



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y
TECNOLÓGICAS

POSGRADO EN BIOCENCIAS

VARIACIONES EN LA TASA FOTOSINTÉTICA EN NOGAL PECANERO (*Carya illinoensis*) EN LA COSTA DE HERMOSILLO, MÉXICO.

TESIS

que para obtener el grado de:

MAESTRO EN BIOCENCIAS

presenta:

MARTÍN DE JESÚS CHÁVEZ VALENZUELA

Hermosillo, Sonora, México

27 de abril de 2023

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

VARIACIONES EN LA TASA FOTOSINTÉTICA EN NOGAL PECANERO
(*Carya illinoensis*) EN LA COSTA DE HERMOSILLO, MÉXICO.

TESIS

que para obtener el grado de:
MAESTRO EN BIOCENCIAS

presenta:

MARTÍN DE JESÚS CHÁVEZ VALENZUELA

Hermosillo, Sonora a 27 de abril del 2023.

Asunto: Cesión de derechos

**UNIVERSIDAD DE SONORA
P R E S E N T E.**

Por este conducto hago constar que soy autor y titular de la obra denominada **Variaciones en la tasa fotosintética en nogal pecanero (*Carya illinoensis*) en la Costa de Hermosillo, México**, en los sucesivos LA OBRA, realizada como trabajo terminal con el propósito de obtener el Grado de **Maestro en Biociencias**, en virtud de lo cual autorizo a la Universidad de Sonora (UNISON) para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución, distribución pública, distribución electrónica y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios de la institución y se integren a los repositorios de la universidad, estatales, regionales, nacionales e internacionales.

La UNISON se compromete a respetar en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente.

De la misma manera, manifiesto que el contenido académico, literario, la edición y en general cualquier parte de LA OBRA son de mi entera responsabilidad, por lo que deslindo a la UNISON por cualquier violación a los derechos de autor y/o propiedad intelectual y/o cualquier responsabilidad relacionada con la OBRA que cometa el suscrito frente a terceros.

ATENTAMENTE


Martín de Jesús Chávez Valenzuela

Nombre y Firma del Autor


LIC. GILBERTO LEÓN LEÓN
Abogado General
UNIVERSIDAD DE SONORA

Hermosillo, Sonora, México

abril, 2023.



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS
POSGRADO EN BIOCENCIAS



APROBACIÓN

Los miembros del Comité designado para revisar la tesis intitulada "Variaciones en la Tasa Fotosintética en Nogal Pecanero (*Carya illinoensis*) en la Costa de Hermosillo, México" presentada por Martín de Jesús Chávez Valenzuela la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Biociencias con Opción en Ecología y Sustentabilidad de Zonas Áridas.

**Dr. Alejandro Emilio Castellanos
Villegas**
Director y Presidente

Dr. Julio César Rodríguez
Co-Director

Dr. Alf Enrique Meling López
Secretario

Dr. Samuel Ortega Farías
Sinodal externo

DEDICATORIA

A mis padres

Primeramente, dedico este trabajo a mis padres. Desde mi nacimiento hasta el día de hoy, me han ayudado a reconocer los mejores caminos de la vida. Fueron mis primeros mentores y me enseñaron los valores que me apartan de las distracciones.

A mi hermana

Este escrito también se lo dedico a mi primera compañera, a mi hermana. Junto con mis padres me ayudó a comprender la importancia de la familia y la relación eterna que nos une.

A mi equipo

Dedico esta investigación a cada una de las personas que estuvieron junto a mi durante mis etapas como estudiante y como profesionista. Gracias a ustedes pude forjar mi carácter laboral. Específicamente, menciono al Dr. Julio César Rodríguez, que me invitó al mundo de la investigación y al M.C. Jesús Armando Dojaque Guillén, que fue mi más cercano colega. Espero poder trabajar con ustedes de nuevo.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de tesis fue posible gracias al apoyo del Fondo de la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) y la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID). Mediante el proyecto “Incremento de la eficiencia y cuidado del agua mediante experiencia conjunta entre comunidades de Sonora-México y Linares-Chile”. Se agradece al Productor cooperante y personal técnico del predio, Viñas de la Costa, Costa de Hermosillo, México. De igual manera, la realización de este proyecto fue gracias al constante apoyo por parte de CONACYT.

