmósfera en forma de vapor de agua (Falkenmark y Rockström, 2004).

El ciclo hidrológico de la Tierra es el mecanismo global que transfiere el agua desde los océanos a la superficie y de la superficie, o subsuperficie, y las plantas a la atmósfera que envuelve nuestro planeta. Los principales procesos que componen el ciclo hidrológico natural son: precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración. La actividad del ser humano (asentamientos, industria y desarrollos agrícolas) puede alterar los componentes del ciclo natural a través de desviaciones del uso de la tierra así como del uso, reutilización y vertido de residuos a las vías naturales del agua superficial y subterránea (Sánchez, 2005).

2.1.1. Disponibilidad y uso de los recursos hídricos en México

La cantidad de agua disponible varía considerablemente de un país a otro y la población que se asienta en cada uno de ellos no necesariamente corresponde a esta disponibilidad. Un indicador ampliamente utilizado en el mundo para detectar posibles problemas de agua es el que se refiere a la disponibilidad natural media per cápita (FAO/AQUASTAT, 2005). Este indicador clasifica a las regiones y países de acuerdo al cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de la disponibilidad natural media de agua (Shiklomanov y Rodda, 2003).

| Disponibilidad natural media per capita (m ³ /hab/año) | Clasificación |
|---|---------------------|
| Menor a 1 000 | Extremadamente baja |
| 1 001 a 2 000 | Muy baja |
| 2 001 a 5 000 | Baja |
| 5 001 a 10 000 | Media |
| 10 001 a 20 000 | Alta |
| Mas de 20 000 | Muy alta |

En la clasificación mundial, México está considerado como un país de disponibilidad baja de agua. Este problema de baja disponibilidad de agua en el país, es atribuido a la irregular distribución espacial y temporal de lluvias, y al incremento en su población. En 1950 la disponibilidad de media de agua era de 18,035 m³/hab/año disminuyendo a tan solo 4,416 m³/hab/año en el 2006 (CNA, 2007). La Organización Mundial de la Salud establece como limite para el desarrollo armónico de la sociedad, una disponibilidad de 2,500 metros cúbicos por persona por año, para satisfacer todas sus necesidades primarias, la producción agropecuaria y de bienes y servicios (Sánchez, 2005).

En México destacan dos grandes zonas de disponibilidad natural de agua, el sureste y norte, centro y noroeste (Figura 2). Donde la zona sureste es 7

veces mayor que en el resto del país. Sin embargo, en la zona norte, centro y noroeste se asienta el 77% de la población, donde se genera el 85% del producto interno bruto (PIB) y sólo se tiene el 32% de la disponibilidad natural media. Además esta zona a diferencia del promedio nacional de 15%, utiliza más de 40% de la disponibilidad media de agua, lo que se considera por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como fuerte presión sobre el recurso hídrico. Cabe aclarar que la disponibilidad natural media de agua considera únicamente el agua renovable, es decir, el agua de lluvia que se transforma en escurrimiento de agua superficial y en recarga de acuíferos (CNA, 2003, 2004 y 2007).

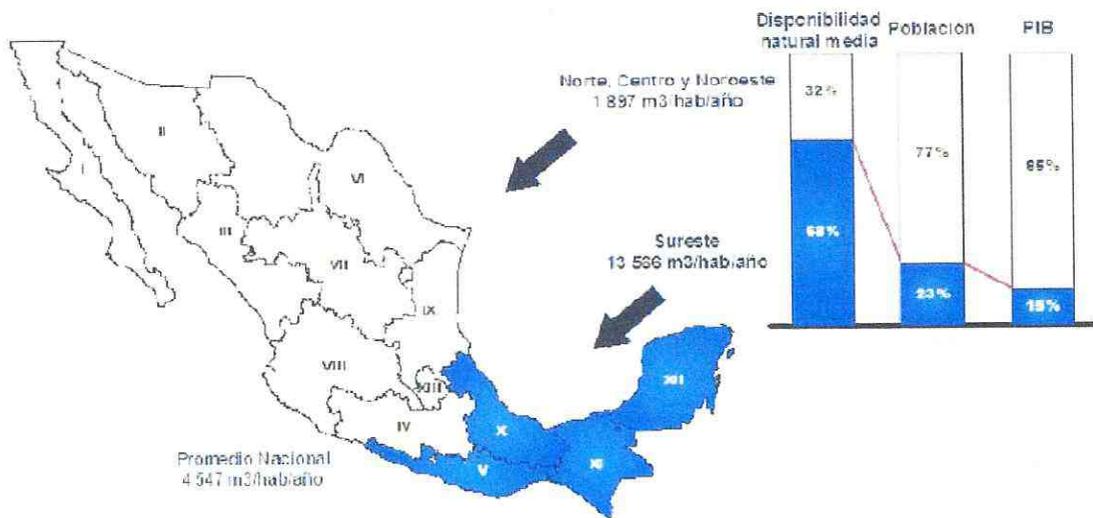


Figura 2. Clasificación de la disponibilidad natural media de agua (Adaptado de CNA, 2003.)

La precipitación promedio histórica (1941-2002) es de 771 mm al año a nivel nacional, presentándose alrededor del 70% durante el verano (entre junio y septiembre) a excepción de la península de Baja California, el resto del año la precipitación es escasa (Figura 3). Sin embargo, poco más del 70% del agua que llueve en el país se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el resto escurre por los ríos o arroyos o se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos (CNA, 2004).

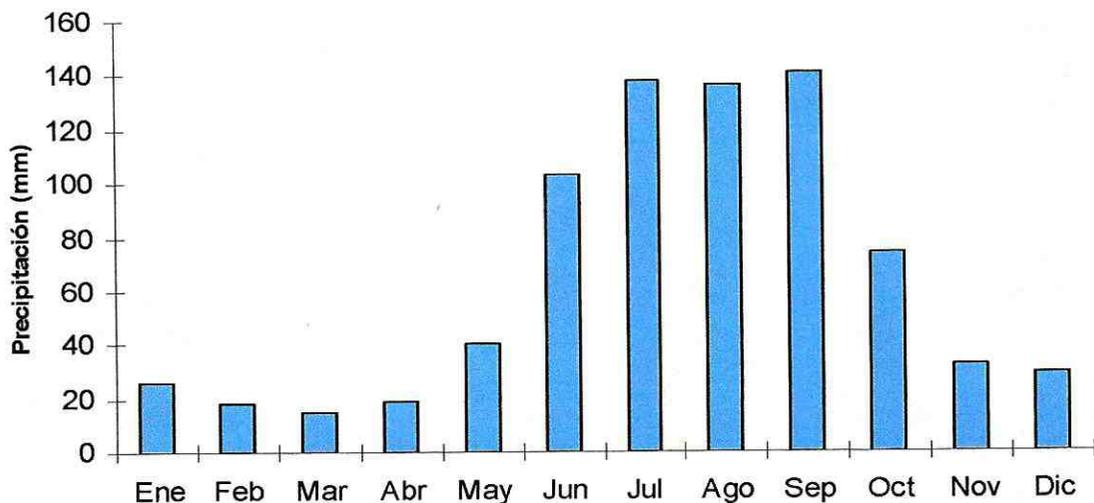


Figura 3. Precipitación media mensual histórica 1941-2002 (Adaptado de Unidad del Servicio Meteorológico Nacional. SGT. CNA, 2003).

Para fines de administración del agua, el país se ha dividido en 653 unidades hidrogeológicas o acuíferos. Actualmente 102 acuíferos, localizados principalmente al norte del país se encuentran sobreexplotados, es decir, la

extracción es mayor a su recarga. Desde 1975 ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados: 32 en 1975, 80 en 1985, 97 en 2001, y 102 en el 2003. De los acuíferos sobreexplotados se extrae aproximadamente el 57% del agua subterránea para todos los usos. Debido a la sobreexplotación, la reserva de agua subterránea se está minando a un ritmo acelerado de cerca de 6 km³ por año. Además, existen 17 acuíferos con problemas de intrusión salina ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz. Entre éstos se encuentran Maneadero y San Quintín en Baja California, Santo Domingo en Baja California Sur; Caborca, Costa de Hermosillo y San José de Guaymas en Sonora (CNA, 2007; Sánchez, 2005).

A nivel nacional el sector agropecuario (cultivos de riego y ganadería) es el principal consumidor del agua dulce (Cuadro 2). El uso del agua en la agricultura y su impacto en los recursos hídricos son factores complejos y dinámicos, sobre todo si se consideran en el contexto de los efectos del cambio y variabilidad del clima en los sistemas agrícolas. Los cultivos producidos con agua de riego acaparan una importante y creciente porción de la producción agrícola, de las exportaciones de productos del campo y del empleo para este sector, pero constituye un creciente foco de preocupación por la sobreexplotación de los recursos hídricos. Además, la creciente incidencia y gravedad de las sequías, variabilidad y cambio climático aumentan la presión sobre el agro y los recursos hídricos (CNA, 2004; FAO, 2007).

Cuadro 2. Uso del agua en diferentes sectores (CNA, 2004).

| Uso | Origen | Origen | Volumen total | Porcentaje de extracción |
|--|-------------|-------------|---------------|--------------------------|
| | Superficial | Subterráneo | | |
| Agropecuario | 38.7 | 18.7 | 57.4 | 76 |
| Abastecimiento Público (Incluye Industria Conectada a la Red) | 3.9 | 6.8 | 10.7 | 14 |
| Industria Autoabastecida (Incluye Termoeléctricas) | 5.6 | 1.7 | 7.3 | 10 |
| Total Nacional | 48.2 | 27.2 | 75.40 | 100 |

2.1.2. El agua y la agricultura

La problemática del agua en México, en términos de cantidad y calidad, hace que debamos plantear su uso y manejo desde una perspectiva integral. La cuenca es la unidad básica que permite analizar los procesos ambientales generados por decisiones en materia de uso y manejo de agua, de suelo y vegetación. El incremento constante en las necesidades de los diferentes sectores sociales que utilizan el agua, su escasez relativa y las desigualdades para tener acceso a ella, generan una mayor competencia entre sus usuarios (Martínez *et al.*, 2003; Sánchez *et al.*, 2006).

A nivel global y nacional, el empleo del agua y su gestión han sido un factor esencial para elevar la productividad de la agricultura y asegurar una producción previsible. El agua es esencial para aprovechar el potencial de la tierra y para permitir que las variedades mejoradas tanto de plantas como de animales utilicen plenamente los demás factores de producción que elevan los rendimientos. Al incrementar la productividad, la gestión sostenible del agua, especialmente si va unida a una gestión adecuada del suelo, contribuye a asegurar una producción mejor tanto para el consumo directo como para el comercio, favoreciendo así la producción de los excedentes económicos necesarios para elevar las economías nacionales (ONU, 2006; Villaman *et al.*, 2001).

La mejor utilización del agua en la agricultura de riego es fundamental para afrontar las situaciones previstas de escasez de agua. La mejora en la utilización o productividad del agua se entiende frecuentemente en términos de obtener la mayor cantidad de cultivos posible por volumen de agua "más cultivos por gota". Es posible que los agricultores prudentes con respecto al dinero prefieran fijarse como objetivo el máximo de ingreso por unidad de agua "más pesos por gota"; por consiguiente, en un sentido amplio, el incremento de la productividad en la agricultura puede dar lugar a mayores beneficios por cada unidad de agua tomada de los recursos hídricos naturales (ONU, 2006).

2.2. El nogal pecanero y su medio ambiente natural

El nogal pecanero pertenece a la familia de las Juglandaceae y su nombre científico es *Carya illinoensis* Koch. Este cultivo, es originario del norte de México y sureste de los Estados Unidos de Norteamérica (Figura 4). En 1541, el explorador español Álvaro Nuño Cabeza de Vaca registra en sus "Relaciones" a estos árboles como nogales y a sus frutos como nueces, aludiendo la semejanza que tienen con las nueces y nogales de Castilla, en España (Brisson, 1976; Medina y Cano, 2002). En la actualidad el nogal es cultivado en numerosas áreas para su aprovechamiento comercial en la parte Sur de los Estados Unidos y el Norte de la República Mexicana (McEachern, 1990; Puente *et al.*, 2002).

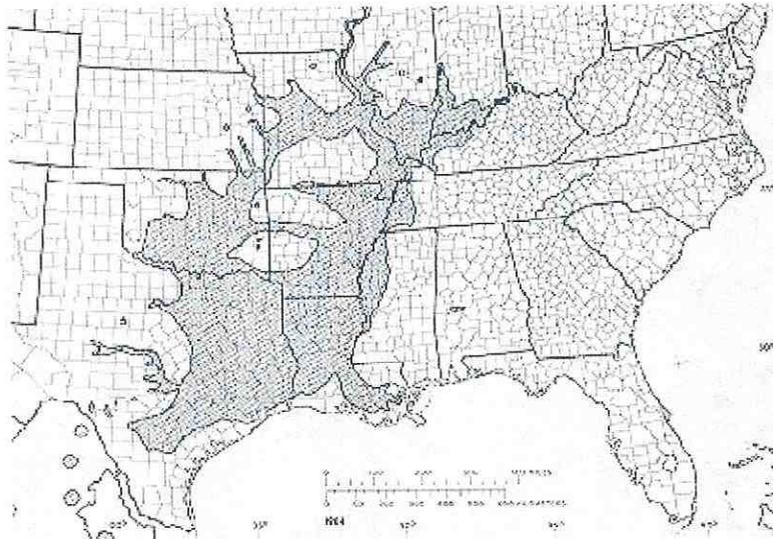


Figura 4. Origen geográfico de la nuez pecanera (Adaptado de Peterson, 2003).

2.2.1. El nogal en Estado Unidos de Norte América y México

En los Estados Unidos de Norte América las variedades nativas se localizan principalmente en los estados de Kansas, Louisiana, Missouri, Oklahoma y Texas (Figura 5) (Toole, 1965; Peterson, 2003). Las primeras plantaciones comerciales se iniciaron a partir de 1871, con árboles de pie franco, localizadas principalmente en los estados de Georgia, Texas, Nuevo México, Oklahoma, Arizona, Louisiana, Alabama y Mississippi. En este país la industria de la nuez encarcelada se ha desarrollado en los últimos 100 años, las plantaciones, la cosecha y el procesamiento de nuez están altamente tecnificados. El gobierno de los Estados Unidos proporciona a los productores un servicio de información de alta calidad sobre los mercados, y es responsable del mejoramiento de nuevas variedades con mejor resistencia a enfermedades, cáscara más delgada y mayores rendimientos (Puente *et al.*, 2002).

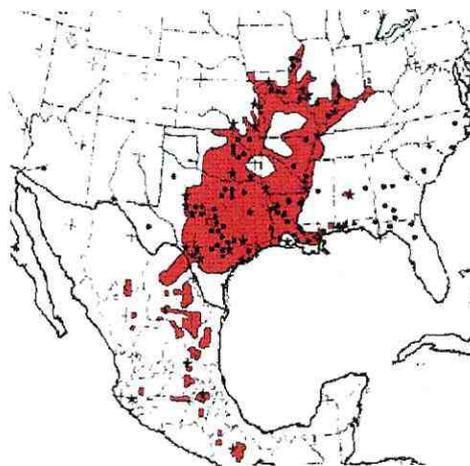


Figura 5. Distribución geográfica del nogal nativo en EE.UU y México (Adaptado de Harris, 2006).

En México, la distribución del nogal silvestre se encuentra habitualmente aislada en 14 estados, siendo los centros más importantes de asociaciones nativas los estados de Chihuahua, Nuevo León y Coahuila. La introducción pionera de plantaciones comerciales en el país se hizo en 1904, en el estado de Nuevo León. En el estado de Chihuahua las primeras huertas comerciales se establecieron en el año de 1946, mientras que en la Comarca Lagunera se inició la explotación del nogal a partir de 1948. A partir de esos años, la superficie plantada con nogales se ha incrementado notablemente, no sin antes haber experimentado grandes problemas y fracasos como consecuencia del establecimiento de huertas en suelos inapropiados y la introducción de un sinnúmero de variedades sin estudios previos de adaptación (Puente *et al.*, 2002). Actualmente en México se encuentran establecida una superficie de 60 mil hectáreas, las cuales se localizan principalmente al norte del país en los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Durango y Sonora (Figura 6) que representan el 97 por ciento del área sembrada y cosechada y el 95 por ciento de la producción nacional (SAGARPA, 2000).

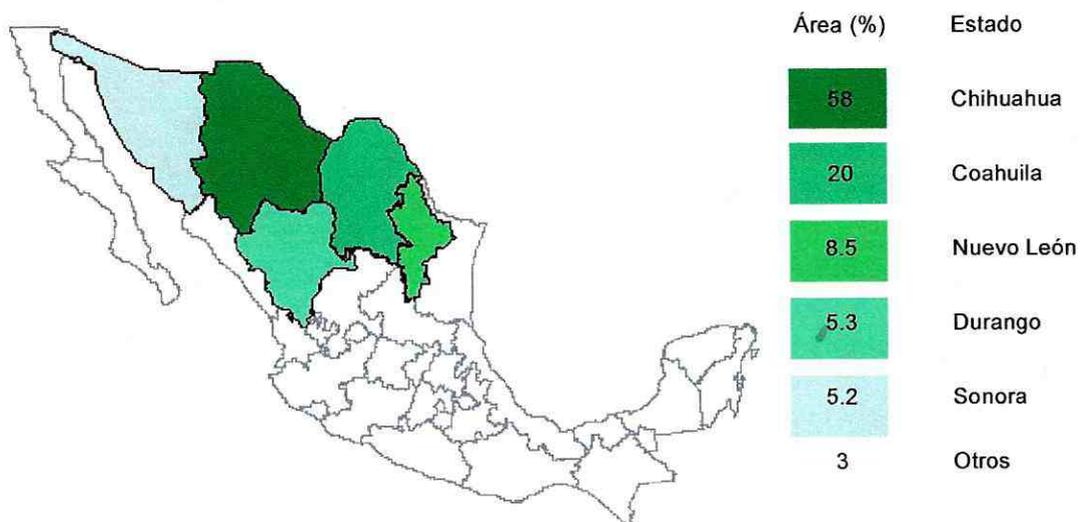


Figura 6. Localización geográfica de la producción de nuez pecanera en México.

2.2.2. El habitat del nogal pecanero

En Estados Unidos de Norte América, el nogal pecanero en su ambiente natural se desarrolla en clima húmedo, donde la precipitación anual mínima promedio es de 760 milímetros y la máxima de 2010 milímetros. Durante el periodo de crecimiento se presentan lluvias hasta 510 milímetros. Las temperaturas en el verano oscilan en un rango promedio anual de 27 °C, con extremas de 41 a 46 °C; mientras que durante el invierno las temperaturas medias oscilan entre 10 a -1 °C, con extremas de -18 a -29 °C (Osburn, 1954; Adams y Thielges, 1977).

En México, actualmente el clima predominante en las principales zonas productoras de nuez pecanera se clasifica como semiárido a árido. La zona

centro y sureste de chihuahua presenta temperatura media anual entre 18 a 22 °C, temperatura extrema máxima de 42 °C y la mínima de -13 °C, con precipitaciones promedio anual de 300 milímetros. En la comarca lagunera Coahuila-Durango presenta temperatura media anual de 20 °C, temperaturas extremas máxima de hasta 48 °C y mínima de hasta -6 °C, con régimen de precipitación media anual de 250 milímetros. En la costa de Hermosillo en Sonora, la temperatura media anual es de 23 °C, temperaturas extremas de 50 °C y mínima de -2 °C, presentando un patrón de lluvia media anual de 140 milímetros.

En Estados Unidos el nogal pecanero nativo crece comúnmente en suelos de textura arcillo-arenosos bien drenados no sujetos a inundaciones prolongadas. Sin embargo, aparece en los suelos de textura pesada, donde se limita a los suelos aluviales de origen reciente. Su mejor desarrollo se presenta en laderas de montañas y suelos planos bien drenados. Rara vez crece en puntos bajos y/o suelos planos de textura arcillosa mal drenados (Nelson, 1965; Adams y Thielges, 1977). Estos suelos se clasifican generalmente en las órdenes Entisols, Inceptisols y Alfisols (Loucks y Keen, 1973).

En el ámbito de explotación comercial para nogales mejorados, los costos relacionados con la determinación del tipo de suelo y sitios más adecuados para el establecimiento de un huerto, es una inversión a largo plazo que depende en gran medida de la toma de decisión acertada para su establecimiento en un sitio determinado, por lo que el error en esta fase será

notable en un futuro lejano. Sin embargo, es difícil definir un suelo ideal, considerando que los nogales han desarrollado satisfactoriamente en un amplio rango de suelos. No obstante debe considerarse algunas observaciones características del suelo antes del establecimiento de huerto, como son: textura, profundidad, drenaje, fertilidad y salinidad (Núñez, 2001).

La salinidad del suelo es uno de varios parámetros importantes que determinan la productividad del nogal, esta no debe exceder valores de $2.0 \text{ mmhos cm}^{-1}$ de conductividad eléctrica en la pasta de saturación y no debe presentar más de 10 meq por litro de sodio. Superior a estos valores el rendimiento y desarrollo del nogal se reduce considerablemente (Miyamoto *et al.*, 1986; Miyamoto, 2002).

2.2.3. La producción de nuez pecanera

En los últimos años la producción comercial de nuez pecanera a nivel mundial se estima en alrededor de 210 mil toneladas anuales; de las cuales los principales productores son los Estados Unidos de Norteamérica (72 %) y México (25 %), otros productores menores son Australia, Sudáfrica, Israel, Brasil, Argentina, Perú y Egipto (Herrera y Clevenger, 1996; Puente *et al.*, 2002).

En México la producción de nuez pecanera ha registrado un incremento paulatino, al pasar de 57,873 toneladas en el año 2000 a 68,222 en el 2005.

Las cuales se concentran principalmente al norte del país, en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Sonora (SAGARPA, 2006).

La nuez pecanera, recientemente ha generado interés en la industria alimenticia saludable por su alta capacidad antioxidante gracias a su contenido en vitamina E que previene el envejecimiento y alto contenido de aceite insaturados Omega 3 y Omega 6 que reduce los niveles de colesterol en la sangre (Almario *et al.*, 2001). En el 2005 investigadores del Instituto Politécnico Nacional elaboraron un tratamiento con aceite de nuez que permite contrarrestar enfermedades cardiovasculares y diabetes mellitas (Notimex, 2005). A si también, recientemente el interés para el sector ecológico gracias a los servicios ambientales por captura de carbono en el proceso fotosintético del nogal pecanero (Reed, 2006).

2.3. Factores que influyen en la productividad del nogal pecanero

La productividad del nogal pecanero es resultado de la interacción de tiempo y espacio de factores genéticos (portainjerto – variedad-edad), clima (horas frío, unidades calor, humedad relativa, precipitación pluvial) y manejo (sistema de riego, manejo del suelo, fertilización, plagas, enfermedades y poda). De los anteriores, el factor limitante será el que determine el potencial productivo del cultivo. Es decir, la producción del nogal no se incrementará en respuesta a la fertilización mientras exista un deficiente control de plagas o insuficiente agua de riego.

2.3.1. Factores genéticos

Genéticamente el nogal es una planta monoica, en consecuencia tiene flores femeninas y masculinas separadas en el mismo árbol. Sin embargo, existen variedades de nogal de comportamiento dicogámico (protándrico y protogínico); es decir, en una plantación de nogal es necesario establecer dos o más variedades con el fin de asegurar una óptima polinización y por lo tanto una mayor producción y calidad del fruto (Yates y Sparks, 1990; Brison, 1976; Medden y Tisdale, 1975).

Otro de los principales problemas hereditarios que presentan los nogales, es la alternancia o producción irregular que oscila en altos y bajos rendimientos de nuez. Se considera que este fenómeno natural está regulado principalmente por la sensibilidad de los nogales a las reservas de asimilados (carbohidratos) y con participación de ciertas hormonas, además si existe un estrés hídrico en los árboles la alternancia tiende a incrementar (Wood *et al.*, 2003; Godoy *et al.*, 2000; Santamaría *et al.*, 2002; Charles *et al.*, 2007). Por ello, uno de los aspectos importantes en la selección de variedades mejoradas o de origen nativo es la capacidad productiva de éstas para una región determinada, así como también la calidad del fruto y estabilidad de la producción a través de los años. Una forma de evaluar esta capacidad productiva en las diferentes variedades es considerando la producción de nuez en un periodo mínimo de nueve años consecutivos de evaluación, con la finalidad de obtener un índice

de alternancia. Mientras menor sea este índice, indicara mayor estabilidad en la producción a través del tiempo (Arreola *et al.*, 2002).

Diversos estudios al respecto, coinciden que las variedades más adecuadas y utilizadas para su establecimiento y explotación comercial en la mayoría de las zonas productoras de México, es la variedad western, wichita y Cape fear con menores índices de alternancia (Lagarda *et al.*, 1998; Puente *et al.*, 2002; Orona *et al.*, 2004).

2.3.2 Factores climáticos

El clima fluctúa naturalmente en todas las escalas temporales, desde entre días y años hasta entre decenios y siglos (cambio climático). La variabilidad del clima es el mayor problema para la agricultura actual; la variabilidad natural de las lluvias, de la temperatura y de otras condiciones del clima es el principal factor que explica la variabilidad de la producción agrícola de un año a otro (Mendelsohn y Nordhaus, 1999; FAO, 2001). Los principales factores climáticos que influyen en el desarrollo del nogal y su producción de nuez son:

Temperatura

Los nogales se comportan adecuadamente donde la temperatura media en verano es de 25 a 30 °C, sin variación amplia entre el día y la noche, con un

promedio de 26.7 °C. Además, para los meses más fríos requiere temperaturas promedio de entre 7.2 y 12.3 °C (Wolstenholme, 1979).

Durante el periodo de abril a octubre (ciclo reproductivo) el nogal requiere de un mínimo de 4500 – 5000 unidades calor tomando como punto crítico 10 °C; de ello depende la completa maduración del fruto. Para el cultivar western, se requieren 4532 ± 214 unidades caloríficas, considerando como punto crítico 4.4°C (Lagarda, 1983). Por otra parte, durante el periodo de invierno (dormancia) el nogal tiene un requerimiento de frío mínimo de de 400 horas con punto crítico de 7.2 °C (Wolstenholme, 1979). Sin embargo, se ha observado que se requieren de 400 – 800 horas-frío dependiendo de las variedades para inicien su brotación (Lagarda, 1983). Si los requerimientos anteriores no se cumplen adecuadamente, el cultivo será limitado para su desarrollo y producción de nuez de calidad.