Mi más atento reconocimiento y agradecimiento a la Universidad de Sonora, que me brindó la plataforma para el desarrollo de esta investigación. Así mismo, agradezco el acertado asesoramiento y apoyo por parte de mi comité tutorial, conformado por el Dr. Alf Enrique Meling López, el Dr. Samuel Ortega Farías y la co-dirección entre el Dr. Alejandro Emilio Castellanos Villegas y el Dr. Julio César Rodríguez, que me guiaron pacientemente hasta la conclusión de este arduo trabajo. Gracias por la oportunidad de participar en este trabajo de tesis.

Por último, se le agradece a cada uno de mis colegas y compañeros, que estuvieron presentes durante el desarrollo de la maestría.

RESUMEN

El aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera (N_2O , CH_4 , CO_2) ha ocasionado cambios en la temperatura, patrones de precipitación y evapotranspiración potencial, que podrían impactar la viabilidad de los cultivos. En perennes como nogal pecanero (*Carya illinoensis*) existe un importante potencial de fijación de carbono, por sus características como longevidad y biomasa aérea. Considerando la importancia económica de este cultivo en la región, se estudiaron los componentes y tasas de fotosíntesis en la especie, y su relación con déficit de presión de vapor, temperatura del aire, transpiración, conductancia estomática, temperatura de las hojas, potencial hídrico del tallo, productividad primaria bruta e índice de área foliar. Para ello, se realizaron mediciones semanales de fotosíntesis, seleccionando hojas al azar en tres árboles dentro de la plantación, así como mediciones meteorológicas y de intercambio de gases. Los resultados muestran valores instantáneos hasta de $20 \mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante la primavera y los días más cálidos del verano. Una tendencia a la disminución de la fotosíntesis fue notable en el mes de julio y en los meses de otoño, después de la cosecha, aunque la actividad fotosintética continuó hasta diciembre. De las variables exploratorias que más afecta la variación en la tendencia del total de variables es la transpiración y la temperatura de las hojas ($p < 0.05$). Se recomienda el monitoreo constante de los procesos de ganancia de carbono individuales y del cultivo para sugerir mejores prácticas de manejo.

ABSTRACT

The rise of Greenhouse Gases in the atmosphere (N_2O , CH_4 , CO_2) have led to changes in temperature, in precipitation patterns and in potential evapotranspiration, which may change the viability of crops. In pecan walnut (*Carya illinoensis*) crops, atmospheric carbon fixation is an important ecosystem service, because of its characteristics such as crop longevity and aerial biomass. Given the economic importance of this crop, components and carbon gain rates were studied in one cycle, and its relationship with vapor-pressure deficit, air temperature, transpiration, stomatal conductance, leaves temperature, stem water potential, gross primary productivity, and leaf area index. Measurements were made every week by selecting leaves from 3 random trees in the plantation. Additional meteorological and gas exchange measurements were made as well. Results show photosynthetic values up to $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ during spring and lower values during warmer summer days. The decline in photosynthesis was noticeable in July and fall season after harvesting, although photosynthesis activity was present until December. Carbon gain data showed patterns that were found in individuals. Constant monitoring is recommended as much as in individuals, as in whole plantation, so improving management suggestions can be made.

ÍNDICE GENERAL

	Página
APROBACIÓN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	5
I.1. Descripción de la especie.....	5
I.2. Fenología	6
I.3. Cambio climático.....	7
I.4. Balance de carbono del ecosistema.....	8
I.5. Fotosíntesis y su papel en el ciclo del C en los ecosistemas.....	9
I.5.1. Conductancia estomática	10
I.5.2. Transpiración.....	11
I.6. Panorama de fotosíntesis en nogal pecanero.....	11
I.7. Respuestas fotosintéticas	12
I.7.1. Temperatura ambiental	12
I.7.2. Déficit de presión de vapor.....	12
I.7.3. Luz.....	13
I.8. Índice de área foliar	13
I.9. Potencial hídrico	13
I.10. Cultivo de nogal pecanero	14
II. HIPÓTESIS	16
III. OBJETIVOS	17
III.1. Objetivo general.....	17
III.2. Objetivos específicos.....	17
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	18
IV.1. Área de estudio	18
IV.2. Sitio experimental	19
IV.3. Variables ecofisiológicas y ambientales	20
IV.4. Torre de covarianza.....	21
IV.5. Potencial hídrico	21
IV.6. Fotosíntesis	22
IV.7. Índice de área foliar.....	24
IV.8. Análisis estadístico.....	25

V. RESULTADOS.....	26
V.1. Variables ecofisiológicas y ambientales.....	26
V.2. Fotosíntesis.....	33
V.3. Relaciones de fotosíntesis y variables ecofisiológicas y ambientales	38
VI. DISCUSIÓN	47
VI.1. Respuesta fotosintética a la luz	47
VI.2. Recepción lumínica en el dosel.....	48
VI.3. Demandas atmosféricas en una zona árida.....	50
VI.4. Estado del agua	53
VI.5. Fotosíntesis a través del ciclo productivo	54
VI.6. Comportamiento general del sistema	56
VII. CONCLUSIONES.....	58
VIII. LITERATURA CITADA.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas fenológicas de nogal pecanero en la Costa de Hermosillo. La línea continua azul representa las temperaturas promedio del aire. El registro fue tomado en el campo Viñas de la Costa por el Ing. Abraham Gámez.....	7
Figura 2. Esquema del agroecosistema con las variables exploratorias: Fotosíntesis, transpiración, temperatura de hoja (Thoja °C), conductancia estomática (gs), potencial hídrico del tallo (Ψ_{smd}), productividad primaria bruta (GPP), déficit de presión de vapor (DPV), temperatura ambiental (T°) y índice de área foliar (LAI). Creado con BioRender.com.	10
Figura 3. Costa de Hermosillo, Sonora, México. El sitio experimental se encuentra ubicado con el marcador. Imagen obtenida de Google Earth Pro.	18
Figura 4. Ubicación de la parcela Viñas de la Costa en la carretera Hermosillo Bahía de Kino. Imagen obtenida de Google Earth Pro.	19
Figura 5. Medición con el Li-6400XT, a una altura entre 8 y 10m por fuera del dosel de los árboles.	23
Figura 6. Procedimiento de la toma de datos de LAI. Ruta en diagonal a las hileras de los árboles con toma de datos cada 3 metros.	24
Figura 7. Datos promedio de la temperatura ambiental capturados por el LI-6400XT (izquierda) y la torre de covarianza (derecha).	27
Figura 8. Valores promedio del DPV a través del ciclo productivo; los datos fueron recolectados por el LI-6400XT (izquierda) y la torre de covarianza (derecha).	28
Figura 9. Evolución del comportamiento del índice de área folia (LAI).	29
Figura 10. Evolución de la conductancia estomática en nogal pecanero durante el estudio.	30
Figura 11. Evolución de la transpiración al momento de muestreo.	31
Figura 12. Evolución de la temperatura de las hojas al momento de muestreo.	32
Figura 13. Comportamiento de la tasa fotosintética a través del ciclo productivo del año 2020. Los datos son promedios por jornada de medición con D.E.	34
Figura 14. Gráfico de superficie de curvas de respuesta a la luz (0-2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Las curvas fueron tomadas desde el 12 de mayo hasta el 11 de diciembre.....	36
Figura 15. Curvas de respuesta a la luz antes (A), durante (B) y después (C) de la caída fotosintética de verano.	37
Figura 16. Datos recopilados con el Li-6400XT. Regresión lineal entre fotosíntesis y las variables de conductancia estomática, transpiración y temperatura de la hoja ($P < 0.001$).	40

Figura 17. Gráfico temporal con comparación entre la productividad primaria bruta (GPP) y la fotosíntesis neta (An).....	41
Figura 18. Regresión lineal entre GPP y fotosíntesis neta. Se muestra la relación entre ambas variables ($P < 0.05$).....	42
Figura 19. Valores de potencial hídrico (Ψ_{smd}) y el efecto en la conductancia estomática (gs), fotosíntesis neta (An) y transpiración (Tr).....	43
Figura 20. Evolución de la fotosíntesis neta (An) e índice de área foliar (LAI).	44
Figura 21. Análisis de componentes principales. Distribución de las jornadas de medición de fotosíntesis y variables exploratorias, divididos mes.	45

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.** Efecto temporal con base en meses en los árboles de nogal pecanero en su respuesta fotosintética. Los valores de efectos principales son promedios \pm D.E. de número de muestras desiguales. Los valores con diferente superíndice dentro de la misma columna de efectos principales son significativamente diferentes ($p < 0.05$).35
- Tabla 2.** Atributos fotosintéticos antes, durante y después de la caída de los valores de fotosíntesis en verano. R_o = respiración en oscuridad ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), ϕ = rendimiento cuántico de la fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$ fotones), A_{max} = fotosíntesis máxima, PSL= punto de saturación de la luz, PCL= punto de compensación de la luz.38
- Tabla 3.** Valores Promedio de Déficit de Presión de Vapor (DPV), Temperatura Ambiental (T) Fotosíntesis Neta (A_n), Conductancia Estomática (gs) y Transpiración (Tr), Uso Eficiente del Agua Intrínseca (UEA_{instrins}) y Uso Eficiente del Agua Instantánea (UEA_{inst}) divididos por mes. Los valores instantáneos son promedios \pm D.E. de 3 jornadas por mes.39