Humedad relativa

Cuando la humedad relativa durante el periodo de polinización es superior al 80% limita la polinización efectiva debido a que las anteras no abren para liberar el polen; además esta promueve el desarrollo de enfermedades fungosas que atacan al follaje (Brison, 1976). Además, si antes del periodo de cosecha (apertura del ruezno) se presenta humedad relativa alta contribuye a incrementar los porcentajes de germinación de la nuez. Cultivares de ruezno

grueso son los más susceptibles ya que esta característica impide su apertura (Medina y Cano, 2002).

Precipitación pluvial

El nogal pecanero a pesar de su rusticidad, es muy sensible a la sequía, siendo impropio para ser cultivado en las tierras de secano y de naturaleza seca. Para que su cultivo sea posible necesita de precipitaciones anuales mínimas de 700 milímetros, siendo de 1000-1200 milímetros para explotaciones intensivas. Si la pluviométrica es insuficiente o está irregularmente repartida, habrá que recurrir al riego para conseguir un desarrollo normal de los árboles y una adecuada producción de nuez (Adams y Thielges, 1977; Chávez, 2004).

2.3.3. Factores de manejo

En las huertas de nogal pecanero es importante considerar el efecto de los factores de manejo y su interacción con las condiciones edáficas sobre la producción y calidad de nuez. Los factores de manejo son:

Establecimiento del cultivo

El establecimiento de un huerto de nogal, requiere de una adecuada planeación; es decir, disminuir al máximo o eliminar con anticipación condiciones desfavorables que afecten la productividad del cultivo, y en un

futuro se puede esperar con cierta seguridad los máximos beneficios. En principio debe considerarse las condiciones climáticas y de suelo, así como la fuente de abastecimiento de agua, pensando a un futuro lejano. Posteriormente, seleccionar las variedades adecuadas y sanas para un plantación cruzada en dirección del viento para determinada región (Núñez, 2001). Actualmente, un punto importante a considerar es la cantidad de árboles por hectárea en plantaciones de alta densidad, considerando alta densidad a plantaciones con arreglos menores a 10 metros de distancia entre árbol y otro (Arreola *et al.*, 2006). Estos sistemas de plantación de alta densidad se presentan como una estrategia de incrementar los rendimientos por unidad de superficie y calidad de nuez.

Poda

Los objetivos de la poda del nogal son controlar el tamaño de los árboles, mantener el vigor y producción en ramas fructíferas, sustituir las ramas viejas menos productivas por otras de renuevo y eliminar las ramas agotadas, secas o mal situadas con el fin de que la luz llegue a todas las partes del árbol. Con esto se incrementa la eficiencia en la utilización de la luz solar en las etapas iniciales del cultivo y cuando entra en la etapa productiva. La mejor época de poda es el periodo de invierno, después de la caída de las hojas (McEachern, 1997; Arreola *et al.*, 2006).

La poda se divide en dos tipos; de formación y selectiva.

La poda de formación se realiza en árboles recién plantados y hasta el cuarto año, con el propósito de balancear la cantidad de brotes a desarrollar con el número de raíces y además inicia la estructura permanente del árbol. El árbol joven se debe encaminar a desarrollar ramas fuertes, bien espaciadas y con ángulos superiores a 50° con respecto del líder (McEachern, 1997). Durante el primer año del árbol se selecciona el brote apical más vigoroso para formar el líder central y se despuntan los brotes que encuentren en los 20 centímetros más cercanos al brote seleccionado y el resto se mantiene para proteger al tronco. En el segundo año se corta el líder central a $1/3$ de su tamaño y se remueven las ramas más próximas al líder (20 centímetros), el resto de las ramas en el árbol únicamente se despuntan. Para el tercero y cuarto año durante el invierno, se poda al líder a un tercio de su crecimiento anual y remover o despuntar las ramas próximas al líder (20 centímetros) según su competencia con este, mientras que las ramas laterales con diámetro igual o mayor que el líder se deben eliminar desde la base del tronco y el resto debe cortarse a un cuarto de su crecimiento anual (Schaller, 1981; Herrera, 1983).

La poda selectiva de ramas se realiza en árboles adultos con la finalidad de incrementar la penetración de la luz solar en el interior de la copa, se induce el desarrollo de brotes fructíferos sobre las ramas permanentes, y se reduce el tamaño de los árboles (Worley, 1991). En huertas con problemas de sombreo, la producción y calidad de nuez disminuyen y aumenta la alternancia

(Andersen, 1994; Herrera, 1996). Por ello, para incrementar la penetración de la luz y reactivar la productividad de estos árboles, se sugiere la poda de aclareo de ramas en forma selectiva. La rama que se seleccione para eliminarse, que sea la que más sombreo ocasiona, o sea la más alta y céntrica; de esta manera se provoca una ventana en el centro de la copa del árbol (Worley, 1991).

En general, la actuación de la poda en el nogal, no tiene la finalidad de obtener frutos de mayor calibre, sino el propósito de lograr producciones mayores y el mantenimiento de éstas en el tiempo.

Fertilización

El nogal requiere de los 16 elementos esenciales para el crecimiento de las plantas. Estos elementos se obtienen del suelo, agua y atmósfera de manera natural, otros se compensan por medio de aplicaciones vía foliar, al suelo o al agua de riego. Estos nutrimentos son indispensables en el desarrollo y productividad del nogal, y se clasifican en función de la cantidad en que son requeridos (Smith *et al.*, 1985; Medina, 2002).

Una de las alternativas importantes para conocer la situación nutricional en el árbol es análisis de tejido foliar y análisis visual de los árboles. El análisis foliar se basa en que cada nutrimento tiene un rango de concentración dentro del cual el cultivo obtiene su óptimo desarrollo y son los rangos óptimos o intervalos

de suficiencia (Cuadro 3) (NRCS, 2000). En el análisis foliar se toman, en el mes junio y julio (de seis a ocho semanas después de la floración), el par de foliolos centrales de la hoja compuesta, del sector medio de brotes de la temporada y de hojas distribuidas alrededor del árbol hasta tener mínimo 80 foliolos por muestra; ó sea, por grupo de árboles con características similares que serán analizados (Medina y Chávez, 1999). El análisis foliar es una valiosa herramienta, más aún si se complementa con un análisis de suelo.

Cuadro 3. Rangos de suficiencia de nutrimentos para el nogal pecanero (¹Jones *et al.*, 1991; ²Stockton, 1985).

| Nutrimentos | Unidades de concentración | Área productora | |
|-------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| | | Georgia, EUA. ¹ | Texas, EUA. ² |
| Nitrogeno | % m.s. | 2.70-3.50 | 2.00-3.00 |
| Fosforo | % m.s. | 0.14-0.30 | 0.12-0.30 |
| Potasio | % m.s. | 1.25-2.50 | 0.75-1.50 |
| Calcio | % m.s. | 1.00-1.70 | 0.70-3.50 |
| Magnesio | % m.s. | 0.30-0.60 | 0.18-0.60 |
| Azufre | % m.s. | <0.20 | 0.19 |
| Fierro | ppm | 50-300 | 58-300 |
| Cobre | ppm | 6-30 | 10-30 |
| Zinc | ppm | 50-100 | 50-300 |
| Manganeso | ppm | 200-500 | 100-1000 |
| Boro | ppm | 15-50 | 20-285 |

Las zonas productoras del norte de México presentan deficiencias de nitrógeno, potasio, magnesio, manganeso, zinc y cobre principalmente, mismos que tendrán que ser abastecidos para el buen funcionamiento del cultivo (Núñez y Valdez, 1991). Sin embargo, el nitrógeno y el zinc son los nutrimentos a los que presenta mayor respuesta el crecimiento del nogal, y su producción y calidad de nuez a través de los años (Medina, 1991; Favela *et al.*, 2000).

Organismos dañinos

Las plagas y enfermedades representan factores limitantes de la productividad del nogal pecanero.

Las plagas de mayor importancia económica son el gusano barrenador del ruezno, *Cydia caryana*, y el complejo de pulgones formado por el pulgón amarillo *Monelliopsis pecanis*, el pulgón amarillo de márgenes negros, *Monellia caryella*, y el pulgón negro, *Melanocallis caryaefoliae*. Otras plagas de importancia secundaria son el gusano barrenador de la nuez, *Acrobasis nuxvorella*, el gusano telarañero, *Hyphantria cunea* y las chinches, *Nezara viridula* y *Euchistus servus*. Además, recientemente se han detectado árboles de nogal atacados por el barrenador ambrosial de la madera, *Euplatypus segnis* (Nava y Morales, 2005). Los daños mayores que provocan la disminución en la calidad de la nuez son causados por el gusano barrenador del ruezno (larva), el daño radica frecuentemente en la destrucción todas las nuececillas de un racimo (Maltos, 2004; Harris *et al.*, 2005). Por su parte los pulgones,

básicamente disminuyen el volumen y peso de la nuez; este efecto indirecto en la disminución de la calidad es causado por la extracción hasta en un 17 % de azúcares y hasta en un 21% de almidones, así como a la reducción hasta en un 70% de la fotosíntesis debida a la fumagina, causada por el hongo saprófito *Capnodium sp* ya que utiliza como sustrato la mielecilla generada por el pulgón (Martínez, 2002; Martínez *et al.*, 2002).

Otro agente dañino de importancia económica para este cultivo es la enfermedad denominada “pudrición texana” o pudrición de la raíz asociada al hongo *Phymatotrichum omnivorum Shear*. El hongo es nativo del Norte de México y Sur de los Estados Unidos y se encuentra distribuido en una amplia gama de suelo. Los árboles que presentan esta enfermedad expresan características como: menor crecimiento, reducción en su rendimiento de nuez, muerte y transmisión de la enfermedad a los árboles contiguos (Percy, 1983; Samaniego y Herrera, 2003).

El agua de riego

Ante la baja disponibilidad de agua de lluvia en las zonas productoras de nuez pecanera, es necesario considerar el riego con fines de aportar agua a este cultivo como forma de favorecer su crecimiento y explotación comercial. En condiciones extremas de falta de agua, los nogales sufren serios daños, tales como amarillamiento prematuro del follaje y caída de hojas de ramas terminales. El agua es el principal factor de manejo que permite alcanzar una

alta eficiencia fotosintética de las hojas, y en consecuencia, una mayor calidad de nuez. La disponibilidad del agua para este cultivo esta en función de la cantidad y oportunidad con la que se suministra al suelo (Godoy *et al.*, 2000, Godoy *et al.*, 2005).

2.4. Respuesta del nogal pecanero a la disponibilidad de agua

En las zonas productoras de México, la productividad del nogal pecanero en las condiciones de clima de estas zonas, un rendimiento promedio de 2 a 2.2 toneladas por hectárea es el más cercano al limite superior que el árbol puede producir con una almendra aceptable; por arriba de ese valor, el porcentaje de almendra y el tamaño de la nuez invariablemente disminuye, incrementándose significativamente la presencia de nuez germinada (Sparks, 1996; Godoy *et al.*, 2000).

En el nogal pecanero, el manejo del agua es el principal factor que permite alcanzar una alta eficiencia fotosintética de las hojas y, en consecuencia, incrementa la productividad y calidad de la nuez. La disponibilidad del agua para el cultivo esta en función de la cantidad y oportunidad con la que se suministra al suelo, cuando existen condiciones optimas de humedad o agua presente en el suelo fácilmente aprovechable por este cultivo de acuerdo a las etapas fenológicas la productividad y calidad de almendra es excelente (Godoy y Huitrón, 1998; Godoy y López, 2000). Una de las etapas que ha tomado mayor importancia en investigaciones recientes relacionados al manejo del

agua es durante el desarrollo del fruto, donde se ha encontrado que en condiciones optimas de humedad en el suelo disminuye significativamente la germinación de la nuez y ruezno pegado e incrementa el peso seco y calidad de almendra; por lo contrario, si se presenta un estrés hídrico durante el llenado de la almendra provoca germinación y falta de llenado de la nuez (Sparks, 1995; Godoy y Huitrón, 1998; Godoy y López, 2000).

Una de las formas de medir el impacto hídrico en la productividad de nogal pecanero, es mediante indicadores (diferentes órganos) de la planta. Una investigación al respecto realizada en la Comarca Lagunera (Godoy *et al.*, 2005), con el objetivo de evaluar el comportamiento hídrico de la hoja y fruto, así como su relación con algunos parámetros de crecimiento y calidad de fruto, con tres intervalos de riego en nogal pecanero durante el desarrollo de almendra. Donde los resultados de las mediciones del potencial hídrico realizadas mediante una bomba de presión tipo Scholander, indicaron que el potencial hídrico de la hoja (Figura 7) muestra inconsistencias en la respuestas o sensibilidad a los intervalos de riego, mostrando así, de una manera no muy clara que las condiciones de suelo con mayor contenido de humedad (intervalos de riego mas cortos), fueron ligeramente favorables para el cultivo. Por otra parte, las variaciones del potencial hídrico del fruto (Figura 8) presentan una mejor correspondencia a la disponibilidad del agua presente en el suelo. Esta investigación coincide con otras investigaciones realizadas por Herrera (1990), Godoy y Huitrón (1998) y Godoy y López (2000) quienes señalan que durante el llenado de almendra el agua del suelo debe estar más disponible que en otras

etapas fenológicas del nogal, recomendando acortar los intervalos de riego tradicionales (mayores a 21 días) a siete días.

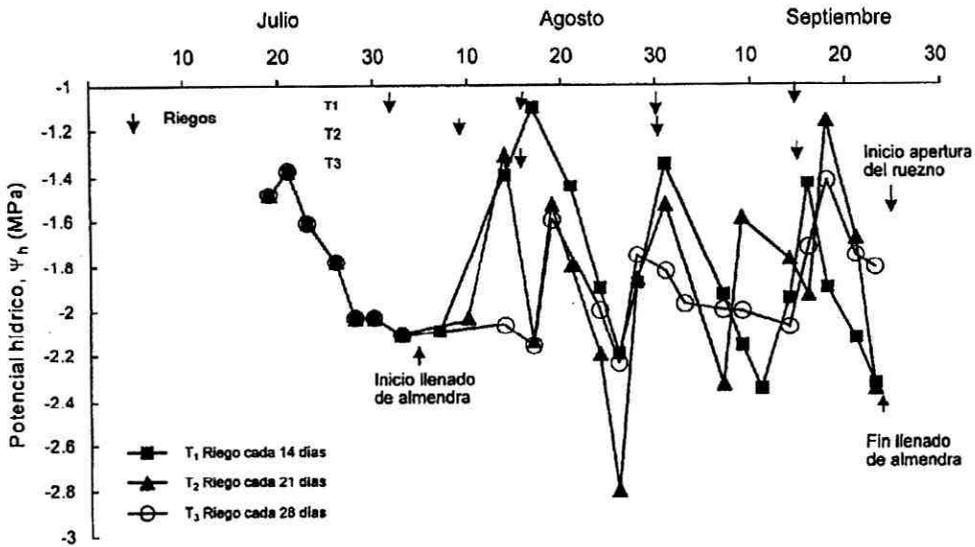


Figura 7. Potencial hídrico de la hoja del nogal durante el periodo comprendido antes del inicio en el llenado del fruto hasta su maduración, con tres intervalos de riego (Adaptado de Godoy *et al.*, 2005).

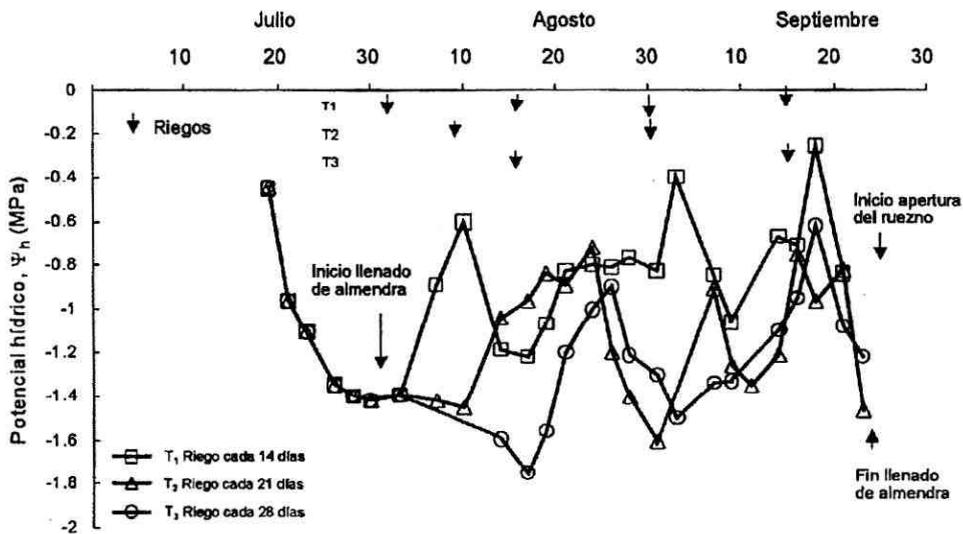


Figura 8. Potencial hídrico del fruto del nogal durante el periodo comprendido antes del inicio en el llenado del fruto hasta su maduración, con tres intervalos de riego (Adaptado de Godoy *et al.*, 2005).

2.5. Técnicas y herramientas de precisión que impulsan al incremento de la productividad del agua

Actualmente la agricultura de precisión es la disciplina que emplea una serie de tecnologías avanzadas que buscan incrementar la eficiencia en el manejo y el uso de los recursos naturales durante la producción de cultivos. Este tipo de agricultura se lleva a cabo a través del uso de herramientas tradicionales como la selección genética, fertilización, control integral de plagas y sistemas de riego, entre otras, a las que también se han incorporado tecnologías avanzadas como la telemetría y la percepción remota, los sistemas de posicionamiento

global, los sistemas de información geográfica y el análisis de imagen (Harmel *et al.*, 2004; Gutiérrez y García, 2004; González *et al.*, 2004a). Entre las ventajas más importantes de las herramientas emergentes se encuentran el mejor aprovechamiento del agua de riego, la disminución del uso de agroquímicos, el incremento en productividad y rentabilidad de los cultivos, reducción de contaminantes y, en consecuencia, reducción de costos de producción (Zhang *et al.*, 2002; Whelan *et al.*, 2003; González, 2004).

El objetivo final de esta disciplina es ofrecer lo que el cultivo necesita en el momento y cantidad óptimos, es decir, eliminar el enfoque tradicional de recomendaciones globales que no consideran los cambios que se presentan por la variabilidad específica de cada sitio.

2.5.1. Estaciones agroclimáticas, telemetría y percepción remota

En la agricultura el ambiente climático en el cual se desarrollan los cultivos es un factor importante que afecta su productividad. Por ello, las estaciones meteorológicas o agroclimáticas se han utilizado como una herramienta que permite medir y estudiar la variación de los fenómenos meteorológicos que intervienen en el desarrollo de los cultivos (Ojeda, 1999).

Actualmente existen dos tipos de estaciones agroclimáticas, las cuales se clasifican de acuerdo a las formas de adquisición y almacenamiento de datos (Ochoa, 2006);

1.- Las estaciones meteorológicas convencionales, equipadas con instrumentos meteorológicos manuales, que sirven para medir las variables climáticas más representativas.

2.-Las estaciones meteorológicas telemétricas o automáticas, se les llama así debido a que funcionan a través de sistemas remotos de adquisición de datos por medio de sensores. Este tipo de herramienta inicialmente se utilizaban en aplicaciones de control y alertas en meteorología, protección ambiental, y desde hace algunas décadas para diversas aplicaciones en la agricultura.

Las estaciones agroclimáticas telemétricas son utilizadas en aplicaciones agrícolas para calcular la evapotranspiración y pronóstico del riego en tiempo real, con la finalidad de aplicar la cantidad necesaria de agua de riego y en el momento óptimo (Mundo y Martínez, 2002; Villaman *et al.*, 2001; Ruiz y Ojeda, 2007). Otras aplicaciones importantes es detectar la aparición de heladas y la dirección desde donde se propagan hacia los cultivos. También se utilizan para determinar el instante óptimo para realizar la prevención de plagas, considerando las temperaturas acumuladas que favorecen la multiplicación de insectos dañinos a los cultivos (Ojeda, 1999; Ochoa, 2006).

El diseño y cantidad de sensores instalados en las estaciones agroclimáticas depende definitivamente de las metas para las cuales se utilizara dicha tecnología. Normalmente la función de la estación determinara el punto estratégico de instalación dentro del área de cultivo y altura de colocación de

los sensores electrónicos en base a estándares propuestos por organizaciones internacionales, así como la calibración de los mismos. Normalmente las estaciones utilizadas para la agricultura, con fines de manejo del agua, deben equiparse con sensores que midan; la temperatura del aire, radiación solar, velocidad del aire y humedad relativa. Componentes meteorológicas que definen la evapotranspiración (Figura 9) (Hillel, 1991; Allen *et al.*, 1998; Ojeda *et al.*, 2006).

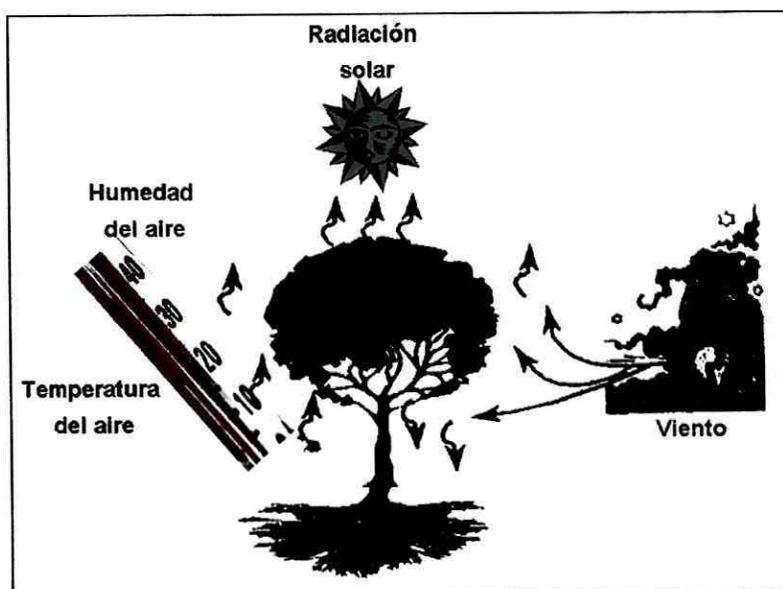


Figura 9. Componentes atmosféricos relacionados con la evapotranspiración (Adaptado de Ojeda, 1999).

Los avances tecnológicos recientes en sensores, controladores y microprocesadores que monitorean y almacenan valores de variables meteorológicas a intervalos de tiempo predefinidos de acuerdo a la

programación en la memoria de cada estación, permiten utilizar los sistemas de telemetría por ondas de radio o teléfono para el envío de la información meteorológica a una computadora para su procesamiento posterior y determinar la evapotranspiración o bien otras variables de importancia agrícola (Ojeda, 1999).

La telemetría es un conjunto de procedimientos utilizados para medir magnitudes físicas y químicas desde una posición distante hasta el lugar donde se producen los fenómenos de interés. Los equipos de telemetría obtienen la información mediante transductores que transforman las magnitudes físicas a medir en señales eléctricas equivalentes, que a su vez son enviadas al punto de observación mediante señales hertzianas para su recolección y análisis (Gutiérrez *et al.*, 2006; Ochoa, 2006).

Por su parte, la detección o percepción remota, es otra herramienta que permite calcular la evapotranspiración de los cultivos, con fines de manejo del agua. Mediante la percepción remota se puede obtener información sobre un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de los datos obtenidos con un sensor remoto; es decir, un sensor que no tiene contacto físico con el objeto a medir. Comprende además un conjunto de técnicas tales como la fotografía aérea multiespectral, fotogrametría, radar y detección electrónica de ondas electromagnéticas radiadas por la superficie de la tierra (Bermejo y Meneses, 2004; Ibáñez y Caselles, 1999).

2.5.2. Sistema de posicionamiento global

El Sistema de Posicionamiento Global mediante satélites (GPS: Global Positioning System) es un sistema de localización, diseñado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con fines militares para proporcionar estimaciones precisas de posición, velocidad y tiempo; operativo desde 1995 utiliza conjuntamente una red de computadoras y una constelación de 24 satélites artificiales para determinar por triangulación, la altitud, longitud y latitud de cualquier objeto en la superficie terrestre (Herring, 1996; Fernández y Seco, 1997).

En el ámbito civil y alegando razones de seguridad sólo se permite el uso de un subconjunto degradado de señales GPS. Sin embargo la comunidad civil ha encontrado alternativas para obtener una excelente precisión en la localización mediante las denominadas técnicas diferenciales (DGPS) (Herring, 1996). Gracias a ellas las aplicaciones civiles han experimentado un gran crecimiento y actualmente existen más de 70 fabricantes de receptores GPS.

2.5.2.1. Fuentes de error en los GPS

A continuación se describen las fuentes de error que en la actualidad afectan de forma significativa a las medidas realizadas con el GPS, según el departamento de defensa de los Estados Unidos de Norte América (2001):

Perturbación ionosférica. La ionosfera está formada por una capa de partículas cargadas eléctricamente que modifican la velocidad de las señales de radio que la atraviesan.

Fenómenos meteorológicos. En la troposfera, cuna de los fenómenos meteorológicos, el vapor de agua afecta a las señales electromagnéticas disminuyendo su velocidad. Los errores generados son similares en magnitud a los causados por la ionosfera, pero su corrección es prácticamente imposible.

Imprecisión en los relojes. Los relojes atómicos de los satélites presentan ligeras desviaciones a pesar de su cuidadoso ajuste y control; lo mismo sucede con los relojes de los receptores.

Interferencias eléctricas imprevistas. Las interferencias eléctricas pueden ocasionar correlaciones erróneas de los códigos pseudo-aleatorios o un redondeo inadecuado en el cálculo de una órbita. Si el error es grande resulta fácil detectarlo, pero no sucede lo mismo cuando las desviaciones son pequeñas y causan errores de hasta un metro.

Error multisenda. Las señales transmitidas desde los satélites pueden sufrir reflexiones antes de alcanzar el receptor. Los receptores modernos emplean técnicas avanzadas de proceso de señal y antenas de diseño especial para minimizar este error, que resulta muy difícil de modelar al ser dependiente del entorno donde se ubique la antena GPS.

Interferencia "Disponibilidad Selectiva S/A". Constituye la mayor fuente de error y es introducida deliberadamente por el estamento militar.

Topología receptor-satélite. Los receptores deben considerar la geometría receptor-satélites visibles utilizada en el cálculo de distancias, ya que una determinada configuración espacial puede aumentar o disminuir la precisión de las medidas. Los receptores más avanzados utilizan un factor multiplicativo que modifica el error de medición de la distancia (dilución de la precisión geométrica)

2.5.2.2. El GPS en la agricultura

Aproximadamente en el año 1989, se comenzó a utilizar en la agricultura de EE.UU. esta tecnología, constituyéndose en una herramienta fundamental para la obtención de información precisa con bajo costo. La navegación por satélite puede ayudar a los agricultores a incrementar su producción y a mejorar la eficiencia de sus métodos de cultivo. El sistema GPS ubicados en los tractores y en otros vehículos agrícolas, junto con sofisticados sistemas de información geográficos utiliza varios métodos para recoger datos sobre las condiciones del suelo, humedad, temperatura y muchas otras variables (AgGPS, 2003). Con esta información, el sistema puede controlar muchos aspectos de la operación agrícola; la intensidad de siembra por terreno, la aplicación de fertilizantes e insecticidas, y los patrones de riego (Gutiérrez *et al.*, 2006).

2.5.3. Análisis de imagen

El análisis de imagen digital es una técnica que permite extraer información cuantitativa de una imagen a diferentes dimensiones, microscópica y macroscópica. El desarrollo de la informática en los últimos años ha propiciado que cada vez sea más común el trabajar con imágenes digitalizadas. Las ventajas de la imagen digital frente a la analógica vienen dadas por la facilidad de procesar dichas imágenes para obtener información; reconocer, contar y medir tamaño, forma, posición o densidad de determinados objetos (Image-Pro Plus, 2001; González, 2002). Este tipo de análisis es utilizado en diversos campos como es la antropología-forense, agencias de inteligencia militar y civil, medicina, geología, ciencias ambientales, climatología y agronomía.

En la agronomía los principales enfoques del análisis de imagen son para monitoreo o caracterización de tipos de texturas (zonas agrícolas) y consumo de agua mediante imágenes de satélites (Sánchez y Chuvieco, 2000; Fernández *et al.*, 2003). Y estudio de la porosidad del suelo aplicando el análisis de imagen a menor dimensión espacial, que cuenta ya con un importante desarrollo (Hallaire *et al.*, 1997; González, 1998; González, 2002).

La técnica del análisis de imagen utilizada en la descripción cuantitativa de la porosidad del suelo y en crecimiento anual de madera en plantas perennes (caso del nogal pecanero), representa una herramienta importante que permite

analizar el impacto y tomar decisiones adecuadas respecto del manejo de suelo y agua (González *et al.*, 2004b; González *et al.*, 2005).

Un estudio realizado mediante la técnica de análisis por González *et al* (2004a), con el propósito de estudiar la porosidad del suelo y su variación en el perfil, considerando dos criterios morfológicos; tamaño y forma de los poros, en huertas de nogal pecanero con diferente manejo en la Comarca Lagunera. Encontrando que las huertas con manejo intensivo (rotulación del suelo) presentan un perfil de porosidad reducido con poros pequeños, redondos y por lo general abundantes (Figura 10), donde la conductividad hidráulica a saturación es baja. Mientras que, en huertas con manejo de conservación (no rotulación del suelo), se incrementa el tamaño de poro, con una distribución homogénea en el perfil, incrementándose también la conductividad hidráulica a saturación.

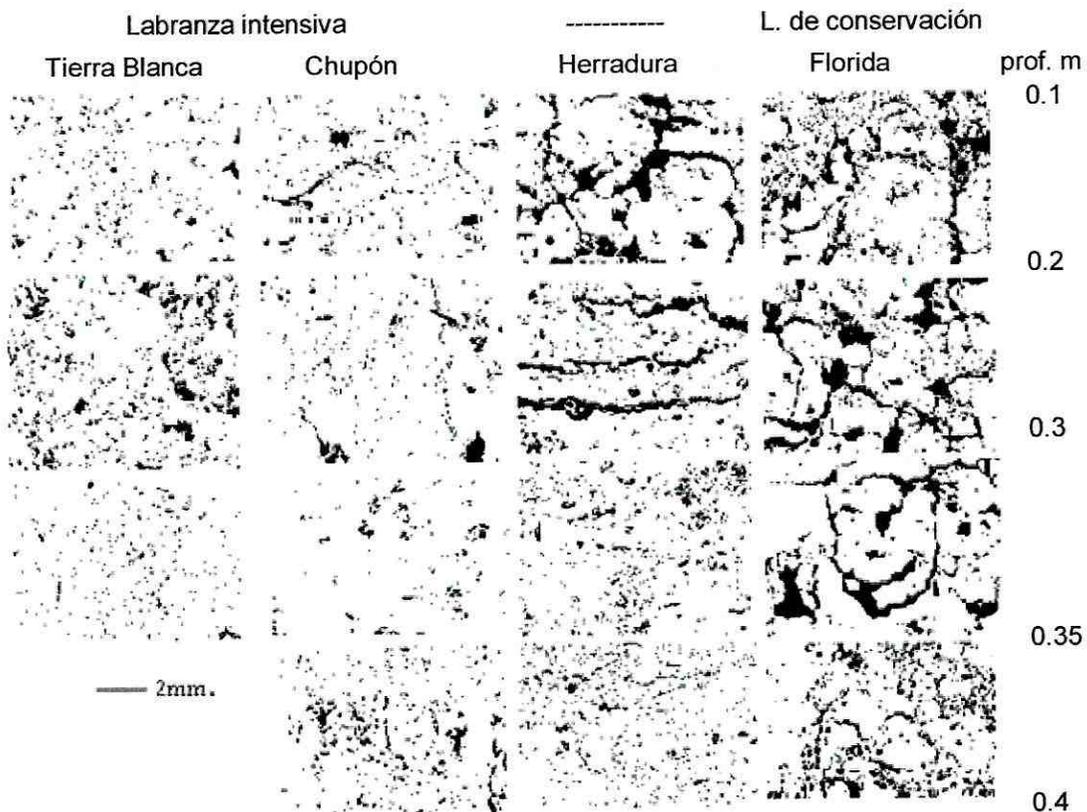


Figura 10. Morfología de cuatro huertas de nogal pecanero (Adaptado de González *et al.*, 2004a).

El estudio anterior demostró que al utilizar un determinado manejo se afecta al movimiento y almacenamiento del agua en el interior del suelo; la porosidad del suelo, medio por donde circula el agua y aire, y que a su vez esta afectada por varios factores, tales como:

Textura.- Cuanto más grueso (arena) son los elementos de la textura mayores son los vacíos, excepto si las partículas más finas (limos) se colocan dentro de

esos espacios o sí los coloides (arcillas) los obstruyen. No obstante lo más común es que los suelos con elementos gruesos presenten poros también gruesos y los suelos limosos y arcillosos, poros muy numerosos pero de menor tamaño. Por otra parte la materia orgánica contribuye a recuperar y aumentar la porosidad mediante la agregación de las partículas minerales del suelo (Navarro *et al.*, 2000).

Estructura.- La estructura del suelo (arreglo geométrico y topológico de los poros del suelo que se forman entre los agregados, y su estabilidad en tiempo y espacio) es una propiedad básica considerada como uno de los principales atributos de la calidad del suelo. Esta característica física del suelo ejerce un control en la distribución, flujo y retención de agua, sustancias disueltas y flujo de gases; su perturbación conduce a procesos de degradación edáfica que se asocian principalmente a causas de compactación y cementación (Gale *et al.*, 2000; Navarro *et al.*, 2000).

Actividad microbiana.- El manejo del suelo es un indicador de la biomasa microbiana, esta se desarrolla en función de factores intrínsecos y extrínsecos al sistema suelo, por lo cual constituye un indicador de la dinámica del suelo y de la salud del recurso, pues una buena actividad microbiana puede ser el reflejo de óptimas condiciones físicas y químicas que permitan el desarrollo de los procesos metabólicos de bacterias, hongos, algas y actinomiceto y de su

acción sobre los substratos orgánicos (Palm *et al.*, 1996; Álvarez y Anzueto, 2004).

Sistema de labranza.- Las practicas agrícolas (rastreo, barbecho y pastoreo de animales) utilizadas en los cultivos intensivos presentan un efecto que se manifiesta en compactación del suelo y, dependiendo del contenido de humedad de éste, la labranza favorece o destruye la estructura, repercutiendo en el tamaño de poros y su conectividad (González *et al.*, 2004a; Osuna *et al.*, 2006).

Compactación.- Cualquier tipo de tránsito por el campo, y realización de prácticas culturales como el arado y el pastoreo de animales generan una presión en la superficie del suelo que se compacta, esta compactación se incrementa especialmente cuando el suelo está húmedo. La presión incrementa la cantidad de suelo por unidad de volumen y se refleja en una porosidad reducida en espacio y tamaño. Lo anterior afecta la velocidad de infiltración, la conductividad hidráulica a saturación y la capacidad de almacenamiento de agua. Las raíces de las plantas tienen dificultad para penetrar y sus sistema radicular no desarrolla bien (Chávez, 2004).

II. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

En México la disponibilidad del agua para la producción agropecuaria se presenta en términos difíciles. Además, el mayor volumen de agua disponible es utilizado por el sector agrícola con eficiencias de uso de este recurso nada alentadoras. Uno de los cultivos que enfrenta esta problemática es el nogal pecanero, con una superficie considerable con tendencias a incrementarse y establecidas al norte del país. En este cultivo el manejo del agua es un factor determinante en la producción y rentabilidad del cultivo.

Por lo anterior, el presente estudio se propuso los siguientes objetivos:

- 1- Diseñar el riego en tiempo real como aproximación de una agricultura de precisión, considerando la variabilidad climática integrada a tres modelos que determinan la evapotranspiración y utilizando información de las características del tipo de suelo y de cultivo.
- 2- Determinar la productividad del nogal pecanero a partir de: la producción de nuez y crecimiento anual de madera, bajo diferentes sistemas de manejo de agua y suelo en el huerto.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización del área de estudio

Esta investigación se realizó en dos subregiones circundantes dentro de la cuenca río del Nazas, ubicadas entre los meridianos 24° y 26° de latitud norte y paralelos 105° y 102° de longitud oeste, que pertenecen a la región hidrológica número 36 (RH-36).

La cuenca del río nazas se extiende en una superficie de 71,906 kilómetros cuadrados, localizada una parte en el Estado de Coahuila y otra parte en el Estado de Durango. La cuenca del río nazas y aguanaval de manera conjunta forman la región hidrológica 36 (RH-36) localizada al norte de México, entre los estados de Coahuila, Durango y Zacatecas, cuya superficie es de 92 mil kilómetros cuadrados, de clima árido a semiárido (Figura 11).

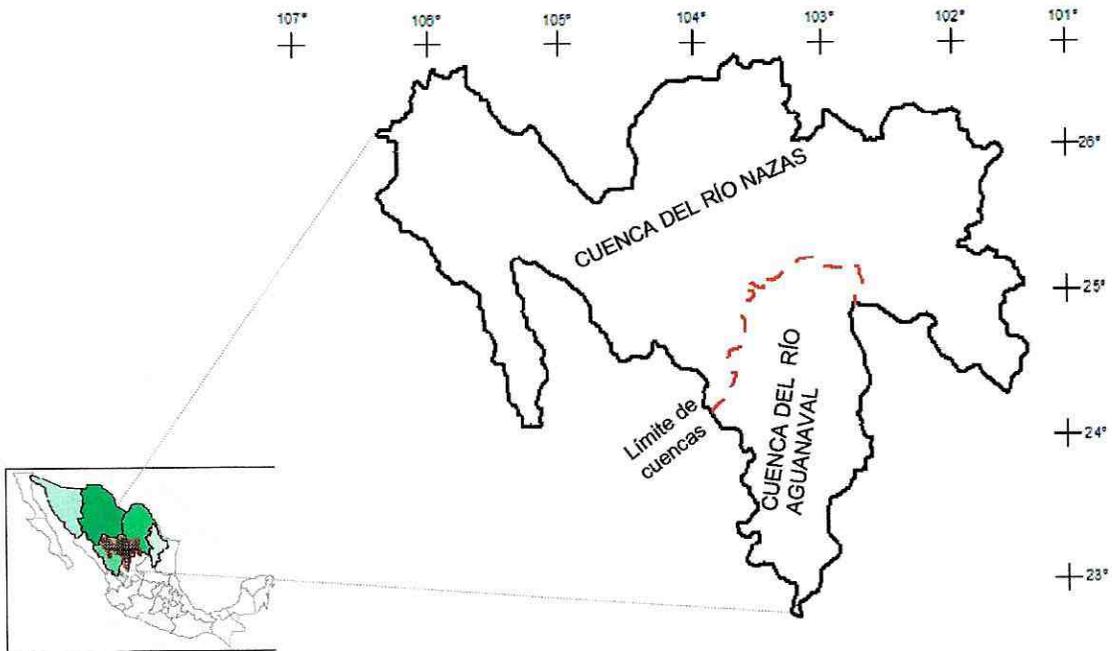


Figura 11. Localización geográfica de la región hidrológica 36 al norte de México.

El Río Nazas nace en la parte alta de la Sierra Madre Occidental, en el municipio de Indé en Durango. Antes de la construcción de las presas, desembocaba en la Laguna de Mayrán, en Coahuila, después de haber recorrido casi 400 kilómetros (Decroix *et al.*, 1993). Actualmente este río es alimentado artificialmente por las aguas de las presas "Lázaro Cárdenas" (El Palmito), presa captadora, y por la "Francisco Zarco" (Las Tórtolas), presa derivadora y reguladora (Figura 12).

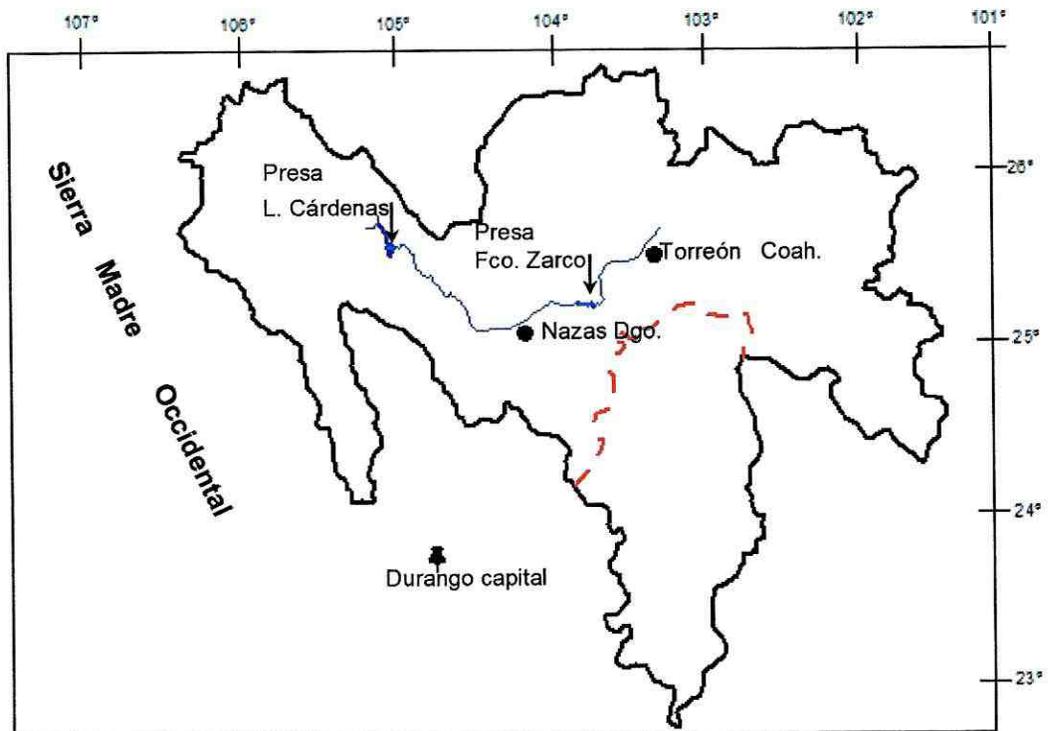


Figura 12. La presa Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco en la cuenca del río nazas y sus.

La cuenca del río nazas se delimita en tres subregiones (Figura 13), que corresponden a una división climatológica posterior al análisis de 123 estaciones pluviométricas (Decroix *et al.*, 1993 y 1997);

a) Parte alta (donde se ubica y abastece de agua la presa Lázaro Cárdenas), con lluvia promedio anual superior a los 500 mm, clasificada como una zona subhúmeda de producción y almacenamiento de agua de lluvia en la presa, con una superficie reducida del cultivo de nogal del 1.3 por ciento.

b) **Parte media** (ubicación de la presa Francisco Zarco), con precipitación media anual de 300 a 500 mm, considerada como una zona semi-árida de almacenamiento, conducción y aprovechamiento de agua hacia la parte baja de la cuenca donde se ubica el 21.3 por ciento de superficie sembrada de nogal.

c) **Parte baja**, formada por los lechos de las otroras Lagunas de Mayran y Viesca, así como el Bolsón de Mapimí, donde la precipitación promedio anual es inferior a los 300 mm. Se clasifica como zona de árida con un consumo de agua proveniente de la parte alta y media de la cuenca y la extracción de pozos profundos. En esta parte se concentra el 77.4 por ciento de la superficie sembrada con nogal.

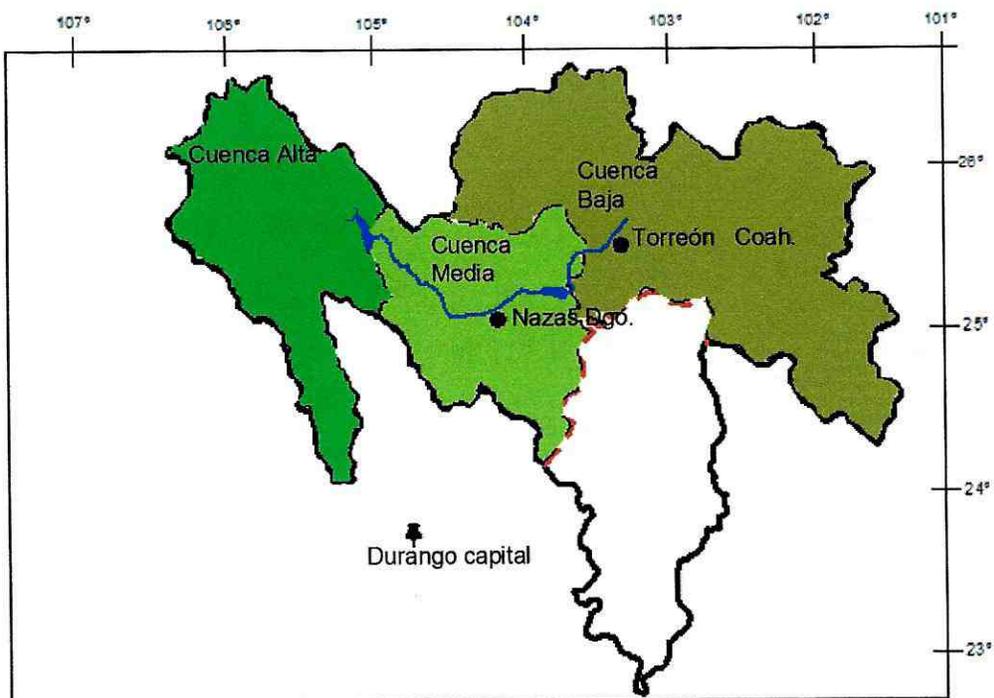


Figura 13. Subregiones de la cuenca del río nazas.

En la cuenca del nazas, al igual que otras cuencas del país y del mundo, es de notarse que acorde al gradiente hidrológico más del 80% de los recursos hidráulicos disponibles se producen en la parte alta en donde habita solo 4% de la población y el 1.3% de la superficie de nogal (Descroix *et al.*, 1992; Sánchez *et al.*, 2006).

Para los fines de la presente investigación los sitios de estudio se localizan en la cuenca media y baja del río nazas. Donde, se instalo un modulo de riego, y además, se encuentran instaladas tres estaciones agro climáticas telemétricas en un transecto de la cuenca del Nazas, con la finalidad de manejar el riego en tiempo real como una aproximación.

4.2. Distribución de estaciones agroclimáticas telemétricas y la aproximación del riego en tiempo real en la cuenca del nazas

4.2.1. Estaciones agro climáticas telemétricas

En un transecto entre la cuenca media y baja del río nazas, donde se ubica el 98% de la superficie cultivada de nogal pecanero, se encuentran instaladas tres estaciones climáticas; de estas, dos son automatizadas de marca Adcon y Motorola y una Davis que originalmente era de funcionamiento manual (Figura 14), las cuales están equipadas con sensores electrónicos cuya función es registrar el ambiente atmosférico minuto a minuto y enviar la información vía telemetría (odas de radio y teléfono) hacia una base de datos en periodos

cortos predefinidos de 15 minutos. Dichas estaciones se integraron para su consulta mediante un sistema informático en red desarrollado en el Cenid-Raspa (Ochoa *et al.*, 2006). El sistema permite el monitoreo y observación en tiempo real de las variables ambientales que se suscitan en el huerto de nogal.

Las variables atmosféricas que monitorean estas estaciones son:

- a). Radiación solar,
- b). Temperatura del aire,
- c). Humedad relativa,
- d). Velocidad del viento,
- e). Dirección del viento,
- f). Punto de rocío,
- g). Precipitación pluvial, y
- h). Presión atmosférica.

El conocimiento inmediato de estos eventos climáticos que ocurren en las áreas de cultivo, permiten integrarse a modelos matemáticos que determinan la evapotranspiración del cultivo en periodos diarios. Generando así, una herramienta importante en la toma de decisión para aplicación en cantidad y disponibilidad del agua de riego en huertos de nogal pecanero.



Figura 14. Estaciones climáticas automatizadas en red.

La distribución espacial de las estaciones agroclimáticas telemétricas instaladas en red, se localizan en (Figura 15);

Cuenca baja del nazar

1.- La estación **Davis** situada en el Cenid-Raspa INIFAP en Gómez Palacio Durango, en coordenadas $25^{\circ} 35' 18.090''$ de latitud norte y $103^{\circ} 27' 01.523''$ de longitud oeste y altitud de 1129 m.s.n.m.

2.- La estación **Motorola** ubicada en el predio Las Villas, en Torreón Coahuila, distante 6 kilómetros del Cenid-Raspa, en las coordenadas $25^{\circ} 37' 02.136''$ de latitud norte y $103^{\circ} 24' 11.952''$ de longitud oeste y altitud de 1126 m.s.n.m.

Cuenca media del nazas

3.- La estación **Adcon** ubicada en la pequeña propiedad Santa Bárbara perteneciente al municipio de Nazas Durango, distante 160 kilómetros del Cenid-Raspa, ubicada en las coordenadas $25^{\circ} 14' 43.928''$ de latitud norte y $104^{\circ} 07' 06.230''$ de longitud oeste y de altitud de 1243 m.s.n.m.

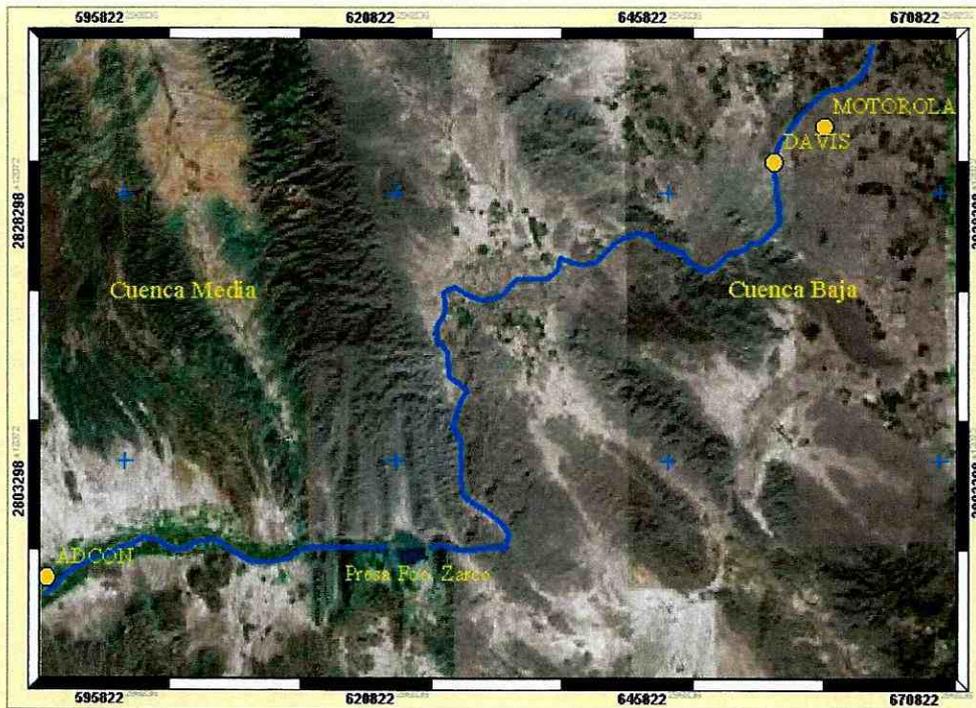


Figura 15. Localización de las estaciones climáticas automatizadas.

4.2.2. Procedimiento para la programación del riego en tiempo real

En este contexto, una de las metodologías importante a utilizar para realizar la programación del riego en tiempo real es a partir del cálculo del balance diario del agua presente en el perfil del suelo ocupado por las raíces del cultivo. Esta metodología permite planificar las láminas y momentos de aplicación del riego, basados en la estimación de las entradas y salidas de agua en la zona radical del suelo.

Una forma de expresar el balance de agua en el suelo (Bh) es:

$$Bh = Ss(\uparrow) - Es(\downarrow) \quad (1)$$

Para zonas áridas y balance diario de agua en el suelo, se puede presentar únicamente de manera simplificada. Considera únicamente como salidas del sistema la evapotranspiración del cultivo, mientras que las entradas al sistema son la precipitación pluvial efectiva.

Evapotranspiración del nogal pecanero

En la agricultura practica, una metodología para determinar indirectamente el consumo hídrico del cultivo es la recomendada por Allen *et al.*, (1998), donde la

ET_c es estimada en función de la evapotranspiración de referencia (ET_0), la cual es corregida por un coeficiente de cultivo (K_c) específico para cada especie agrícola; de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$ET_c = ET_0 * K_c \quad (2)$$

Respecto al primer termino de la ecuación 2. En la estimación de la ET_0 se aplicaron tres modelos que requieren de diferente cantidad de variables climáticas. Los modelos matemáticos se eligieron de acuerdo al grado de confiabilidad en condiciones climáticas de zonas áridas y en base a la demanda de datos climáticos (Cuadro 4) requeridos sean medidos directamente en la zona de cultivo.

Cuadro 4. Datos climáticos esenciales medibles, requeridos por los métodos de evapotranspiración de referencia.

| Método | Temperatura | Humedad relativa | Velocidad del viento | Radiación solar |
|---------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Penman-Monteith FAO | X | X | X | X |
| Doorenbos y Pruitt | X | X | X | |
| Hargreaves-Samani | X | | | |

Método de Penman-Monteith FAO, (Allen *et al.* 1998). La FAO en mayo de 1990, organizo un panel de expertos e investigadores en riego, en colaboración con la Comisión Internacional para el Riego y Drenaje y con la Organización Meteorológica Mundial, con el fin de revisar las metodologías previamente propuestas por la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y elaborar recomendaciones sobre la revisión y la actualización de procedimientos a este respecto. El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en base a información meteorológica. Las variables utilizadas en esta ecuación son radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento a 2 metros de altura sobre la superficie del suelo.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

Método de Doorenbos y Pruitt, (1977). El cual fue calibrado mediante 11 lisímetros en diferentes puntos del mundo, generando mejores resultados en las zonas áridas (Allen *et al.*, 1986; Jensen *et al.*, 1990). Las variables de entrada requeridas por el modelo son temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento durante horas diurnas.

$$ET_0 = f_e \{a + b[p(0.46 * T + 8.13)]\} \quad (4)$$

Método de Hargreaves y Samani. La ecuación original propuesta por estos investigadores en 1985, ha sufrido diversas modificaciones por el mismo Hargreaves (1994) y Samani (2000), así también por la evolución del cálculo de algunos de sus componentes. De tal manera que la expresión utilizada se muestra en la ecuación 5. En el cálculo de ET_0 mediante este modelo se requiere únicamente de datos meteorológicos de temperatura del aire.

$$ET_0 = 0.0023(t_{med} + 17,78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (5)$$

Posteriormente se realizó una correlación entre la ET_0 obtenida mediante los diferentes modelos y la ET_0 obtenida mediante el tanque evaporímetro tipo A. Esta correlación se realizó únicamente para la cuenca baja, debido a la nula disponibilidad de datos de evaporación para la cuenca media. El análisis estadístico comprendió variables como; el sesgo, error absoluto medio, desviación media, coeficiente de regresión y correlación. Estos indicadores estadísticos son generalmente utilizados en la evaluación de modelos que utilizan datos de tipo climatológicos y que permiten medir el grado de precisión de la simulación. Los cuales se determinaron de tres formas: con valores de ET_0 diarios, valores promedios decenal y valores promedios mensual.

Método del tanque evaporímetro tipo A. Este método ha tenido resultados satisfactorios, dado que la medida de la evaporación integra el efecto de la radiación, viento, temperatura y humedad para un lugar específico (Allen *et al*, 1998; Ojeda, 1999). En algunos trabajos experimentales, los valores de evaporación medidos en el tanque tipo A afectados por sus correspondientes factores de corrección, se han utilizado para calcular el volumen de agua de riego a reponer en los cultivos (Tijerina, 2000). Los datos diarios de evaporación del tanque tipo A fueron convertidos a datos diarios de ET_0 mediante la siguiente expresión (Cuenca, 1989):

$$ET_0 = K_p E_{pan} \quad (6)$$

Respecto al segundo termino de la ecuación 2. Los coeficientes de cultivo (K_c) son la representación cuantitativa normalizada de la evapotranspiración de un cultivo (ET_c) en relación con la evapotranspiración de referencia (ET_0) a lo largo del ciclo fenológico de un cultivo. En el caso específico del cultivo de nogal, la mayoría de las investigaciones coinciden en que el consumo de agua del nogal del tercer año en adelante depende del diámetro de tronco, número de árboles por hectárea, etapa fenológica del cultivo y de la localización espacial de la huerta (Miyamoto, 1983; Worthington *et al*, 1992; Godoy y López, 1997; Godoy *et al*, 2000). Por ello, los valores del coeficiente de cultivo (K_c) se obtienen

utilizando las ecuaciones empíricas (Cuadro 5) propuestas por Miyamoto (1983), las cuales integran las variables anteriormente mencionadas.

Cuadro 5. Ecuaciones para calculo de K_c en nogal pecanero (Miyamoto, 1983).

| d*N (cm ha⁻¹) | Modelo |
|---------------------------------|--|
| 1000 $K_c =$ | $1.76E-01 + 5.69E-05(DGC) + 1.40E-07(DGC)^2 - 6.21E-11(DGC)^3$ |
| 2000 $K_c =$ | $2.46E-01 + 3.05E-04(DGC) + 4.61E-07(DGC)^2 - 2.97E-10(DGC)^3$ |
| 3000 $K_c =$ | $3.16E-01 + 5.31E-04(DGC) + 7.24E-07(DGC)^2 - 4.84E-10(DGC)^3$ |
| 4000 $K_c =$ | $2.93E-01 + 1.11E-03(DGC) + 1.85E-07(DGC)^2 - 3.23E-10(DGC)^3$ |

Los Días Grados Crecimiento (DGC), algunas veces llamados unidades calor, se definen como la integración de la temperatura (grados) de un lugar en función del tiempo (días) bajo un rango de temperatura específicos para cada cultivo y etapa fisiológica. La mayoría de las plantas maduran basados en la acumulación de DGC en consecuencia la longitud del periodo fisiológico de un cultivo puede estimarse en base a la acumulación de estos. El concepto de DGC supone:

- La existencia de dos temperaturas basales para cada cultivo, la planta crece cuando la temperatura se encuentra en ese rango, fuera de ese rango de temperatura la planta detiene su crecimiento.
- La tasa de crecimiento es mayor si la temperatura se encuentra dentro del rango de crecimiento pero lejos de las temperaturas basales.

Las temperaturas basales son: la temperatura mínima o temperatura base (T_{CMIN}) del aire requerida para el crecimiento del cultivo y temperatura máxima (T_{CMAX}) del aire arriba de la cual el crecimiento del cultivo se detiene (Ojeda, 1999). En nogal pecanero las temperaturas para crecimiento es de 12 a 35 °C, con un óptimo de 27 °C.

Existen diferentes métodos para calcular los DGC, entre los más importantes se encuentran el método de temperatura media, el senoidal, y el integral. Este último es el más exacto ya que utiliza datos meteorológicos continuos (Ojeda, 1999). Sin embargo, la ecuación utilizada para determinar los DGC requeridos en las diferentes ecuaciones propuestas por Miyamoto (1983) es de acuerdo al modelo de temperatura media con una temperatura base de 15.5 °C, dada de la siguiente forma:

$$DGC = \bar{T} - T_{CMIN} \quad (7)$$

Si la temperatura media del día (\bar{T}) fuera mayor de T_{CMAX} , entonces $DGC = T_{CMAX} - T_{CMIN}$; pero si (\bar{T}) fuera menor de T_{CMIN} , entonces $DGC = 0$.

Precipitación efectiva

La cantidad, frecuencia, distribución espacial y temporal de la precipitación es muy variable, razón por la cual ha sido objeto de intenso estudio por parte del hombre, en la determinación de los climas y aprovechamiento de los recursos hídricos que ofrece la naturaleza. En los últimos años la lluvia se presenta con gran variabilidad en cantidad, distribución espacial y temporal, esto ocasionado por el fenómeno del cambio climático que impacta directamente a la producción agrícola de los cultivos.

La cantidad de agua de lluvia aprovechada por los cultivos y que se almacena en las zonas radicular se denomina precipitación efectiva, la cual no incluye el agua percolada, interceptada, escurrida o evaporada que al precipitarse no se almacena en la zona radical. Su estimación ha sido sujeta a una diversidad de estudios, sin embargo debido a la complejidad para estimarla se han utilizado relaciones empíricas.

Las precipitaciones menores a 5.1 milímetros son inefectivas para reducir el déficit de humedad del suelo después de analizar datos de varios años en el estado de Arkansas (Cahoon *et al.*, 1990).

4.3. Diseño del modulo de riego y factores de estudio

En la huerta nogalera de la UAAAN-UL, localizada en la parte baja de la cuenca del río nazas en Torreón Coahuila, en coordenadas 25° 33' 28" de latitud norte y 103° 22' 12" de longitud oeste y altitud de 1126 m.s.n.m., se trabajo con nogal pecanero de variedad Western y Wichita en un sistema de plantación de 10 x 10 metros en marco real. Donde los trabajos de manejo del huerto, desde su establecimiento, se realizaban tradicionalmente mediante el riego por gravedad y sistema de labranza intensiva.

El estudio se efectuó durante el ciclo agrícola 2006, y consistió en la instalación un diseño experimental completo al azar con arreglo factorial 2x4, los cuales fueron: (A) Labranza y (B) Sistema de riego, esto es:

El factor A = 2

- Labranza intensiva, y
- Labranza de conservación.

El factor B = 4

- Riego por gravedad,
- Riego por aspersion,
- Riego por microaspersión, y
- Riego por cintilla enterrada.

Dando un total de 8 tratamientos completamente al azar (Figura 16), considerando a cada árbol como una unidad de muestreo, dada las características de superficie y de plantación de los nogales en la huerta de la UAAAN-UL, se procedió a diseñar el siguiente modulo de riego, donde se muestra en la figura 16 dos secciones una para gravedad, la otra para riego presurizado, considerando aspersión, micro y goteo enterrado.

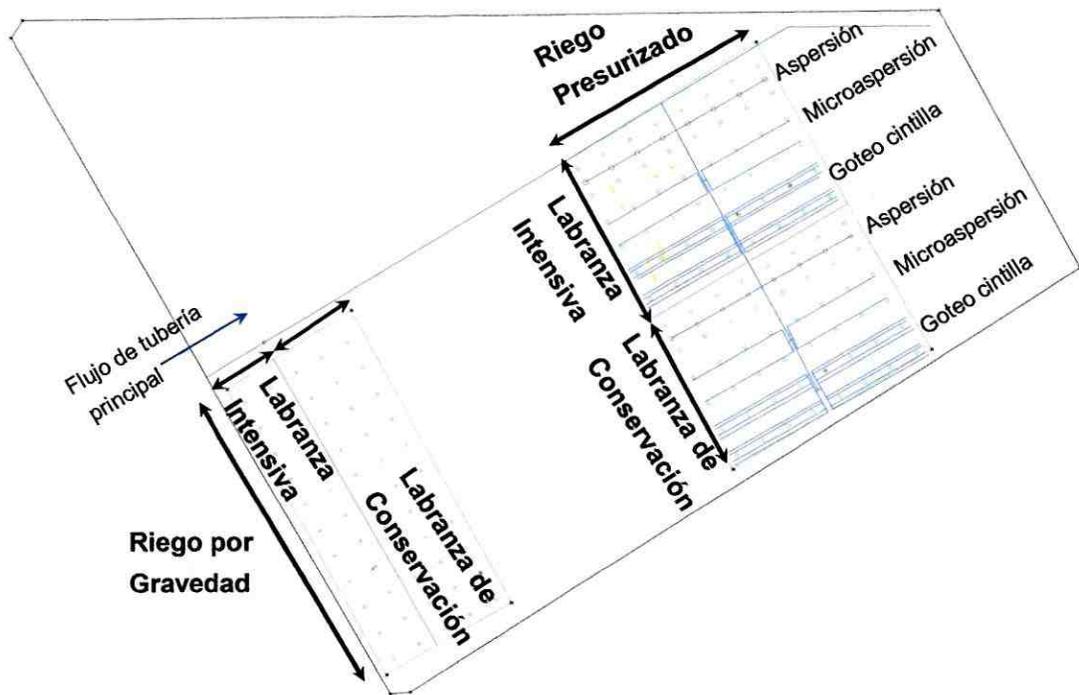


Figura 16. Diseño espacial de tratamientos en la nogalera UAAAN-UL.

4.3.1. Sistema de labranza

La labranza de conservación consistió en dejar de utilizar la rastra y bordeadora como implementos para preparar el suelo al riego, pero sobretodo dejar crecer la vegetación nativa o bien inducida, y esta se deshiero cada que alcanzaba una altura de entre 30 y 40 centímetros (regularmente cada 30 días).

La labranza intensiva consistió en manejar las labores agrícolas tradicionales como rastreo y paso de escrepa cada 30 días (Figura 17).



Figura 17. Labranza intensiva y de conservación.

4.3.2. Los sistemas de riego

Riego por gravedad

Este sistema de riego es el más utilizado para la aplicación del agua en las huertas de nogal del norte de México, pero con bajas eficiencias, menor al 55 por ciento. En este experimento bajo este sistema de riego, la cantidad de agua requerida para cada línea de nogal fue aportada en dos en pequeñas superficies (melgas). La primera melga, donde se encontraban los árboles al centrote esta, con dimensiones de 60 metros de largo por 7 metros de ancho. La segunda melga, se encontraba céntrica con respecto de dos líneas de árboles, con dimensiones de 60 metros de largo por 4 metros de ancho. Cubriendo así el 100 por ciento del suelo ocupado por los árboles de nogal. Este tipo de manejo, fue diseñado de acuerdo a la baja disponibilidad de agua de bombeo (gasto menor a 5 lps), y a las dimensiones de la maquinaria utilizada.

Riego por aspersión

Este sistema de riego es utilizado en menos del 3 por ciento de las huertas establecidas en México, con tendencia importante a incrementar su uso. Con eficiencia de uso aceptable, superior al 70 por ciento. Para esta investigación, el diseño del sistema fue con una línea céntrica de aspersores con respecto de dos líneas de árboles; de tal forma que el radio de alcance de humectación por

el aspersor (9.5 metros), cubrió apróximamente el 90 por ciento del suelo ocupado por las dos líneas de árboles de nogal, en cada uno de los tratamientos (Figura 18).

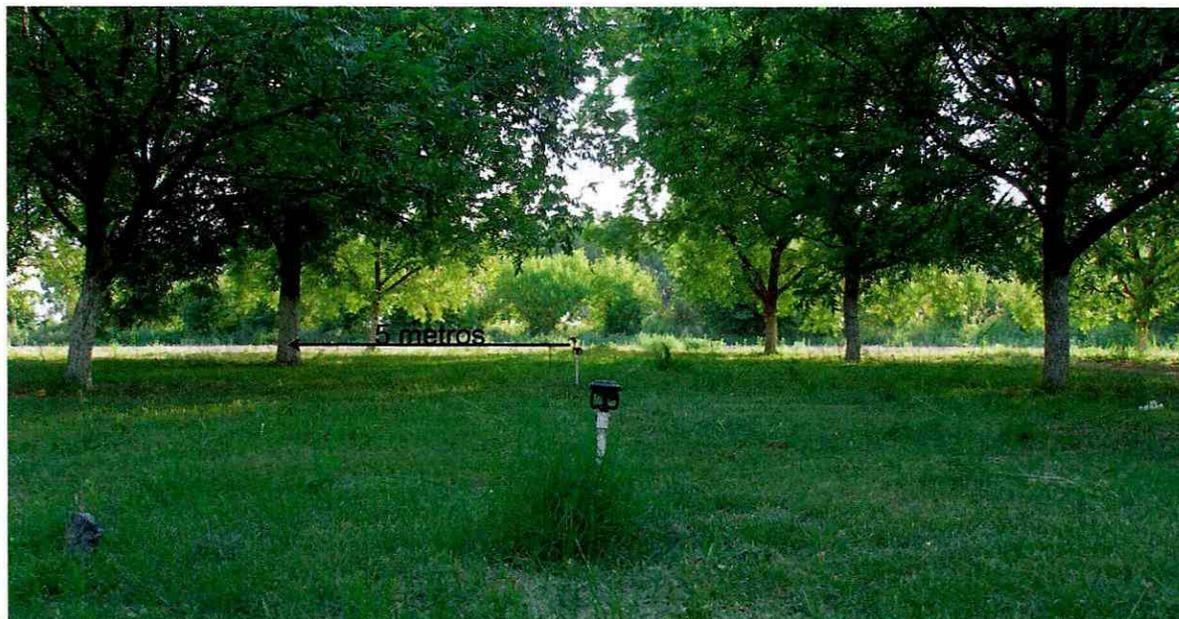


Figura 18. El riego por aspersión y labranza de conservación.

Riego por microaspersión

Este sistema de riego es poco utilizado en huertas de nogal pecanero, sin embargo presenta eficiencia de riego aceptable, superior al 80 por ciento. En el presente trabajo, la instalación del sistema consistió en; dos microaspersores para cada árbol, uno de cada lado separado a un metro respecto al tronco, de tal forma que el área humectada fue similar al área de la copa del árbol,

aproximadamente el 60 por ciento del área total ocupada por los árboles, en cada uno de los tratamientos (Figura 19).



Figura 19. Riego por microaspersión y labranza de conservación.

Riego por goteo cintilla

Este sistema de riego se utiliza en una proporción menor al 1 por ciento del área ocupada por las nogaleras del norte de México. Con eficiencia de riego bastante aceptable, superior al 90 por ciento. En el presente trabajo el diseño de este sistema fue; dos líneas de cintilla enterrada a 40 centímetros de

profundidad para cada costado de una línea de árboles (Figura 20). La primera línea de cintilla separada 1.2 metros del tronco del nogal, mientras la segunda línea separada 1 metros respecto de la primera.



Figura 20. El sistema de riego por goteo cintilla y labranza intensiva.

Para conocer el volumen de agua utilizada por los árboles durante las diferentes etapas fenológicas y humectar el suelo a una metros profundidad utilizando cada uno de los sistemas de riego, fue utilizado el calendario de riego fijo propuesto por Godoy *et al.*, (2000); el cual se basa en el conocimiento del diámetro de tronco y la densidad de árboles por hectárea.

Las mediciones realizadas durante el periodo 2006 en este experimento fueron:

1. Levantamiento topográfico, utilizando un sistema de posicionamiento global (GPS) de alta precisión.
2. Crecimiento anual de madera en árboles al final del año agrícola 2006, mediante el análisis de imagen como una herramienta de aproximación.
3. Productividad (cosecha).

EI GPS

El sistema de posicionamiento global de marca TRIMBLE modelo 114 (Figura 21), fue utilizado en esta investigación para ubicar espacialmente las estaciones agro climáticas y las huertas de nogal pecanero (UAAAN-UL). Estos nuevos receptores, utilizan los sistemas avanzados GPS y DGPS (GPS diferencial), lo que permite confiar en la precisión y calidad de los resultados. La información adquirida mediante el GPS diferencial y almacenada en una pocket PC, fue tratada tanto en sistemas de información geográfica (SIG) como en otros programas de computadora (AUTOCAD).

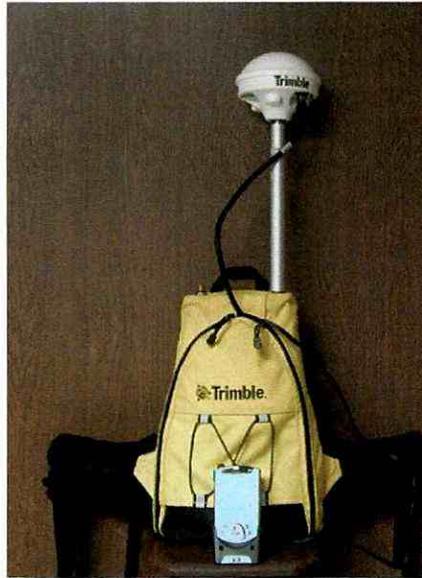


Figura 21. GPS Trimble, con precisión de centímetros.

El análisis de imagen

Para el estudio del crecimiento anual de madera, se utilizó la técnica de análisis de imagen, la cual consiste en la obtención de ramas (una pequeña sección transversal “rodaja”) en posición vertical en el árbol de nogal, donde esta muestra los crecimientos anuales “anillo de crecimiento” de forma concéntrica que permiten definir con claridad el crecimiento anual para cada año. El tratamiento de la rodaja, es pulir la superficie de la rodaja y después aplicar un marcador (fluoroglucinol) sobre la superficie de esta, lo que permite contrastar el material sólido de la madera y los espacios vacíos o sistema de conducción de savia entre un año de crecimiento y otro. Para la digitalización de la imagen se requirió de una cámara digital conectada a un microscopio estereoscópico,

mientras que para el tratamiento y análisis de la imagen se necesitó de la ayuda de un analizador de nombre Image Pro Plus® v4.5 (Media Cybernetica, Maryland, USA) bajo micro computadora personal.

Se analizaron cuatro rodajas por árbol, las cuales presentaron diámetros de entre seis y tres centímetros de diámetro, obtenidas a lo largo de cada rama. Muestreándose un total de cuatro árboles por cada tratamiento, ello únicamente en la zona de cultivo donde se encuentra ubicado los sistemas de riego presurizados.

Productividad del nogal pecanero

Para determinar la productividad del nogal bajo los diferentes tratamientos, se cosecharon cuatro árboles de cada tratamiento. Además, se tomó un kilogramo de nuez de cada uno de los cuatro árboles cosechados para estimar el porcentaje de almendra. Estos datos se procesaron mediante el análisis de varianza, y las medias de los tratamientos se compararon mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), a través del sistema computacional Statistical analysis System (SAS Institute, 1998).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Consumo hídrico del nogal pecanero y la aproximación del riego en tiempo real, en la cuenca del nazas

5.1.1. Evapotranspiración de referencia

En la determinación de la ET_0 en la cuenca baja y media de la cuenca del río nazas considerando las ecuaciones de Penman-Monteith FAO, Doorenbos y Pruitt y Hargreaves-Samani, fueron utilizados los datos climáticos corresponden al año agrícola 2005. Dichos datos fueron valores diarios, por lo tanto el cálculo de ET_0 se realizó de manera diaria. Sin embargo, los resultados se presentan en forma de valor promedio diario para periodos mensuales.

A continuación se presentan los resultados correspondientes para cada ecuación utilizada en dos ubicaciones de la cuenca del río nazas.

Método de Penman-Monteith FAO (ecuación 3). En la figura 22, se presenta el comportamiento de la ET_0 , aplicando este método, para dos situaciones geográficas de la cuenca del Nazas;

1.- En la cuenca baja, se observa que la ET_0 , es de 2 mm d⁻¹ para el mes de febrero, se incrementa considerablemente a 4 y 6 mm d⁻¹ en marzo y junio respectivamente, enseguida disminuye ligeramente de 5.5 y hasta 4.5 mm d⁻¹ para los meses de julio y agosto respectivamente.

2.- En la cuenca media, el comportamiento de la ET_0 , fue diferente con respecto a la parte baja de la cuenca, para ese mismo año de observación; es decir, los valores de ET_0 fueron de 3.9 mm d^{-1} para el mes de marzo, enseguida el comportamiento es incrementa ligeramente a 4 mm d^{-1} en abril y se incrementa a valores sensiblemente homogéneos hasta 5 mm d^{-1} para los meses de mayo, junio y julio, para disminuir hasta 4 mm d^{-1} en el mes de agosto.

En base a lo anterior, se puede distinguir que la demanda evapotranspirativa, es mayor en la cuenca baja que en la cuenca media, a razón de 1 mm d^{-1} para los meses de marzo a agosto y de forma elipsoidal, bajo el mismo método utilizado.

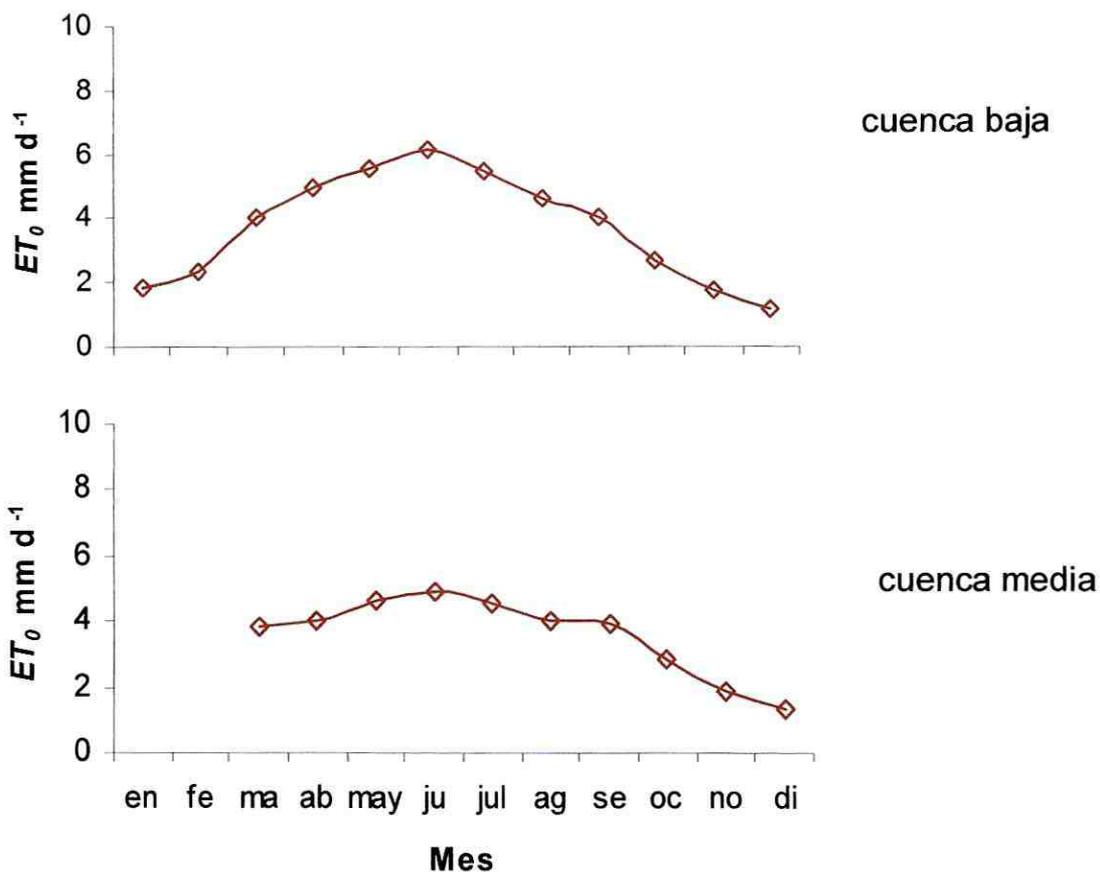


Figura 22. Evapotranspiración de referencia, mediante el método de Penman-Monteih FAO.

Método de Doorenbos y Pruitt (ecuación 4). La figura 23, se presenta el comportamiento de la ET_0 aplicando el método, para dos situaciones geográficas de la cuenca del Nazas;

1.- En la cuenca baja, se observa que la ET_0 , es de 3.8 mm d^{-1} para el mes de febrero, se incrementa considerablemente a 5.3 , 7.3 y 8.3 mm d^{-1} en marzo,

abril y mayo respectivamente, hasta alcanzar su valor máximo de 9.8 en el mes de junio, posteriormente disminuye de 8 hasta 6 mm d⁻¹, para los meses de julio y agosto respectivamente. Estos datos señalan que la evapotranspiración de referencia máxima en esta parte de la cuenca, se presentó a partir del mes de abril hasta el mes de agosto.

2.- En la cuenca media, la ET_0 presenta un comportamiento similar con respecto a la cuenca baja, pero con valores reducidos de ET_0 para ese mismo año de observación; es decir, los valores de ET_0 fueron de 6, 6.8, 8 y 9 mm d⁻¹ para los meses de marzo, abril, mayo y junio respectivamente, enseguida disminuyen a 7 y 6 mm d⁻¹ para julio y agosto.

De acuerdo a los valores graficados en la figura 23 mencionados con anterioridad se puede distinguir que la demanda evapotranspirativa es mayor en la cuenca baja que en la cuenca media a razón de 1 mm d⁻¹ para los meses de marzo a agosto, donde el incremento de la demanda se presentó de forma lineal ascendente y descendente, bajo el mismo método utilizado.

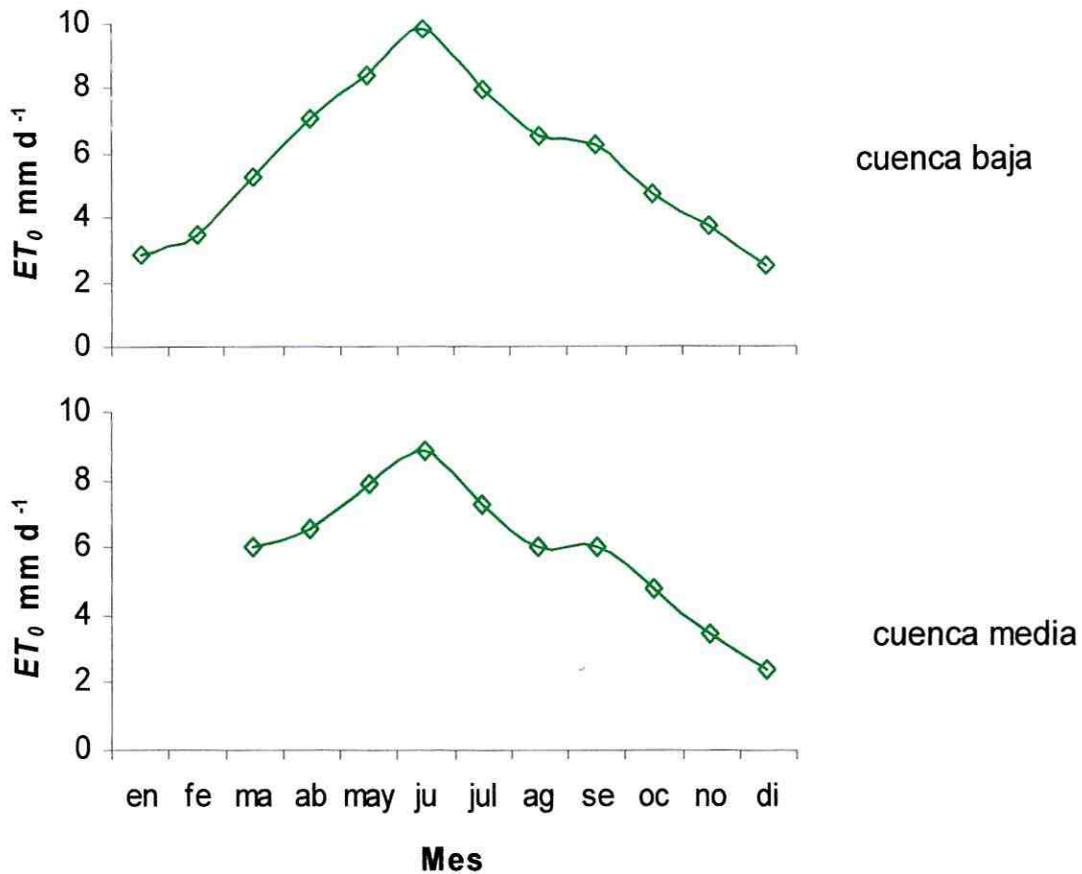


Figura 23. Evapotranspiración de referencia, mediante el método de Doorenbos y Pruitt.

Método de Hargreaves y Samani (ecuación 5). En la figura 24, se presenta el comportamiento de la ET_0 , aplicando este método, para dos situaciones geográficas de la cuenca del Nazas;

1.- En la cuenca baja, se observa que la ET_0 , corresponde a 3 mm d⁻¹ para el mes de febrero, se incrementa considerablemente a 4.5, 5.5, 6.5 y 7 mm d⁻¹ en

marzo, abril, mayo y junio respectivamente, enseguida disminuye ligeramente de 6.5 hasta 5 mm d⁻¹, para los meses de julio y agosto respectivamente. De acuerdo a estos valores, la evapotranspiración de referencia máxima en esta parte de la cuenca, se presentó a partir del mes de marzo hasta el mes de agosto.

2.- En la cuenca media, el comportamiento de la ET_0 , fue diferente con respecto a la cuenca baja, para ese mismo año de observación; es decir, los valores de ET_0 fueron de 5.5 mm d⁻¹ para el mes de marzo, enseguida se incrementan ligeramente a 6, 7 y 7.5 mm d⁻¹ en abril, mayo y junio, para posteriormente disminuir a 6 y 5 mm d⁻¹ en los meses de julio y agosto.

La tendencia de la evapotranspiración de referencia similar en ambas partes de la cuenca del Nazas. Presentándose valores superiores de ET_0 para la cuenca media con respecto a la cuenca baja y durante el periodo de mayo a julio, contrario de los métodos anteriores donde la demanda evapotranspirativa es mayor en la cuenca baja que en la cuenca media y durante los meses de marzo a agosto.

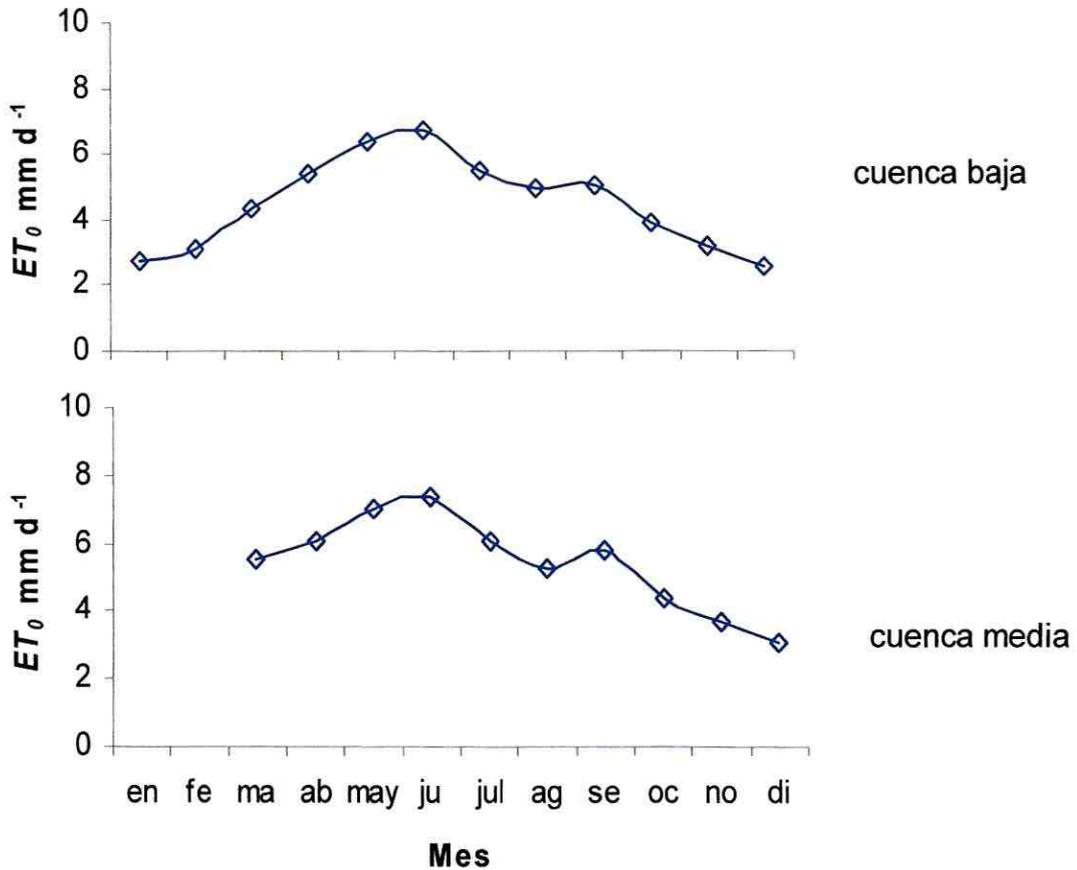


Figura 24. Evapotranspiración de referencia, mediante el método de Hargreaves y Samani.

Los resultados anteriores muestran una tendencia en el patrón de la evapotranspiración de referencia durante el periodo observado de manera similar en ambas partes de la cuenca con los diferentes modelos utilizados. Presentando la máxima demanda de agua por la atmósfera durante los meses de mayo, junio, julio y agosto. Sin embargo, esta demanda de agua se muestra ligeramente superior para la cuenca baja con respecto de la cuenca media,

excepto en la ecuación 5 durante el mes de mayo, junio y julio se presenta de manera inversa. A decir del funcionamiento de los diferentes modelos utilizados, se puede notar que la ecuación 3 presenta mayor sensibilidad de cambio "lógico", puesto que los valores de variables atmosféricas como: temperatura, velocidad del viento y radiación solar son superiores en la parte baja con respecto a la parte media, además el cambio orográfico debe tener un efecto en la cantidad de luz solar durante el año.

5.1.1.1. Correlación de los métodos utilizados en la determinación de la evapotranspiración de referencia

Considerando que la máxima demanda evapotranspirativa atmosférica se presenta durante el periodo mayo, junio, julio y agosto. Y es también durante este periodo donde se presentó la máxima diferencia entre los valores obtenidos con los diferentes métodos. Se realizó únicamente para este periodo la correlación entre los valores ET_0 de las ecuaciones 3, 4 y 5 contra los valores resultantes de la ecuación 6.

Los resultados de la comparación de métodos para la cuenca baja del nazas mediante las tres formas de análisis (Cuadro 6), muestra indicadores estadísticos que no presentan variación considerable en sus resultados; como es el caso del sesgo, error absoluto medio y desviación media, y otros que si presentan variación, el caso del coeficiente de regresión y coeficiente de correlación.

Dentro de los indicadores estadísticos que si presentan variación, se observa que de acuerdo al sesgo la ecuación de Penman-Monteith FAO (P-M) y Hargreaves-Samani (H-S) tienden a subestimar la ET_0 total del periodo analizado en un -16 y -11% con una desviación media de -1.12 y -0.74 mm d⁻¹ respectivamente, al inverso la ecuación de Doorenbos-Pruitt (D-P) tiende a sobrestimar en un 24% con una desviación media de 1.60 mm d⁻¹. Mientras que el error absoluto medio fue de 0.80, 1.20 y 1.60 mm d⁻¹ para H-S, P-M y D-P respectivamente, ello indica en este orden el grado de precisión de los métodos utilizados.

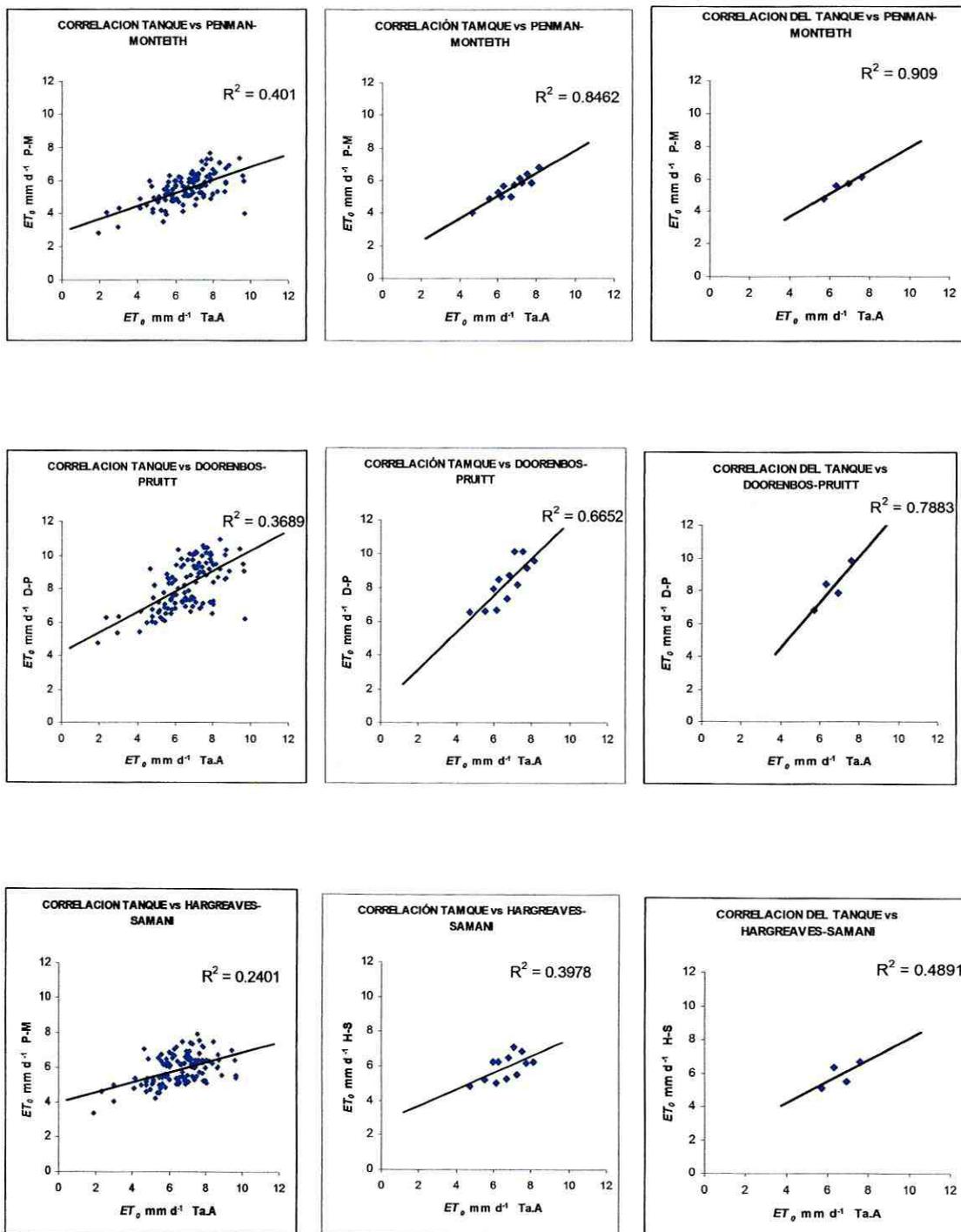
Los indicadores estadísticos muestran que si existe variación en los resultados obtenidos de acuerdo a las formas de análisis de los datos. Ambos coeficientes se presentan con valores bajos cuando se analizan con datos diarios de ET_0 , incrementándose considerablemente cuando se analizan los valores de ET_0 decenal y mensual, ello ocasionado principalmente por reducción de la variación en los valores al ser promediados. Resultando en todos los casos ligeramente superiores los valores de coeficientes de correlación con respecto a los de regresión y dados bajo el siguiente orden: ecuación de P-M, ecuación D-P y ecuación H-S (Figura 25).

Cuadro 6. Análisis estadístico para ET_0 en la cuenca baja, durante los periodos de máxima demanda.

| Correlación de valores diarios | | | | |
|---|--------------|------------|------------|------------|
| | Ta. A | P-M | D-P | H.S |
| TOTAL | 781.90 | 651.10 | 969.30 | 698.80 |
| Sesgo (%) | - | -16.73 | 23.96 | -10.64 |
| Coefficiente de regresión R^2 | - | 0.40 | 0.37 | 0.24 |
| Coefficiente de correlación | - | 0.63 | 0.61 | 0.49 |
| Error absoluto medio (mm d^{-1}) | - | 1.25 | 1.76 | 1.13 |
| Desviación media (mm d^{-1}) | - | -1.11 | 1.59 | -0.70 |
| Correlación de valores promedios decenal | | | | |
| TOTAL | 80.10 | 66.60 | 99.40 | 71.20 |
| Sesgo (%) | - | -16.85 | 24.08 | -11.12 |
| Coefficiente de regresión R^2 | - | 0.85 | 0.67 | 0.40 |
| Coefficiente de correlación | - | 0.92 | 0.82 | 0.63 |
| Error absoluto medio (mm d^{-1}) | - | 1.13 | 1.61 | 0.81 |
| Desviación media (mm d^{-1}) | - | -1.13 | 1.61 | -0.74 |
| Correlación de valores promedios mensual | | | | |
| TOTAL | 26.60 | 22.10 | 32.90 | 23.60 |
| Sesgo (%) | - | -16.80 | 23.57 | -11.07 |
| Coefficiente de regresión R^2 | - | 0.91 | 0.79 | 0.49 |
| Coefficiente de correlación | - | 0.95 | 0.89 | 0.70 |
| Error absoluto medio (mm d^{-1}) | - | 1.12 | 1.57 | 0.74 |
| Desviación media (mm d^{-1}) | - | -1.12 | 1.57 | -0.74 |

Ta.A =Tanque evaporimetro tipo A (ecuación 6), P-M= Penman-Monteith FAO (ecuación 3), D-P= Doorenbos-Pruitt (ecuación 4) y H-S =Hargreaves-Samani (ecuación 5).

Figura 25. Diagrama de dispersión entre ET_0 del tanque y ET_0 de tres ecuaciones, para la cuenca baja del nazas.



5.1.2. Evapotranspiración del cultivo (Consumo hídrico del nogal)

Los resultados del consumo hídrico del nogal pecanero obtenidos en la parte baja y media de la cuenca del río nazas para el ciclo fenológico 2005, aplicando la ecuación 2 con los valores de evapotranspiración de referencia resultantes de la ecuación 3, 4 y 5, corresponden un coeficiente de cultivo que considero datos respecto a diámetro de tronco y densidad de plantación correspondiente a árboles de 30 años de longevidad y en un sistema de plantación de 12 por 12 metros en marco real.

Coeficiente de cultivo

Los resultados obtenidos en el cálculo de los valores de K_c mediante las ecuaciones empíricas propuestas por Miyamoto (1983) para el nogal pecanero, las cuales requieren de número de árboles por hectárea, diámetro de tronco y cálculo de Días Grados Crecimiento determinados con los datos de temperatura del aire registrados para cada localidad. Presentaron similitud, es decir, los valores del coeficiente de cultivo son idénticos en ambas parte de la cuenca.

Con la finalidad de ilustrar la determinación de ET_c , se selecciono un árbol con diámetro de tronco de 42 centímetros los cuales representan a árboles con longevidad promedio de 30 años, y un sistema de plantación de 12 x 12 metros en marco real. Se determina que **N** es igual a una densidad de 70 árboles por

hectárea y d es igual a 42 cm; por lo tanto, el resultado $d \cdot N$ es igual a 2940 cm ha^{-1} , lo que señala utilizar al modelo 3000 K_c ubicado en el cuadro 5.

El comportamiento de valores de K_c en las diferentes etapas fenológicas del nogal pecanero se presenta en la Figura 26, determinados de acuerdo a los datos anteriores y utilizando DGC en función de las temperaturas registradas en las estaciones climáticas localizadas en la cuenca del nazas.

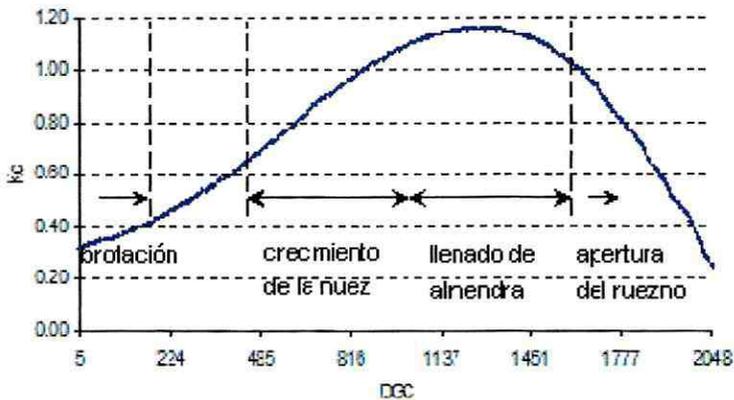


Figura 26. Coeficiente de cultivo para nogal (de 30 años) en función de DGC.

A continuación se presentan los resultados del consumo hídrico del nogal pecanero obtenidos en la cuenca baja y media del río nazas, aplicando la ecuación (5) y considerando los datos respecto a diámetro de tronco y densidad de plantación propuestos con anterioridad.

Evapotranspiración del cultivo por Penman-Monteith FAO

En la Figura 27, se presenta el consumo hídrico (ET_c) por el nogal pecanero para el periodo fenológico 2005, aplicando el método de Penman-Monteith FAO, para dos situaciones geográficas de la cuenca del Nazas;

1.- En la cuenca baja, se observa que la ET_c , es de 1.9 mm d^{-1} para el mes de marzo, este consumo se presenta antes y durante la brotación, enseguida se incrementa a 3 y 5.3 mm d^{-1} para los meses de abril y mayo respectivamente, que corresponde a la etapa de brote vegetativo, fructífero, y floración, para los meses de junio y julio se presenta un consumo hídrico considerable de 6.1 y 6.2 mm d^{-1} respectivamente correspondiente al crecimiento y estado acuoso de la nuez, enseguida disminuye a 5.5 y 4.2 mm d^{-1} , para los meses de agosto y septiembre respectivamente correspondiente al llenado de la almendra y apertura del ruezno, finalmente para el mes de octubre el consumo hídrico es de 2.5 mm d^{-1} .

2.- En la cuenca media, el comportamiento de la ET_c , fue diferente con respecto a la parte baja de la cuenca, para ese mismo año de observación, es decir los valores de ET_c fueron de 2 mm d^{-1} para el mes de marzo (brotación), enseguida se incrementan a 2.5 y 3.7 mm d^{-1} en abril y mayo, para los meses de junio y julio el consumo hídrico máximo fue de 4.8 y 5 mm d^{-1} respectivamente, para disminuir a 4.7 y 4.1 mm d^{-1} para el mes de agosto y septiembre respectivamente.

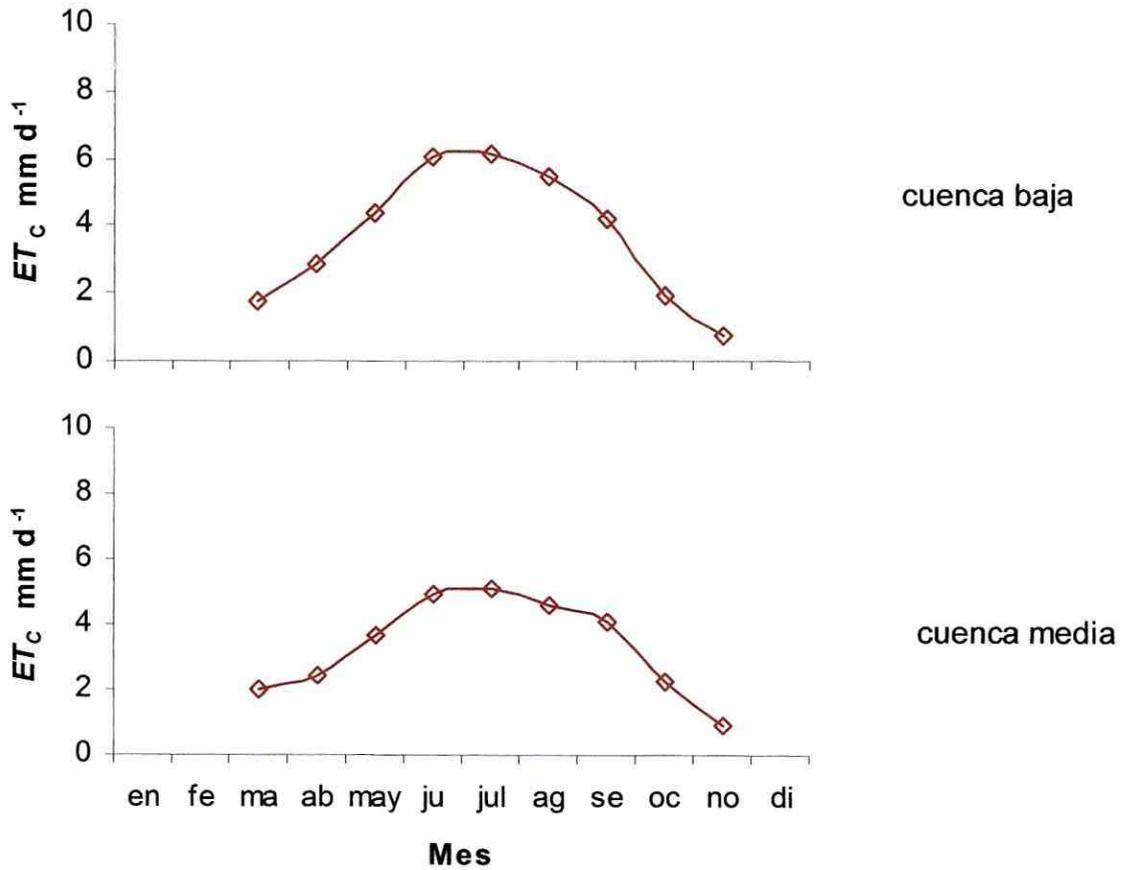


Figura 27. Evapotranspiración real de nogal en la parte baja y media del nazas, aplicando el método de Penman-Monteihht FAO.

Determinación del consumo hídrico por Doorenbos-Pruitt

El comportamiento del requerimiento hídrico determinado aplicando el método de Doorenbos-Pruitt presentado en la Figura 28, indica una demanda de agua mínima durante el periodo marzo-abril (inicio de brotación hasta la floración), de

igual manera se presenta para el periodo octubre-noviembre posterior a la apertura del ruezno en ambos sitios de la cuenca del nazas.

Estos resultados muestran una tendencia similar con los obtenidos en base al método anterior. Sin embargo, para el periodo de junio-julio y agosto de máximo consumo durante la etapa de estado acuoso e inicios de llenado de almendra, se marca una diferencia en un promedio de 12% mayor para la parte baja respecto de la parte media, esta diferencia similar que la determinada bajo el método de Penman-Monteith FAO. Los valores de ET_c presentados en la figura 28 se muestran superiores a los observados en la figura 27. Sin embargo, durante el periodo de junio se presenta el valor máximo en la figura 28 mientras que en la figura 27 el valor máximo se presenta durante el periodo de julio en ambos sitios analizados.

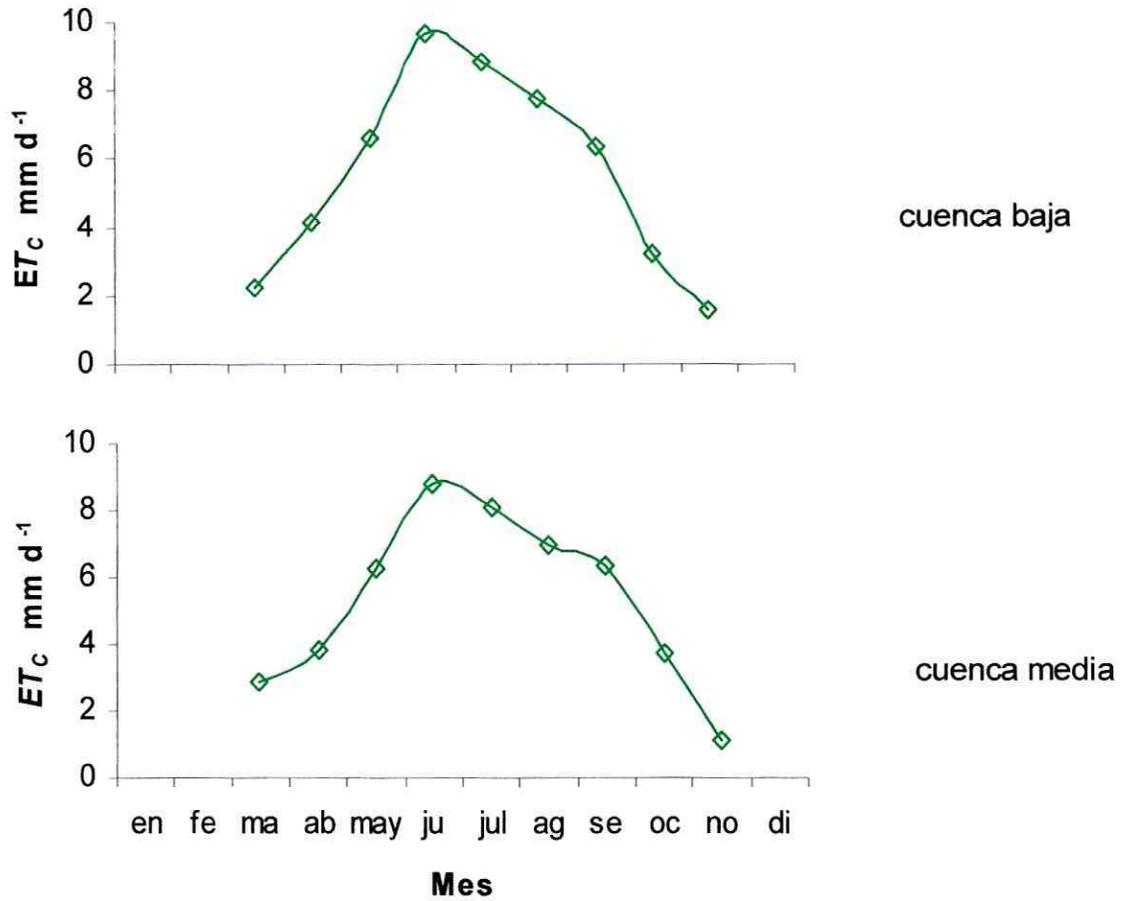


Figura 28. Evapotranspiración real de nogal en la parte baja y media del nazas, aplicando el método de Doorenbos-Pruitt.

Determinación del consumo hídrico por Hargreaves y Samani

Los requerimientos hídricos en nogal pecanero determinados utilizando este método, presentados en la Figura 29. Muestran un consumo de agua mínimo en los periodos de inicio de brotación y posterior a llenado de almendra, estos requerimientos presentan una tendencia similares a los determinados mediante

los métodos anteriores. Donde los periodos que demandan mayor consumo de agua se presentan durante el estado acuoso y de llenado de almendra. La demanda de agua determinada utilizando esta ecuación para la cuenca baja y media se observa de manera similar. Sin embargo, la demanda hídrica mediante este método es inferior a la obtenida utilizando la ecuación de Doorenbos-Pruitt en un 28 y 18% para la parte baja y media respectivamente; pero, superior a Penman-Monteith FAO en un 20% en la cuenca media en los periodos de máxima demanda.

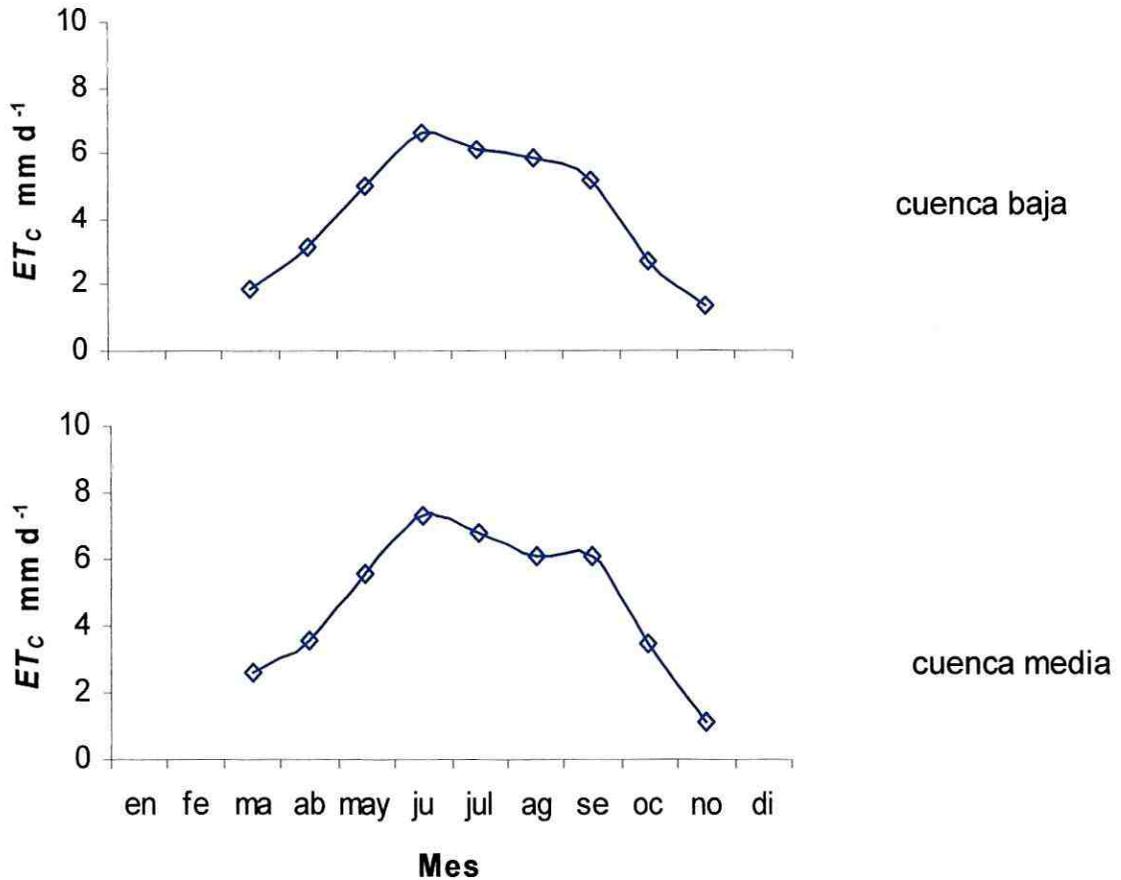


Figura 29. Evapotranspiración real de nogal en la parte baja y media del nazas, aplicando el método de Hargreaves y Samani.

Los resultados obtenidos de la evapotranspiración del nogal pecanero mediante las diferentes metodologías coinciden claramente en la tendencia de simulación de la evapotranspiración. Aunque en los periodos de mayor demanda se presentan diferencias considerables en los valores obtenidos, estas diferencias obedecen principalmente por las condiciones climáticas que prevalecen en una región determinada, es decir por ET_0 , y en menor o nula intensidad en las

variaciones del coeficiente del cultivo de una u otro región. Considerando específicamente las condiciones climáticas de manera “lógica, a menor temperatura, radiación solar, etc. menor evapotranspiración”; es decir, las condiciones climáticas en la cuenca baja favorecen a una mayor demanda de agua con respecto de la cuenca media, como lo muestran las metodologías de Penman-Monteith FAO y Doorenbos-Pruitt, pero no así Hargreaves -Samani. Esta inconsistencia obedece principalmente a mínimas variables climáticas que integra el método.

Estos resultados, a título comparativo, con estudios realizados para determinar la demanda de agua en nogal pecanero por Godoy y López (1997); específicamente para longevidad de árbol de 30 años (42 cm de diámetro) y densidad de población de 12 x 12 metros, coinciden en el comportamiento de la demanda de agua para la mayoría de las etapas fenológicas del cultivo. Estos investigadores presentan resultados, donde la demanda de agua máxima por el cultivo seda durante los meses de junio, julio y agosto, periodo de máximo estado acuoso y llenado de la almendra.

5.1.3 Precipitación pluvial efectiva

De acuerdo a Cahoon *et al.*, (1990), debe verificarse que la precipitación observada sea mayor que 5.1 milímetros para cumplir como precipitación efectiva en un día determinado:

$$P \geq 5.1$$

(8)

La precipitación correspondiente al año agrícola 2005, para la cuenca media del río nazas (Figura 30). Se observa que el mayor aporte de agua por efectos de lluvia se presenta en el mes de julio y agosto en ambas partes de la cuenca. Sin embargo, en la cuenca media se presentan eventos con mayor frecuencia y duración a diferencia de la cuenca baja.

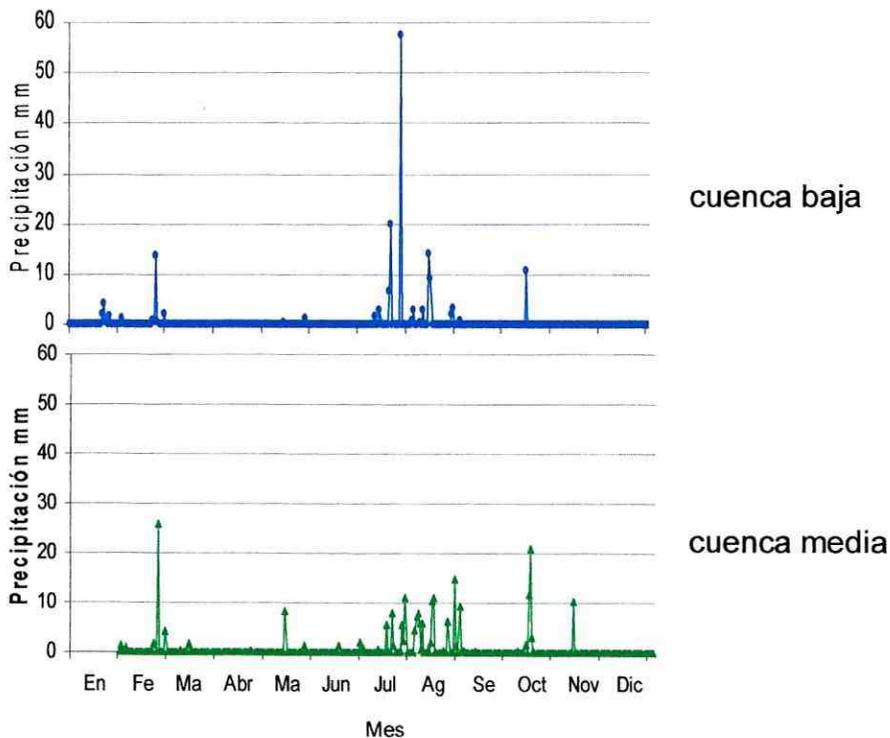


Figura 30. Precipitación para el periodo 2005.

Las precipitaciones en la parte baja y media fueron de 167.1 y 223.9 mm respectivamente, durante el periodo enero-diciembre de 2005. En ambos sitios de la cuenca durante el primer semestre, la precipitación que se presenta es inefectiva, excepto para el mes de febrero. Por el contrario para el periodo julio-agosto aumenta la cantidad de agua precipitada y frecuencia de los eventos de manera considerable. Esto explica la disminución en la demanda evapotranspiración durante este periodo, notándose con mayor impacto para la cuenca media.

El periodo de precipitaciones máximas en ambas partes de la cuenca coincide con el periodo de máxima demanda de agua por el cultivo. Sin embargo, la cantidad de agua de lluvia es insuficiente para el desarrollo y explotación comercial del nogal pecanero, por lo que se requiere aportar el mayor volumen de agua demandada por el cultivo a través del riego, esto con mayor notoriedad para la cuenca baja.

5.1.4. Aproximación a una programación del riego en tiempo real

5.1.4.1. Método del balance de agua en el suelo

Consiste en realizar un balance, a través del tiempo, de la cantidad de agua presente en el perfil del suelo ocupada por las raíces del cultivo. Considerando el principio de conservación de la masa, la cantidad de agua que entra menos la que sale en un periodo de tiempo determinado es igual al cambio de

almacenamiento de agua que experimenta el perfil del suelo en dicho periodo de tiempo. Esta metodología permitirá estimar los cambios de humedad del suelo de manera directa, considerando lo que se evapotranspira, llueve y se aporta en el agua de riego, que aplicado en el momento oportuno y en la cantidad necesaria permite no solo ahorrar agua, sino además evita el decremento en el rendimiento de los cultivos.

Partiendo del principio del balance del agua en la naturaleza, una forma de expresar el balance de agua en el suelo (Bh) es:

$$Bh = S_s(\uparrow) - E_s(\downarrow) \quad (1)$$

De manera simplificada, se considera únicamente como salidas del sistema la evapotranspiración del cultivo (ET_c):

$$S_s(\uparrow) = ET_c \quad (9)$$

Mientras que las entradas al sistema son la precipitación pluvial efectiva (Pe), la contribución de agua subterránea (As) y el agua almacenada antes del riego (Aa):

$$Es(\downarrow) = (Pe + As + Aa) \quad (10)$$

Pero dado que para zonas áridas y balances diarios de agua en el suelo la ecuación (10) se puede sustituir únicamente por la precipitación efectiva (Dastane, 1974), por lo tanto, el balance de agua en el suelo se puede escribir de forma simplificada como:

$$Bh = ET_c(\uparrow) - Pe(\downarrow) \quad (11)$$

Cada término de la ecuación (11) debe cuantificarse en periodos diarios para determinar la humedad o agua almacenada en la zona radicular del suelo antes de su agotamiento de acuerdo a los límites permisibles por el cultivo.

5.1.4.2. Criterios a considerar en programación de riego en tiempo real

El objetivo de la programación del riego es optimizar el uso de agua, aplicando la cantidad de agua adecuada en el momento preciso para mantener y asegurar en la zona radical el nivel óptimo de humedad del suelo según el estado fenológico del cultivo. Una programación eficiente del riego permitirá, entre otros, optimizar la producción en diferentes tipos de suelo, reducir sensiblemente el impacto de sobreexplotación de los mantos freáticos y el ahorro de agua para otros usos diferentes a las labores agrícolas.

En la programación del riego en tiempo real utilizando el balance de agua en el suelo (ecuación 11), además de la información del clima (equivalente a ET_c y Pe), requiere tener información agronómica como indicadores del riego basados principalmente en un cierto nivel de humedad del suelo, la cual señale si debe o no suministrarse el agua de riego y en que cantidad. Esta información se refiere principalmente sobre;

1.- El suelo

El suelo es un material poroso, como una esponja que retiene agua cuando es humedecida. Existen varias expresiones asociadas con el agua presente en el suelo durante el transcurso de los diferentes procesos de transporte que se presenta en el suelo. La máxima cantidad de agua que un suelo puede retener y drenar es aproximadamente constante, estas constantes de humedad (Figura 31) son de vital importancia en la programación del riego.

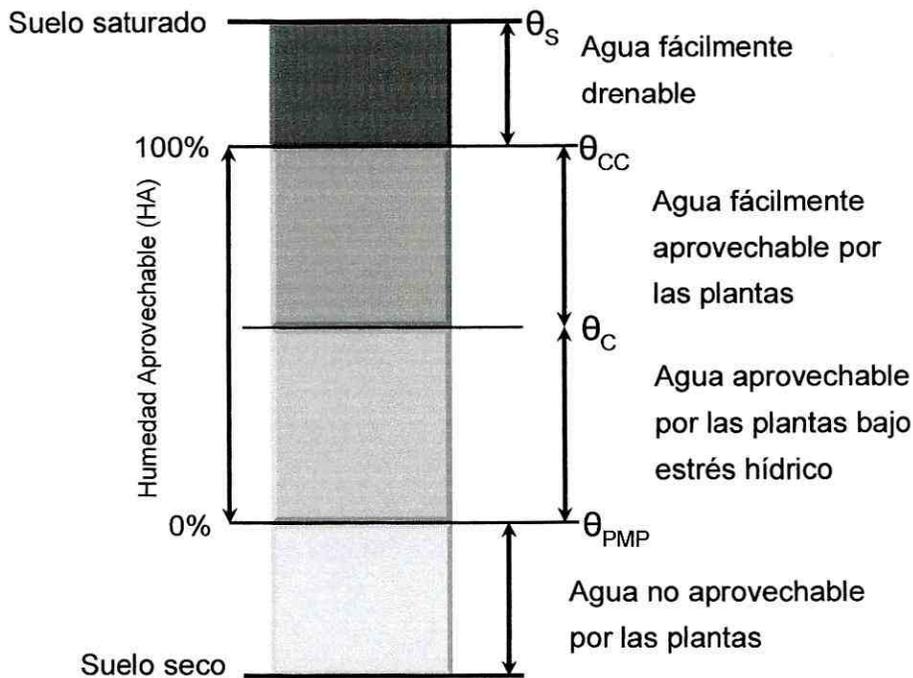


Figura 31. Constantes de la humedad del suelo.

Humedad a capacidad de campo o límite superior de humedad (θ_{cc}): Una vez que un suelo se satura y se deja que el agua drene libremente hasta alcanzar su capacidad máxima de retención se dice que se tiene el suelo a capacidad de campo. Cualquier cantidad adicional a la capacidad de campo es fácilmente drenable por efecto de la fuerza gravitacional.

Humedad a punto de marchitamiento permanente o límite inferior de humedad (θ_{PMP}): El punto de marchitamiento permanente, expresado en humedad volumétrica se refiere al valor mínimo permisible de humedad que el suelo puede alcanzar, sin tener un efecto detrimental en la planta, justo a este nivel de humedad y por debajo de el, las plantas se marchitan

“permanentemente”, esto es, las plantas no son capaces de recuperarse cuando se colocan posteriormente en condiciones favorables de humedad.

Humedad aprovechable o agua potencialmente extraíble (HA): La diferencia entre θ_{CC} y θ_{PMP} (ecuación 11) se le conoce como humedad aprovechable, generalmente expresada en porcentaje. A medida que el nivel de agua en el suelo disminuye, las raíces tendrán mayor dificultad para absorber agua hasta un punto en el que la planta tendrá efectos desfavorables sobre su crecimiento y por bifurcación en la producción.

$$HA = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (12)$$

Máxima fracción de abatimiento hídrico o nivel de agotamiento permisible (θ_c): El valor mínimo permitido o valor crítico del contenido de humedad, a la cual el suelo puede llegar antes del riego, no es el punto de marchitamiento permanente sino un valor intermedio entre θ_{CC} y θ_{PMP} de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo, y se determina por:

$$\theta_c = \theta_{CC} - f(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) = \theta_{CC} - f(HA) \quad (13)$$

Para expresar el contenido de humedad del suelo existen varios términos. A la cantidad de agua por unidad de masa o volumen de agua y se le denomina contenido de humedad gravimétrico o volumétrico, respectivamente.

La humedad gravimétrica (θ_m) se expresa como un cociente gravimétrico en por ciento de la masa de agua presente en una muestra de suelo y la masa de la muestra del suelo después de haber sido secada y alcanzado un valor constante, mediante la siguiente expresión.

$$\theta_m = \frac{M_{ag}}{M_{ss}} 100 \quad (14)$$

Por su parte la humedad volumétrica (θ_v) se expresa como el cociente volumétrico en por ciento del volumen de humedad en una muestra de suelo y el volumen del suelo seco.

$$\theta_v = \frac{V_{ag}}{V_{ss}} 100 \quad (15)$$

La densidad aparente del suelo (ρ_a) permite relacionar el contenido de humedad gravimétrico con el volumen volumétrico usando la siguiente relación:

$$\theta_v = \frac{\rho_a}{\rho_{ag}} \theta_m \quad (16)$$

Sin embargo, un factor de suelo que afecta en gran medida la retención del agua en el suelo, por consecuencia la humedad disponible, es la densidad la densidad aparente del mismo.

Densidad aparente (ρ_a): La densidad aparente del suelo se conoce como la relación entre la masa de sólidos del suelo (M_s) y el volumen total (V_T) dada por la siguiente relación:

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_T} \quad (17)$$

La densidad aparente incluye el espacio poroso existente entre las partículas sólidas, por lo tanto, valores altos indican suelos compactos con problemas para la penetración del agua y de las raíces. El valor de esta propiedad del suelo oscila entre 1.0 gr/cm³ para suelos orgánicos y hasta 1.9 gr/cm³ en suelos arenosos compactados. La ρ_a no es constante y puede variar temporal y espacialmente, siendo la capa arable la zona más dinámica.

2.- El cultivo

En el nogal pecanero, al igual que otros cultivos utiliza una fracción de la humedad aprovechable que se conoce como factor de abatimiento o déficit de humedad permisible (f). Al inicio del ciclo un cultivo puede estresarse, el valor de f es grande, pero a medida que alcanza sus periodos críticos como la floración o formación de fruto, el valor de f es mínimo. Esta humedad del suelo debe considerarse dentro de un estrato del suelo que comúnmente se denomina como profundidad de suelo efectiva o profundidad radical.

Déficit de humedad permisible (f): Durante los primeros meses del año y hasta antes de la brotación de los árboles de nogal pecanero, es importante mantener durante este periodo (enero a marzo) un contenido de humedad no menor al 50% de la humedad aprovechable, y superior a este valor después de la etapa de brotación hasta inicios del estado acuoso. Al inicio del estado acuoso e inicios del endurecimiento de la cáscara (entre junio y julio) la humedad aprovechable de mantenerse ligeramente superior al 70%, y posterior a este periodo debe mantenerse superior al 85% de la humedad aprovechable (Figura 32) hasta el periodo de completo llenado de almendra. Una vez que la nuez madura, el factor principal que controla la apertura del ruezno es la disponibilidad de agua en el suelo, por lo que debe mantenerse a un nivel arriba del 50% de la humedad aprovechable. Así lo indican diversas investigaciones

al respecto (Godoy, 1994; Miyamoto *et al.*, 1995; Herrera, 1990; Sparks *et al.*, 1995).

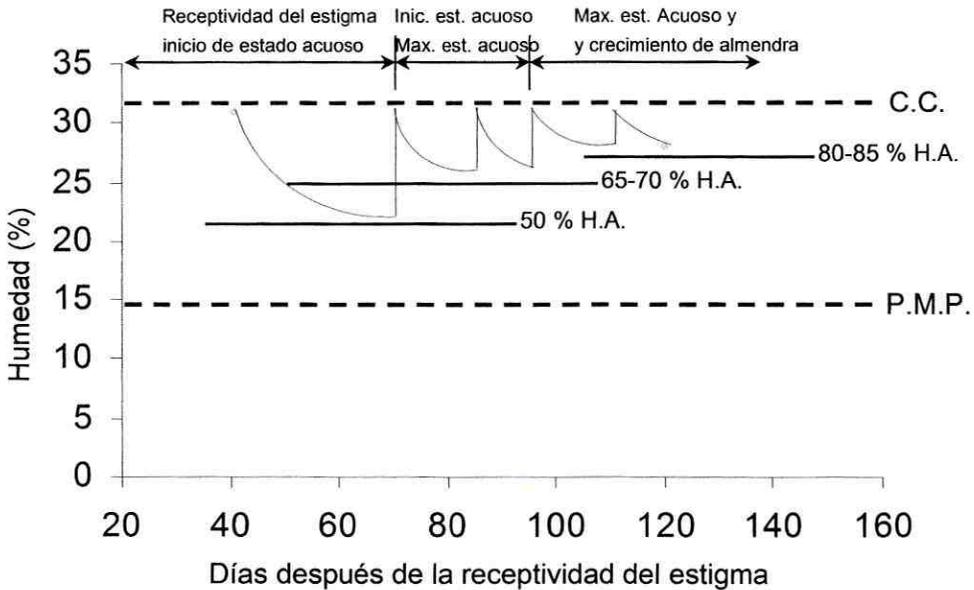


Figura 32. Abatimiento de humedad del suelo permisible en diferentes periodos fenológicos de nogal (Adaptado de Godoy, 1994).

Profundidad radical del cultivo (P_r): La aplicación del método del balance hídrico requiere del conocimiento de la profundidad radical dinámica, para mantener esta en condiciones óptimas de humedad a través del riego.

A medida que la planta se desarrolla, la zona radical crece hasta alcanzar un tamaño máximo. Típicamente la zona radical se extiende tanto lateralmente como verticalmente, pero este desarrollo de la raíz puede ser restringido por factores ambientales, fisiológicos y genéticos. El nogal pecanero es

considerado de raíz profunda; sin embargo, durante los dos primeros años estos árboles extraen más del 90% del agua que requieren del estrato de suelo 0-100 centímetros. También pueden extraer agua de estratos más profundos, gastando mayor energías para realizarlo.

3.- Formas de aplicación del riego y métodos de riego

El contenido de humedad volumétrica (θ_v) tiene una relación directa con el concepto de lámina de riego, dada por la siguiente expresión:

$$L_r = (\theta_{v2} - \theta_{v1})P_r \quad (18)$$

Esta ecuación permite calcular la lámina de riego (L_r) para incrementar el contenido de humedad volumétrico, expresado en forma decimal, de un nivel inicial (θ_{v1}) a otro nivel final (θ_{v2}) a una profundidad P_r .

Si el contenido de humedad esta dado en unidades gravimétricas la ecuación anterior tendría que considerar la densidad aparente:

$$L_r = (\theta_{v2} - \theta_{v1})\rho_a * P_r \quad (19)$$

Si la humedad inicial final e inicial, en unidades gravimétricas, es el contenido de humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente, respectivamente, en consecuencia la lamina para llevar el suelo a capacidad de campo, asumiendo un contenido de humedad a punto de marchitamiento permanente esta dado por la siguiente ecuación:

$$L_r = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \rho_a * P_r \quad (20)$$

Es preciso mencionar, que de acuerdo a esta ecuación únicamente se determina la cantidad en lamina de agua o requerimiento del riego neto a nivel parcelario para incrementar la humedad del suelo de un punto inicial a otro final y hasta cierta profundidad, sin considerar las diferentes perdidas de agua, conocidas como eficiencias del riego particulares del manejo y del sistema de riego en uso. Para determinar la lamina de agua total o requerimiento total del riego, además de la eficiencia del riego se deberá sumar al requerimiento neto la necesidad de agua para lixiviación de sales, que depende de la conductividad eléctrica del agua de riego medida en dS/m y de la conductividad del extracto de saturación del suelo correspondiente a una disminución de producción del 100%, que depende del cultivo.

5.1.4.3. Sistematización de criterios para el riego en tiempo real

Considerando las variables agroclimáticas en nogal pecanero, es posible realizar el balance diario de humedad en suelo (ecuación 11); para ello, es necesario calcular la evolución en el tiempo de la humedad disponible para el cultivo, la humedad mínima tolerable por el mismo y la humedad residual en el suelo. La humedad residual en el suelo en porcentaje de masa (θ_i) en un instante de tiempo determinado, se puede estimar restando a dicha humedad residual la humedad del suelo en un tiempo posterior (θ_{i-1}), con la siguiente ecuación:

$$\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (21)$$

Después de un riego y cuando el suelo alcanza su capacidad de campo (i-1), se cumple (Figura 30):

$$\theta_i = \theta_{CC} \quad (22)$$

Así, cuando el suelo pierde humedad por efecto de la evapotranspiración, la humedad del perfil del suelo empieza a descender, o por lo contrario asciende cuando se presenta una precipitación efectiva. Para no afectar al cultivo, la humedad residual (θ_i) no debe descender por debajo de la humedad mínima permisible por éste (θ_c), por lo tanto se debe verificar que:

$$\theta_c \geq \theta_i \quad (23)$$

Donde se estima utilizando la siguiente ecuación:

$$\theta_c = \theta_{cc} - \frac{f}{100}(\theta_{cc} - \theta_{PMP}) \quad (24)$$

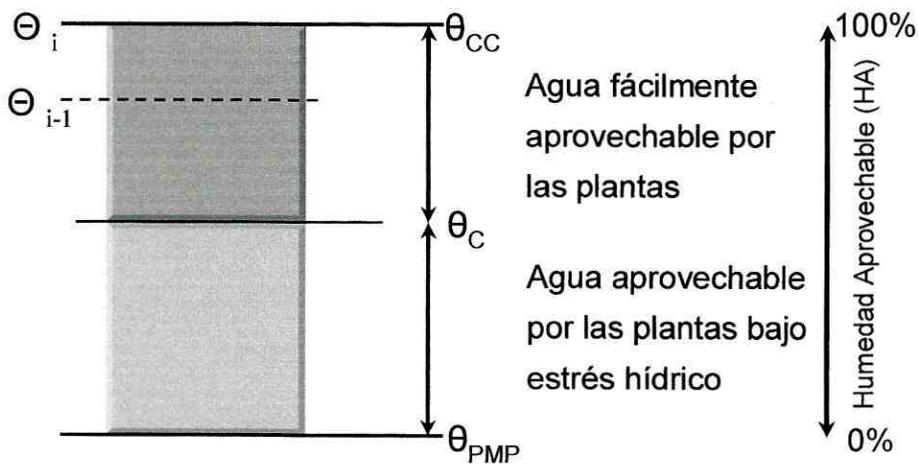


Figura 33. Perfil esquemático de humedad del suelo para la programación del riego.

El cuadro 7, presenta los resultados de la aplicación de la metodología anterior, donde se indican la fecha y cantidad en lamina de agua a emplear; sea bien en el primer riego "banco de humedad" a inicio del ciclo vegetativo o bien la

cantidad de agua de riego demanda durante el ciclo vegetativo del nogal pecanero.

Esta metodología permitirá determinar en red disponible en la World Wide Web (la Web), la demanda de agua por el nogal pecanero en tiempo real para cualquier momento o etapa fenológica en la que se encuentre el cultivo. Ello partiendo de un valor inicial de humedad del suelo y de características particulares del suelo (capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente), en esta ocasión para la cuenca baja y media del río nazas, donde se localizan las estaciones meteorológicas telemétricas.

Cuadro 7. Balance de agua del suelo y cálculo de fecha y lámina de riego.

| Día Juliano | ETc P-M | Pe | Bh (ecu. 4) | θ_{i-1} (%) | θ_i (%) | Riego Si, No | L. Riego (cm) |
|----------------|---------|----|-------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| | | | | | 42.84 (= θ_{cc}) | NO | 0.0 |
| 138 | 4.2 | 0 | 4.16 | 0.49 | 42.4 | NO | 0.6 |
| 139 | 4.3 | 0 | 4.34 | 0.51 | 41.8 | NO | 1.3 |
| 140 | 5.2 | 0 | 5.19 | 0.61 | 41.2 | NO | 2.1 |
| 141 | 5.3 | 0 | 5.25 | 0.62 | 40.6 | NO | 2.9 |
| 142 | 5.2 | 0 | 5.25 | 0.62 | 40.0 | NO | 3.8 |
| 143 | 5.1 | 0 | 5.13 | 0.60 | 39.4 | NO | 4.6 |
| 144 | 5.1 | 0 | 5.07 | 0.60 | 38.8 | NO | 5.3 |
| 145 | 4.8 | 0 | 4.78 | 0.56 | 38.2 | NO | 6.1 |
| 146 | 5.1 | 0 | 5.13 | 0.60 | 37.6 | NO | 6.9 |
| 147 | 4.4 | 0 | 4.45 | 0.52 | 37.1 | NO | 7.6 |
| 148 | 4.3 | 0 | 4.30 | 0.51 | 36.6 | NO | 8.2 |
| 149 | 4.2 | 0 | 4.17 | 0.49 | 36.1 | NO | 8.9 |
| 150 | 5.2 | 0 | 5.22 | 0.61 | 35.5 | NO | 9.7 |
| 151 | 5.3 | 0 | 5.30 | 0.62 | 34.9 | SI | 10.5 |
| 152 | 5.5 | 0 | 5.50 | 0.65 | 42.8 | NO | 0.0 |
| 153 | 5.4 | 0 | 5.35 | 0.63 | 42.2 | NO | 0.8 |
| 154 | 6.1 | 0 | 6.06 | 0.71 | 41.5 | NO | 1.8 |
| 155 | 5.8 | 0 | 5.84 | 0.69 | 40.8 | NO | 2.7 |
| 156 | 5.7 | 0 | 5.73 | 0.67 | 40.1 | NO | 3.6 |
| 157 | 5.6 | 0 | 5.64 | 0.66 | 39.5 | NO | 4.4 |
| 158 | 5.6 | 0 | 5.55 | 0.65 | 38.8 | NO | 5.3 |
| 159 | 5.6 | 0 | 5.60 | 0.66 | 38.2 | NO | 6.2 |
| 160 | 5.9 | 0 | 5.90 | 0.69 | 37.5 | NO | 7.1 |
| 161 | 5.6 | 0 | 5.58 | 0.66 | 36.8 | NO | 8.0 |
| 162 | 5.8 | 0 | 5.80 | 0.68 | 36.1 | NO | 8.9 |
| 163 | 5.4 | 0 | 5.44 | 0.64 | 35.5 | NO | 9.7 |
| 164 | 5.8 | 0 | 5.82 | 0.68 | 34.8 | SI | 10.6 |

5.2. El modulo de riego en la huerta de la UAAAN-UL

Es importante mencionar que en esta huerta se presentan nogales de edades que oscilan entre los 13 y 18 años, es decir que durante este tiempo el manejo del agua fue por gravedad, sin embargo para dar respuesta a los objetivos de esta investigación fue necesario cambiar la forma de manejo del agua, para ello se establecimiento el modulo de riego, con la utilización del GPS, ello permitió georeferenciar el sitio de estudio, realizar el levantamiento topográfico, y ubicar las líneas regantes para cada tratamiento.

5.2.1. El GPS y la Georeferenciación de la nogalera

El sistema de posicionamiento global, permitió ubicar geográficamente y caracterizar el espacio en el cual se encuentra el huerto de nogal de la UAAAN-UL (Figura 34) con margen de error de centímetros. La nogalera se encuentra dividida en dos secciones de árboles de nogal en producción. En la primera sección con dimensiones de 110 metros de largo y 50 metros de ancho; es decir, 0.55 hectáreas, donde el manejo del agua es de riego por gravedad. En la segunda sección con dimensiones de 118 y 76 metros de largo y ancho respectivamente; es decir, 0.897 hectáreas y el manejo del agua es mediante el riego presurizado es decir aspersion, microaspersion y goteo enterrado, en proporciones iguales.

El mapa de la figura 34 en versión digital permite manejar información a manera sistemas de información geográfica como, del suelo (textura, salinidad, fertilidad, etc.), cultivo (área foliar, longevidad, enfermedades), sistema de riego (eficiencias, volumen de agua), etc. que ayude a comprender mejor la amplia gama de factores que intervienen en el desarrollo y producción del cultivo. Lo cual permite manejar y proporcionar a cada zona del campo cultivado el tratamiento agronómico apropiado.

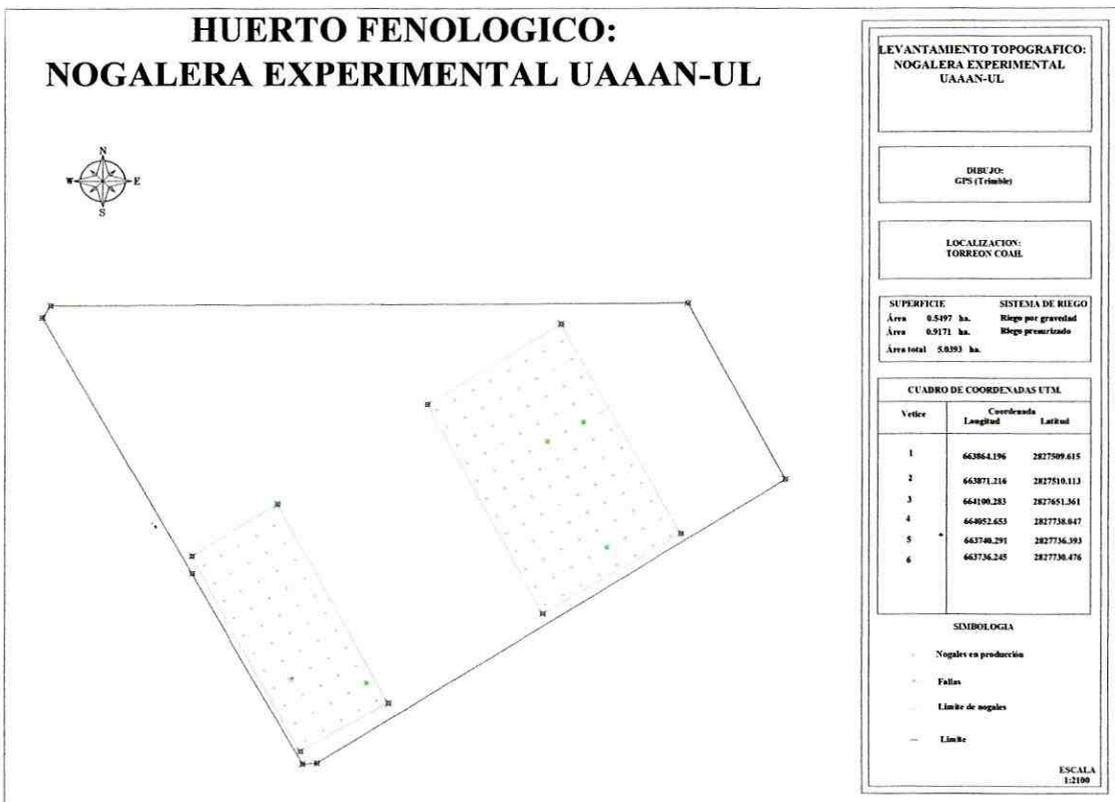


Figura 34. Levantamiento topográfico de la huerta de nogal UAAAN-UL.

En seguida se transfirió dicha georeferenciación hacia una imagen de satélite posteriormente a una hortofoto (Figura 35), mostrando un sistema real de coordenadas (X,Y), partiendo de tres puntos de control.

En la misma figura 35, se muestran, dos capas una, el diseño de riego y dos la hortofoto, así también se muestran las secciones de dicho módulo de riego, es decir la sección uno, se riega por gravedad, y la dos por presurizado (aspersión, micro, goteo enterrado), también se muestra la forma de manejar el suelo con y sin labranza.

Por otra parte se observa que en la sección uno el diámetro de la copa del árbol es mayor y por ende una cantidad mayor de área foliar, con respecto a la sección dos, donde el diámetro de copa es menor, así como el área foliar (80%) de la superficie total, mostrando una marcada heterogeneidad para esta característica del cultivo. Por ello permite inferir una productividad variable en esta última sección, lo anterior producto del manejo del huerto en los años anteriores, sin embargo el diseño permitió agrupar las edades y tamaños de copa.



Figura 35. Diseño del modulo de riego huerta UAAAN-UL hortofoto (2007).

Enseguida se muestran los resultados obtenidos del estudio de madera de los nogales para ello se presentan a continuación.

5.2.2. Crecimiento anual de madera

Los resultados obtenidos del crecimiento anual de madera de árboles con diferentes tratamientos correspondiente al año agrícola 2006, se presentan en la figura 36. El crecimiento anual de madera con el factor labranza de conservación fue de 160, 235 y 200 mm² para los sistemas de riego por goteo cintilla, microaspersión y aspersión respectivamente. Mientras que el crecimiento de madera con el factor de labranza intensiva fue de 255, 296 y 150

mm² bajo los sistemas de riego por goteo cintilla, microaspersión y aspersión respectivamente. Estos crecimientos no muestran consistencia que indique el impacto o efecto de un tratamiento en concreto. Lo anterior indica que un año de estudio es insuficiente para determinar el impacto resultado del manejo.

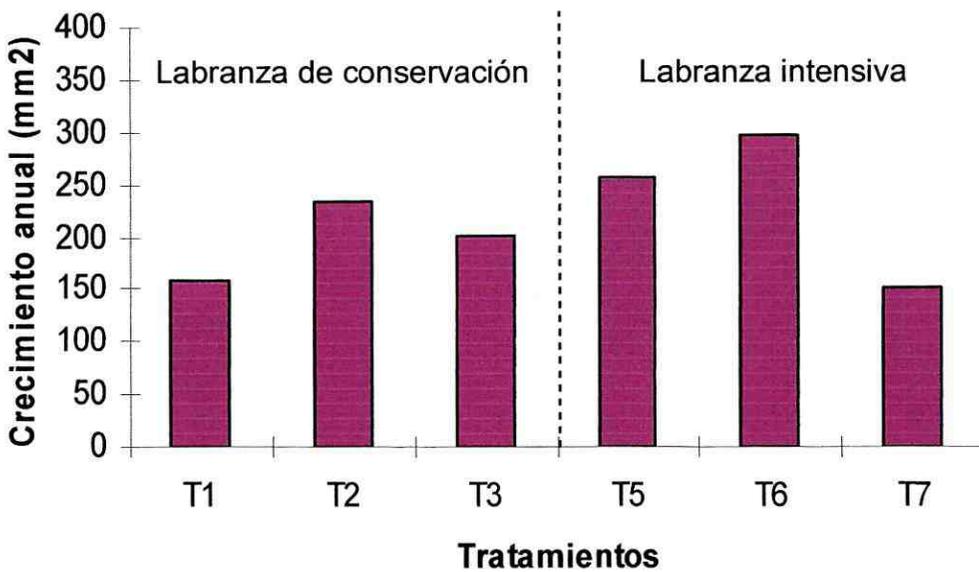


Figura 36. Crecimiento anual de madera en árboles de nogal pecanero correspondiente al año agrícola 2006 bajo diferentes tratamientos.

Sobre la misma rodaja en la cual se determinó el crecimiento anual correspondiente al año agrícola 2006, se cuantificó el crecimiento anual de madera correspondiente al año agrícola 2004 y 2005 (Figura 37). En esta figura se aprecia fuerte variabilidad del crecimiento anual de madera para los tres años de crecimiento analizados en los diferentes árboles muestreados, excepto

para el año 2004 presenta uniformidad. Esta variabilidad en el desarrollo de madera puede estar relacionada a la alternancia que de manera natural (por genética) presenta este tipo de cultivo; esto es, no solo deja de producir frutos (nuez), si no también detiene el desarrollo de madera.

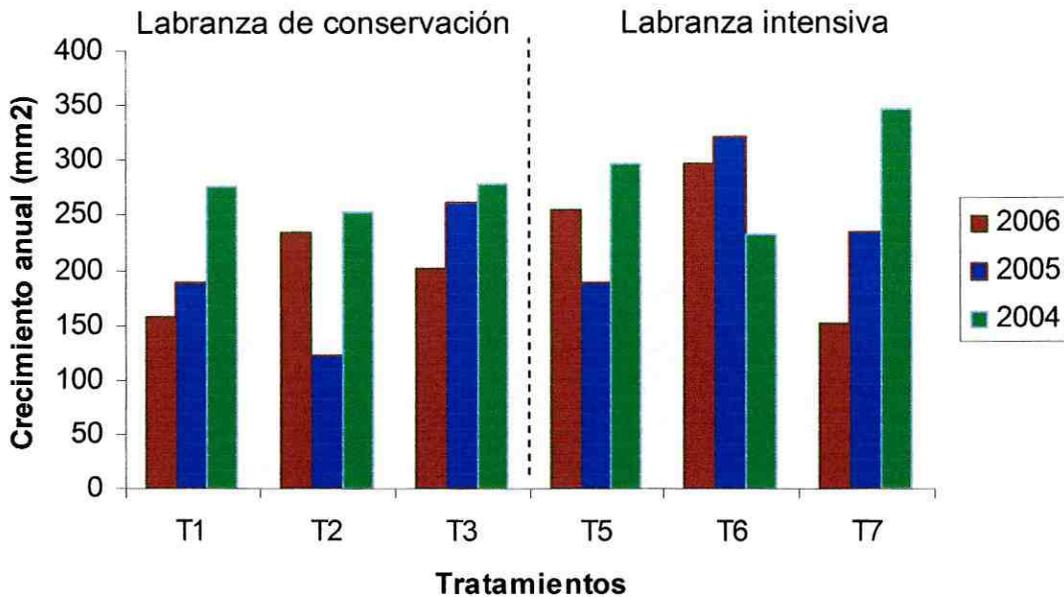


Figura 37. Crecimiento anual de madera en árboles de nogal correspondiente al año agrícola 2004, 2005 y 2006.

5.2.3. Productividad del nogal pecanero

Los resultados de la productividad de nuez pecanera correspondiente al año agrícola 2006 se presenta en la figura 38. En esta figura se observa la producción, con el factor labranza de conservación fue de 0.8, 0.9 y 0.9 ton ha⁻¹

para los sistemas de riego goteo cintilla, microaspersión y aspersión respectivamente, incrementándose notablemente a 1.3 ton ha^{-1} en árboles donde se ubica el riego de gravedad. Mientras que la producción, con el factor labranza intensiva fue de 10.8, 10.3, 11.8 y 10.7 ton ha^{-1} para los sistemas de riego goteo cintilla, microaspersión, aspersión y riego de gravedad respectivamente, notándose mínima variabilidad bajo este tipo de manejo.

El análisis de varianza realizado con cuatro repeticiones de cada tratamiento determino un coeficiente de variación de 29.5 por ciento, sin embargo este análisis indica que estadísticamente no existe diferencia significativa entre tratamientos.

Es conveniente mencionar que la productividad ligeramente superior obtenida mediante la labranza de conservación y los diferentes sistemas de riego no obedece al impacto de este tipo de manejo. La imagen de satélite muestra claramente mayor superficie de área foliar, por lo tanto mayor relación hoja-fruto que incrementa la producción del árbol; así lo señala Godoy y López (2000). Así también lo presenta el análisis de crecimiento de madera con valores ligeramente superiores para la labranza de conservación con respecto de la labranza intensiva.

Pro su parte el análisis estadístico no encontró diferencia significativa entre tratamientos con respecto al porcentaje de almendra, cuyos valores medios

oscilaron entre 59.8 por ciento del tratamiento dos y 58.2 por ciento del tratamiento tres, con un coeficiente de variación de 2.5 por ciento.

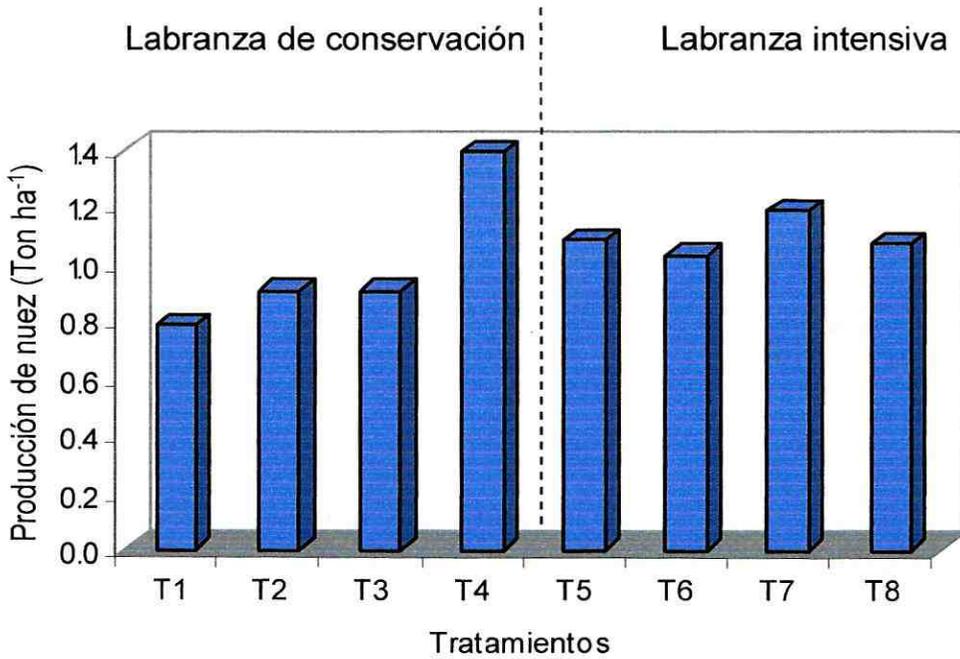


Figura 38. Productividad promedio del nogal bajo diferentes tratamientos.

VI. CONCLUSIONES

- En la determinación del consumo hídrico del nogal pecanero y la aproximación del riego en tiempo real. Los métodos analizados para estimar la evapotranspiración de referencia con respecto al tanque de evaporación tipo A, el modelo de Penman Monteith presenta la mejor correlación, seguido de Doorembos-Pruitt y por ultimo el modelo de Hargraves-Samani. Ello de acuerdo al coeficiente de correlación de 0.95, 0.89 y 70 respectivamente, para la cuenca baja. Así también, en el orden anterior se considera el grado de confiabilidad para determinar la evapotranspiración del cultivo, y consecuentemente la precisión en la fecha y cantidad de aplicación del agua de riego. Por otra parte, el consumo hídrico del nogal pecanero correspondiente al ciclo agrícola 2005, se manifestó ligeramente superior para la cuenca baja con respecto a la cuenca media del Nazas; es decir, si existe una variabilidad considerable en el consumo de agua para estos sitios, por lo tanto el manejo del agua debe ser distinto entre las dos subregiones.

El uso de estaciones climáticas telemétricas en red, el tratamiento de la información de la variabilidad climática y la sistematización de indicadores del riego mediante software permiten una mayor eficiencia en el manejo y uso de registros climáticos, con el propósito de proporcionar las cantidades de agua de riego requeridas por el cultivo en tiempo real. Lo anterior muestra la importancia de estaciones climáticas telemétricas como herramientas de

precisión para el pronóstico del riego en tiempo real y como aproximación de una agricultura de precisión.

- En el experimento realizado en el módulo de riego, la utilización del GPS y GIS permitieron apreciar diferencia entre la copa del árbol situados en las zonas de estudio; es decir las copas del árbol es mayor en la zona bajo riego de gravedad y por ende una cantidad mayor de área foliar, con respecto a la sección dos, ello representó un factor importante a considerar en este tipo de estudios. Así lo señalan los valores de crecimiento de madera y producción de nuez, ligeramente superiores en las zonas donde se observó mayor área foliar.

Sin embargo, el análisis de varianza entre tratamientos para la producción de nuez y porcentaje de almendra indica que no existe diferencia significativa entre ellos. Lo que indica que un año de observación para este tipo de investigación es insuficiente, es decir, el manejo de suelo y agua requiere de un tiempo mayor para presentar un efecto en los resultados.

VII. RECOMENDACIONES

- 1.- Realizar estudios que permitan calibrar adecuadamente la metodología propuesta con anterioridad, ello con la finalidad de obtener los mayores beneficios económicos y medioambientales en el cultivo de nogal pecanero.

- 2.- Realizar estudios para precisar esa diferencia de consumo hídrico entre las cuencas media y baja del Nazas.

VIII. LITERATURA CITADA

- Adams, J. C., and B. A. Thielges. 1977. Research underway on pecan timber improvement. *Louisiana Agricultura*, Vol. 20, No. 2, pp 14-15.
- Allen, R. G., L. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Álvarez S., J. D. y M. Anzueto M. de J. 2004. Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de chiapas, México. *Agrociencia* Vol. 38, No. 1, pp 13-22.
- Almario, R. U., V. Vonghavaravat, R. Wong and S. E. Kasim-Karakas. 2001. Effects of walnut consumption on plasma fatty acids and lipoproteins in combined hyperlipidemia. *American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 74, No. 1, pp 72-79.
- AgGPS, 2003. Manual de uso del sistema de posicionamiento global TRIMBLE 114. receiver. pp 15-30.
- Andersen, P. C. 1994. Lack of sunlight can limit pecan productivity in the southeastern U. S. *The Pecan Grower*. Georgia Pecan Grow. Assoc. Vol. 6, No 2, pp 20-24.
- Arreola A., J. G., E. Herrera A., R. Trejo C., A Flores H., R Parra Q. y A Borja R. 2006. Sunlight availability and nut production alter thinning of pecan trees (*Carya illinoensis* Koch). *Revista Chapingo*, Vol. 12, No. 2, pp 177-181.
- Arreola A., J. G., A. Lagarda M. y Ma. del C. Medina M. 2002. Fenología del nogal pecanero. *In: Tecnología de Producción en Nogal Pecanero*. Libro

Técnico No.3. Campo experimental de La Laguna-INIFAP. Matamoros Coah. México. pp 55-76.

Becerra P., M., J. Sáinz S. y C. Muñoz P. 2006. Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. Gestión y Política Publica, Vol. 15, No. 1, pp 111-143.

Bermejo N., A.B. y J. Meneses C. 2004. Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en Agricultura. Centro de Difusión de Tecnologías, Univ. Politécnica de Madrid.

Brison, R.F. 1976. Cultivo de nogal pecanero. México. CONAFRUT. pp 4, 34, 79, 83, 97.

Cahoon, J., J. Ferguson, D. Edwards, y P. Tacker. 1990. A microcomputer based irrigation scheduler for the humid mid-south region. Vol. 6, pp 289-295.

Charles, T. R., M. W. Smith and N. O. Manees. 2007. A comparison of return bloom and nonstructural carbohydrates, nitrogen, and potassium concentration in moderate and severe alternate-bearing pecan cultivars. Journal of the American Society for Horticultural Science, Vol. 132, No. 2, pp 1773-1777.

Chávez R., E., G. González C., M. Rivera G., J. Estrada A. y J.L. González B. 2006. El consumo hídrico en nogal pecanero, a partir del monitoreo ambiental y el uso de la telemetría. Revista Agrofaz, Vol. 6, No. 3, pp 315-322.

Chávez R., E. 2004. El flujo permanente y la evaluación del diseño de riego en huertos de nogal pecanero (*Carya illinoensis*, Koch) bajo sistemas de

manejo diferente. Tesis de Licenciatura UAAAN-UL, Septiembre de 2004.
pp 1-4.

CNA, 2003. Estadística del agua en México. [En línea].
ww.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Organismos/Central/Estadisticas/EstadisticasAgua_CNA.htm

CNA, 2004. Estadística del agua en México. Primera edición. México, D. F. pp
23-28.

CNA, 2007. Estadística del agua en México. Primera edición. México, D. F. pp
10-68.

Cuenca, R.H. 1989. Irrigation system design: An engineering approach.
Prentice hall. Englewood cliffs, New Jersey, EEUU.

Descroix L., J. F. Nouvelot y J. Estrada. 1997. Geografía de lluvias en una
cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la
Región Hidrológica 36. Folleto Científico No 10. CENID RASPA INIFAP –
ORSTOM. Gomez Palacio Dgo., Mexico. pp 52.

Descroix L., J. Estrada A. y J. Y. Loyer. 1993. Water resource in arid zone the
hydrological region 36 in northern Mexico. *In: Memorias del IV International
Conference on desert development.* México, D. F.

Descroix L., J. Estrada A., J. Y. Loyer e I. Orona C. 1992. Modelación de los
escurrimientos superficiales para el uso del agua en las grandes cuencas
del norte de México. Primer seminario internacional de manejo de cuencas
hidrológicas. Hermosillo Sonora, México.

De Juan J. 1993. Agronomía del riego. Mundi-Prensa. Madrid.

- Doorenbos, S. y W. O. Pruitt. 1997. Crop water requirements . Irrigation and drainage. Paper No. 24. FAO. Rome, Italy.
- Eduards, P.N. 2000. A brief history of atmospheric general circulation modeling. *In*: David A. Ronall, ed. General circulation development, past, present and future. Proceedings. pp 67-70.
- Falkenmark, M. and J. Rockström 2004. Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology. Earthscan. London, pp 247.
- FAO/AQUASTAT, 2006: Sistema de información mundial sobre agua y agricultura que proporciona una completa información sobre el estado de la gestión del agua para la agricultura alrededor del mundo, con especial énfasis en los países en vías de desarrollo y en los países en transición (estadísticas, perfiles de países, mapas y SIG-Sistemas de Información Geográfica). www.fao.org/ag/aquastat/
- FAO, 2007. La agricultura y la escasez de agua: enfoque programático de la eficiencia en el uso del agua y la productividad agrícola. Roma 25-28 de abril de 2007, 20º periodo de sesiones. [En línea]. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/meeting/001/j9206s.pdf>
- FAO, 1997. Report of the world food summit. Roma, Italy.
- FAO, 2001. Variabilidad y cambio del clima: un desafío para la producción agrícola sostenible. Informe Comité de Agricultura COAG.
- Favela E. Ch., J. I. Cortés F., G. Alcántar G., J. D. Etchevers B., G. A. Baca C. y J. Rodríguez A. 2000. Aspersiones foliares de zinc en nogal pecanero en suelos alcalinos. Terra, Vol. 18, No.3, pp 241-245.

- Fernández R., J.A. y G. Seco G. 1997. Sistemas de posicionamiento: de GPS a GNSS. Mundo Electrónico, Edición Internacional, Vol. 280, pp.46- 62.
- Fernández S., A., R. Recio J. y F. Ruiz, L. A. 2003. Análisis de imágenes mediante texturas: aplicación a la clasificación de unidades de vegetación. Revista International Review of Geographical Information Science and Technology, No. 3, pp. 143-159.
- Gale, W. J., C. A. Cambardella, and T. B. Bailey. 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. Journal of the American Society for Soil Science, Vol. 64, pp 201-207.
- Godoy A., C. e I. López M. 2000. Desarrollo de la almendra y germinación del fruto del nogal pecanero bajo cuatro calendarios de riego. Terra, Vol. 17 Num. 4, pp 305-311.
- Godoy A., C., Z. Xopiyaxtle J., I. Reyes J. y C.A. Torres E. 2005. Comportamiento hídrico de hojas y frutos de nogal pecanero y su relación con la calidad y germinación de fruto. Revista Interamericana. Terra, Vol. 23 Num. 4, pp 505-513.
- Godoy A., C. 2000. Métodos y técnicas de riego. *In*: Tecnología de Producción en Nogal Pecanero. Libro Técnico No.3. Campo experimental de La Laguna-INIFAP. Matamoros Coah. México. pp 127-142.
- Godoy A., C., I. Reyes J., C.A. Torres E., M.V. Huitrón R., J. Cristian Ch. y J. Morales V. 2000. Tecnología de riego en nogal pecanero. Libro científico No. 1. INIFAP, Matamoros Coah. México. pp 1-43.

- Godoy A., C., A. Pérez G., C.A. Torres E., L.J. Hermosillo e I. Reyes J. 2002. Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego pro goteo subsuperficial. *Agrociencia*, Vol. 37, No. 2, pp 107-115.
- Godoy A., C. y M.V. Huitrón R. 1998. Relaciones hídricas de hojas y frutos de nogal pecanero durante el crecimiento y desarrollo de la nuez. *Agrociencia*, Vol. 32, pp 331-337.
- Godoy A., C. y J.C. López Ch. 1997. Patrón de extracción y requerimientos de agua en diferentes etapas fenológicas en el nogal. *Terra*, Vol. 15, pp 1-6.
- González C., G., I. Sánchez C. y D. García A. 2004a. Relación entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo. *Terra*, Vol. 22, Num. 3, pp 279-287.
- González C., G., I. Sánchez C. y J. P. Rossignol. 2004b. Morfología de los poros de circulación del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. 19, No. 3, pp 15-23.
- González C., G. 2004. Relación entre disponibilidad de agua y la formación de anillos de crecimiento anual en huertos de nogal pecanero. *In: XII Simposium Internacional Nogalero "Nogatec"*. Torreón, Coahuila, México.
- González C., G. 2002. Fonctionnement hydrodynamique des sols de versant en amont de petits barrages en region semi-aride du nord Mexique (Ranch Atotonilco). Tesis doctoral Université d'Angers, Francia.
- González C., G. 1998. Influences des pratiques culturales sur la structure des couches supérieures de Quatre vergers de noyer pecan (*Karya illinoensis*,

Koch) irgues de la Comarca Lagunera (Mxique). Thès Diplome d'Etude Approfondí (DAE). Nacional de Science du Sol. Rennes, France.

González C., G., Villanueva D., J., O. Castillo I. y S. Cohen I. 2005. Efecto de la lámina de riego en el crecimiento radial de nogal pecanero (*Carya illinoensis koch*) mediante análisis de imágenes. *Agrofaz*, Vol. 5, No. 2, pp 863-868.

GPS SPS Performance Standard, Departamento de Defensa, EEUU, Octubre 2001.

Gutiérrez C., J., R. Khosla, S. Searcy, G. González C., E. Aranda H., A. Dzul L. y M. Rivera G. 2005. La sostenibilidad de los recursos para la producción de nuez de pecana mediante el uso de nuevas tecnologías. *Revista Transferencia ISTEM*.

Gutiérrez C., J. y A. García J. 2004. Aplicación de la tecnología de agricultura de precisión para la reducción del consumo de agua en México. *Revista Transferencia ITESM*, Vol. 17, No. 65.

Gutiérrez C., J., W. S. Stephen., R. Khosla y G. González C. 2006. Uso de nuevas tecnologías para reducir el consumo y degradación del agua de riego en la agricultura de México. *In: Memorias del taller regional iberoamericano preparatorio al IV foro mundial del agua. [En línea]. www.imacmexico.org/ev_es.php?ID=32313_201&ID2=DO_PRINTPAGE_-9k_-*

Hallaire, V., P. Curmi y Widiatmaka. 1997. Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain. *Etude et Gestions des Sol*, Vol. 4, pp 115-126.

- Hargreaves, G.H. and Samani. 1985. Reference crop evaluation for temperature. *Applied Engr. Agric.* Vol. 1, pp 96-99.
- Harmel, R. D., A. L. Kenimer, S. W. Searcy, and H. A. Torbert. 2004. Runoff water quality impact of variable rate sidedress nitrogen application. *Precision Agriculture*, Vol. 5, No. 3, pp 247-261.
- Harris, M. K. 2006. Pecan IPM and pecan nut casebearer response to pheromone and management in the U. S. and Mexico. *In: Memorias del XIV Simposium Internacional Nogalero*. Torreón Coah, México.
- Harris M. K., A. Fu, J. Millar. 2005. A new pheromone and management in the Nort of Mexico. *In: Memorias del XIII Simposium Internacional Nogalero*. Torreón Coah, México.
- Herrera, E. 1990. Fruit growth and development of Ideal and Western pecans. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 115, pp 915-923.
- Herrera, H. y T. Clavenger. 1996. Importancia económica de la industria nogalera en E. U. A. Servicio Cooperativo de Extensión Agrícola. NMSU. Guía Z-501.
- Herrera, E. A. 1983. Training young pecan tress. Guide H-605. Coop. Ext. Ser. New Mexico State Univerity.
- Herrera, E. A. 1996. Sunlight management. *Pecan South*, Vol. 29, No. 7, pp 6-10.
- Herring, T. A. 1996. The Global Positioning System. *Scientific American*, pp 32-38.

- Hillel, D. 1991. Introduction to soil physics. Academic Press. San Diego, Cal, EE.U.U. pp. 362.
- Ibáñez M. y V. Caselles. 1999. Evapotranspiración estimada a partir de la temperatura radiactiva; 2. Aplicación a imágenes AVHRR-NOAA. Revista de teledetección, No. 11, pp 1-11.
- Image-Pro Plus, 2001. Manual de uso de Image Pro Plus Version 4.5 "The Proven Solution for Image Analysis". pp 1-23.
- Jiyane J. y A. Zermeño G. 2003. Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego en zonas áridas. Agrociencia Vol. 37, Nom. 6, pp 553-563.
- Jones, J. B., B. Wolf y H. A. Mills. 1991. Plants analysis handbook. Micor-Macro Publishing Inc. pp 163.
- Lagarda M., A., Ma. del C. Medina M. y J Arreola A. 1998. Productive performance of 14 pecan cultivars in the arid zone of the North of Mexico. Third National Pecan Workshop Proceedings. Pecan Industry: Current situation and future challenges. U.S.D.A. pp 1994-200.
- Lagarda M., A. 1983. Requerimientos de temperatura durante el periodo de descanso y el periodo de crecimiento del nogal (*Carya illinoensis* Koch). CIANE-INIA-SARH. Seminarios técnicos Comarca Lagunera, Vol. 8, No. 5, pp 56-65.
- López E., J., L. Tijerina Ch., G. Haro A. y R. Arteaga R. 1991. Calibración de formulas de evapotranspiración mediante un cultivo de alfalfa como referencia en el área de Montecillo, Estado de México. Agrociencia, Vol. 2, pp 55-77.

- Loucks, W. L., and R. A. Keen. 1973. Submersion tolerance of selected seedling trees. *Journal of Forestry*, Vol. 71, No. 8, pp 496-497.
- Madden, G. D. and H. W. Tisdale. 1975. Effects of chilling and stratification of nut germination in northern and southern pecan cultivars. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 10, No. 3, pp 20-22.
- Maltos B., J. 2004. Fluctuación poblacional del gusano barrenador del ruezno, estimación de umbrales de acción y efectividad de insecticidas no convencionales. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. pp 66.
- Martínez R L. M., A Carranza M., A Aguirre G., J. J. Sandoval L., J. L. Olguín L. y E. J. Hueso G. 2003. El agua y su problemática. *In: Gaceta Universitaria*, Centro Universitario de la Costa Sur. [En línea]. comsoc.udg.mx/gaceta/paginas/297/297-20.pdf
- Martínez A., I. P. 2002. Fluctuación poblacional de pulgones y sus depredadores en huertas de nogal pecanero (*Carya illinoensis* Koch), con y sin alfalfa como cobertera vegetal en la Comarca Lagunera. Tesis de Maestría en Ciencias. FAZ-UJED, División de Estudios de Posgrado. Venecia, Durango, México. pp 172 .
- Martínez A., I. P., M. Ramírez D., U. Nava C. y J. M. Vázquez N. 2002. Fluctuación poblacional de pulgones y sus depredadores en huertas de nogal, con y sin alfalfa en la Comarca Lagunera. *In: Báez S. R. y J. J. Juvera B. (eds.). Actas del XXV Congreso Nacional de Control Biológico. Sociedad Mexicana de Control Biológico. Hermosillo, Sonora, México. pp.178-180.*

- McEachern, G. R. 1997. Planting and establishing pecan orchards. College Station. Texas A. & M. University. pp 9-12.
- McEachern, G. R. 1990. Growing fruits, berries and nuts southwest-southeast. Gulf Publishing Co. Houston, E. U. A. pp 65-71.
- Mendelsohn, R and W. Nordhaus. 1999. The impact of global warming on agriculture: A Ricardian Analysis: Reply. American Economic Review, Vol. 89, No. 4, pp 46-48.
- Medina M., M. del C. y R. Cano P. 2002. Aspectos generales del nogal pecanero. *In*: Tecnología de Producción en Nogal Pecanero. Libro Técnico No.3. Campo experimental de La Laguna-INIFAP. Matamoros Coah. México. pp 2.
- Medina M., M. del C. 2002. Desbalance nutrimental y respuesta en rendimiento en experimentos de fertilización en nogal pecanero. Terra, Vol. 20, pp 497-504.
- Medina M., Ma. del C. y J. F. Chávez G. 1999. Efecto del abastecimiento foliar de zinc sobre el balance nutrimental del nogal pecanero. Terra, Vol. 17 No. 4, pp 2994-298.
- Medina M., Ma del C. 1991. Comparación de dos metodos de interpretación foliar en nogal pecanero (*Carya illinoensis*) Terra, Vol. 9, No. 1, pp 52-58.
- Mejía E., S., E. Palacios V., A. Exebio G. y A.L. Santos H. 2002. Problemas operativos en el manejo del agua en distritos de riego. Terra, Vol. 20, No. 2, pp 217-225.
- Miyamoto, S. 2002. Guidelines for developing soil and water management programs: Irrigated pecans. TAES/TWRI Publication. TR-188 March 2002.

- Miyamoto, S., T. Riley, G. Gobran and J. Petticrew. 1986. Effects of saline water irrigation on soil salinity, Pecan tree growth and nut production. *Journal of the American Society for Irrigation Science*, Vol. 7, No. 2, pp 83-95.
- Miyamoto S. 1983. Consumptive water use of Irrigated Pecans. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 108, No. 5, pp 676-687.
- Mundo M., M. D. y P Martínez A. 2002. Sistema computarizado para la gestión del agua en sistemas de riego por gravedad en México. *Ingeniería del agua*, Vol. 9, No. 2, pp 171-181.
- Nava C., U. y O. Morales E. 2005. Manejo integrado de plagas del nogal en la comarca lagunera: situación actual de plagas y antecedentes de investigación. *In: Memorias del XIII Simposium Internacional Nogalero*. Torreón Coah, México.
- Navarro B., A., S. Figueroa B., Ch. Ordaz V. M. y C. González F. V. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *Terra*, Vol. 18, No. 1, pp 61-69.
- Nelson, T. C. 1965. Silvical characteristics of the commercial hickories. USDA Forest Service, Hickory Task Force Report 10, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC. pp 16.
- Notimex, 2005. Ciencia y tecnología. Crean aceite de nuez contra diabetes. Martes, 8 de Noviembre de 2005. México D. F.
- Núñez M., J.H. 2001. Planeación y establecimiento de la huerta. *In: El nogal pecanero en Sonora*. Libro Técnico No. 3. Campo experimental costa de Hermosillo. INIFAP. Hermosillo Son. México. pp 40-54.

- Núñez, M. J. y G. B. Valdez. 1991. Composición nutricional de variedades de nogal pecanero. La investigación edafológica en México 1990-1991. *In: Memorias del XV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo.* pp 86.
- NRCS, 2000. Agricultural waste management field handbook. Natural Resources Conservation Service-USDA. Washington.
- Ochoa del T., D. 2006. Estaciones meteorológicas en un sistema informático en red para la agricultura de precisión. Tesis de Maestría Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coah. México, Septiembre de 2006. pp 2-40.
- Ochoa del T., D. G. González C., A. Dzul L. y J. Gutiérrez C. 2006. Sistema informático en red para estaciones climáticas; una aproximación de una agricultura de precisión. *In: Memorias del XIV Simposium Internacional Nogalero.* Torreón Coah, México.
- Ojeda B., W. 1999. Pronóstico del riego en tiempo real. Primera edición, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. pp 60-90.
- Ojeda B., W., E. Sifuentes I. y H Unland W. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa México. *Agrociencia*, Vol. 40, No. 1, pp 13-25.
- ONU, 2006. 2° Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: "El agua, una responsabilidad compartida". pp 121-122.

- Orona C., I., G. González C. y J. de J. Espinoza A. 2004. La producción de nuez pecanera en la comarca lagunera. Folleto Técnico No. 1. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio Dgo. México. pp 1-15.
- Osuna C. E. S., B. Figueroa S., K. Oleschko, M de L. Flores D., M. R. Martínez M. y F. V. González C. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* Vol. 40, pp 27-38.
- Osburn, M. R. 1954. Insects and diseases of pecan and their control. Farmers' Bulletin 1839. Washington D. C, EUA, Department of Agriculture, pp 56.
- Palm, A. C., J. M. Swift, and L. P. Woome. 1996. Soil biological dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 58, pp 61-74.
- Peterson, J.K. 2003. *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch. Pecan. [En Línea] www.na.fs.fed.us/pubs/silvics_manual/volume_2/carya/illinoensis.htm - 25k
-
- Percy, R. G. 1983. Potential range of *Phymatotrichum omnivorum* as determined by edaphic factors. *Plant. Dis.* Vol. 67, pp 981-983.
- Puente G., A., A. Toca U. y A. Verde O. 2002. Nuez, análisis de su rentabilidad. *Revista Claridades Agropecuaria* No. 17. Ed. SAGARPA-ASERCA. México, D. F. pp 4-20.
- Reed S., M. A. 2006. Ingresos alternativos en una plantación de nogal. *In: Memorias del XIV Simposium Internacional Nogalero*. Torreón Coah, México.

- Ruiz G., A. y B. Ojeda W. 2007. Modernizar el riego, un imperativo para México. *In: XIV Congreso Nacional de Irrigación*, Octubre de 2007. Morelia, Michoacán.
- Santamaría C., J., Ma. del C. Medina M., M. Rivera G. y R. Faz C. 2002. Algunos factores de suelo, agua y planta que afectan la producción y alternancia del nogal pecanero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, Vol. 25, No. 2, pp 119-125.
- SAGARPA, 2006. Sistema de información agropecuaria de consulta. [En línea]. www.sagarpa.gob.mx/agricultura/info/da/pa/boletin/bol_inf_040806.swf
- SAGARPA, 2000. Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. México, D. F.
- Samaniego G., T. y T. Herrera P. 2003. Producción de nuez en nogales (*Carya illinoensis* [Wangeh] K. Koch) atacado por *Phymatotrichopsis omnivora* (Duggar) Hennebert. *Revista Mexicana de Fitopatología*, Vol. 21, pp 323-330.
- Sánchez C., I. 2005. Fundamentos del aprovechamiento integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos. Primera edición, INIFAP CENIDA-RASPA. Gómez Palacio Dgo. Mexico. pp 13-66.
- Sánchez I. C., J. Alfredo M., C. Hernández Y., M., Fortis H., L. Maeda V., C. López C., J.L. González B., M. Briones N., J. Estrada A., G. González C., I. Orona C., M. Rivera G., A. Cueto W., J. Villanueva D., A. Izaguirre M., E. Serrano G. y G. Contreras C. 2006. Manejo integral de la RH 36. Un enfoque de planeación de objetivos múltiples. *In: Memorias del taller regional iberoamericano preparatorio al IV foro mundial del agua* [En

línea].

[www.imacmexico.org/ev_es.php?ID=32313_201&ID2=DO_PRINTPAGE_-](http://www.imacmexico.org/ev_es.php?ID=32313_201&ID2=DO_PRINTPAGE_-9k_-)

[9k_-](#)

Sánchez M. y Chuvieco E. 2000. Estimación de evapotranspiración de cultivo de referencia, ET₀, a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Revista de de Teledetección, No. 14, pp 1-10.

Schaller, C. C. 1981. Culture and care of pecan trees in Arkansas. Leaflet 552. Coope. Exte. Ser. Division of Agriculture. University of Arkansas.

Shiklomanov, I.A. and Rodda, J.C. 2003. World water resources at the beginning of the twenty-first century. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Smith, M. W., P.L. Ager y D.S.W. Endicott. 1985. Effect of nitrogen and potassium in yield, growth and leaf elemental concentration of pecan. Journal of the American Society for Horticultural Science, Vol. 110, pp 446-450.

Sparks, D. 1995. Water, water, water, especially in September. Pecan South. Vol. 28, pp 4-5.

Sparks, D. 1996. A climatic model for pecan production under humid condition. Journal of the American Society for Horticultural Science, Vol. 121, pp 908-914.

Stockton, A. 1985. Interpreting pecan tree nutritional levels through leaf analysis. 19 western pecan conference procc. New Mexico State University. Coop. Ext. Service USA. Ppp 99-100.

- Tijerina Ch., L. 2000. Requerimientos hídricos de los cultivos bajo sistemas de fertirrigación. *Terra*, Vol. 17 Num. 3, pp 237-244.
- Toole, E. R. 1965. Pecan (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch). In *Silvics of forest trees of the United States*. H. A. Fowells, comp. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 271. Washington, DC. pp 121-123.
- Villaman P., R. L. Tijerina Ch., A. Quevedo N. y G. Crespo P. 2001. Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de montecillo, México. *Terra*, Vol 19 Num. 3, pp 281-291.
- Whelan, B., A. McBratney y B. Boydell. 2003. *The Impact of Precision Agriculture*. Australian Centre for Precision Agriculture. The University of Sidney. Sydney, Australia.
- Wolstenholme, B. N. 1979. The ecology of pecan trees. Part. 2. The Pecan Quarterly. Vol. 13, No. 3, pp 14-19.
- Wood, B.W., P.J. Conner, and R.E. Worley. 2003. Relationship of alternate bearing intensity in pecan fruit and canopy characteristics. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 38, pp 361-366.
- Worthington J.W., Lasswell, J.L.A. Stein and M.J. Mc. Farland. 1992. Now that you've decided to irrigate... How?....How much?...When ? ..Pecan South. 22: 6-18.
- Worley, R. E. 1991. Selective limb pruning intensity influence mature pecan trees and nut characteristics. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 26, pp 126-128.

Yates, I. E. and D. Sparks. 1990. Three-year-old pecan pollen retains fertility. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 115, pp 359-363.

Zalewski, M., G. A. Janauer, and G. Jolankai. 1997. Ecohydrology. A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources. *International Hydrological Programme UNESCO. Documentos técnicos sobre hidrología No. 7. Paris.*

Zhang, N., M. Wang y N. Wang. 2002. "Precision Agriculture – A World Overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 36, pp 113-132.

IX. NOMENCLATURA

| Símbolo | Descripción |
|------------------|---|
| Bh | Balance de agua en el suelo (mm) |
| S_s (↑) | Salidas del sistema (mm) |
| E_s (↓) | Entradas al sistema (mm) |
| ET_0 | Evapotranspiración de referencia (mm d^{-1}) |
| Pe | Precipitación efectiva (mm) |
| ET_c | Evapotranspiración del cultivo (mm d^{-1}) |
| K_c | Coefficiente de cultivo |
| R_n | Radiación neta en la superficie de cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) |
| G | Densidad del flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) |
| T | Temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$) |
| U_2 | Velocidad del viento registrada a 2 metros de altura (m s^{-1}) |
| e_s | Presión de vapor de saturación (kPa) |
| e_a | Presión de vapor (kPa) |
| $e_s - e_a$ | Déficit de presión de vapor de saturación (kPa) |
| Δ | Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) |
| γ | Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) |
| t_{\max} | Temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$) |
| t_{\min} | Temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$) |
| t_{med} | Temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$) |
| R_0 | Radiación solar extraterrestre (mm d^{-1}) |

| | |
|----------------|--|
| f_e | Factor de ajuste por la elevación sobre el nivel del mar |
| a y b | Coefficientes de calibración climática |
| ρ | Porcentaje medio diario anual de insolación |
| K_p | Coefficiente del tanque |
| E_{pan} | Evaporación de tanque (mm d^{-1}) |
| θ_i | Humedad residual del suelo (%) |
| θ_{i-1} | Humedad del suelo en un tiempo posterior (%) |
| θ_c | Humedad mínima tolerable por el cultivo (%) |
| θ_{CC} | Humedad del suelo en el punto de capacidad de campo (%) |
| θ_{PMP} | Humedad del suelo en el punto de marchitamiento permanente (%) |
| HA | Humedad aprovechable o agua potencialmente extraíble (%) |
| d | Diámetro del tronco del árbol (cm) |
| N | Número de árboles por hectárea |
| θ_m | La humedad gravimétrica (%) |
| M_{ag} | Masa del agua en la muestra (gr) |
| M_{ss} | Masa de la muestra seca (gr) |
| θ_v | Humedad volumétrica (%) |
| V_{ag} | Volumen del agua en la muestra (ml) |
| V_{ss} | Volumen de la muestra seca (cm^3) |
| f | Déficit máximo de humedad permisible por el cultivo (%) |
| ρ_g | Densidad del suelo (gr/cm^3) |
| ρ_{ag} | Densidad del agua (gr/cm^3) |
| M_s | Masa de sólidos del suelo (gr) |
| V_T | Volumen total de sólidos (cm^3) |