INTRODUCCIÓN

El aumento de las actividades antropogénicas alrededor del mundo ha creado un escenario donde la problemática ambiental y el cambio climático se agudizan año tras año. Lo anterior está ligado al aumento de las temperaturas superficiales del planeta que se derivan del consumo de combustibles fósiles y el cambio de uso del suelo, entre otras actividades (Bolin et al., 1986). La tendencia en el aumento de la temperatura se acentúa con el incremento de las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) tales como el monóxido de carbono (CO), clorofluorocarbonados (CFC's), óxidos de nitrógeno (NO_x), metano (CH₄) y, principalmente, dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera (Ordóñez y Masera, 2016). Por otro lado, el uso del suelo para fines agrícolas y silvícolas representa el 23% de las emisiones antropogénicas de los gases de efecto invernadero (IPCC, 2019).

La agricultura es una de las actividades productivas que más altera los ecosistemas, tanto por el cambio de uso de suelo, como por el manejo agronómico que propicia la pérdida del carbono (C) fijado por las plantas y, por el uso extensivo de fertilizantes de origen químico (Lal, 2004). Dicho lo anterior, es de suma importancia el manejo de los cultivos para mitigar el impacto ambiental.

Entre los problemas de las actividades agrícolas, que se relacionan al cambio climático, se incluyen los aumentos en la temperatura del aire, las alteraciones en los patrones de precipitación y los cambios en la evapotranspiración potencial de los cultivos (Dinpashoh et al., 2019). Un resultado adverso de los problemas mencionados es la baja viabilidad económica de los cultivos que conlleva una recaída en la seguridad alimentaria de la población y un impacto directo a la economía de las regiones agrícolas (FAO, 2014).

Para hacer frente a ciertos problemas ambientales se necesita una mejor gestión de los proyectos agrícolas y una reducción significativa en las emisiones de los GEI en todos los sectores (IPCC, 2019); dentro de las estrategias para mejorar el manejo de los suelos agrícolas se encuentra la concientización de los procesos y servicios ecosistémicos que ofrecen los cultivos. Por ejemplo, la transferencia del carbono atmosférico al suelo por participación de las plantas es un proceso importante para abatir las concentraciones elevadas de CO₂ en la atmósfera

(FAO, 2014). Este proceso se realiza por medio de la fotosíntesis en las plantas, donde alrededor del 40% de la materia seca de las plantas consiste en carbono fijado por el proceso fotosintético (Lambers et al., 2019). Para que se lleve a cabo un eficiente en las plantas es necesario la disponibilidad de agua, nutrientes, entre otros factores.

Las zonas áridas y semiáridas, como la Costa de Hermosillo, representan alrededor del 40% de la superficie terrestre del planeta y demuestran su capacidad dominante en el consumo del CO₂ por parte los ecosistemas (Smith et al., 2017). Por otro lado, los agroecosistemas ocupan alrededor de un tercio del área continental del planeta, pero su contribución al ciclo de carbono global permanece incierta. Existe la hipótesis de que pudieran estar capturando más CO₂ que los ecosistemas naturales, pero este carbono capturado se emite en algún otro lugar, por ejemplo, con las alteraciones provocadas al suelo por el uso de maquinaria pesada (Gilmanov et al., 2010).

El secuestro de carbono mediante los cultivos agrícolas se ha establecido como una estrategia que debe funcionar de acuerdo con la propuesta 4x1000, presentada en la COP21 y explicada por Minasny (2017). Esta propuesta tiene como objetivo aumentar un 0.4% del carbono en los suelos como promedio anual en los primeros 0.30 - 0.40 m de superficies agrícolas, dado que las plantas pueden capturar alrededor del 30% de las emisiones anuales.

Existe evidencia que los cultivos anuales tienen comportamientos mixtos en relación con el secuestro/emisión de Gases Efecto Invernadero (GEI). Sin embargo, en cultivos perennes, Zcandellari et al. (2016) reporta una fijación y un secuestro de carbono de 1.0 kg⁻¹ m⁻² en un cultivo de vid y resultados similares fueron obtenidos por Rodríguez et al. (2018) en nogal pecanero. Este secuestro de carbono por parte de las plantas perennes es importante por sus características, como larga estación de crecimiento anual y longevidad, aunque existe evidencia que el secuestro del carbono es fuertemente impactado por el manejo agronómico y variables ambientales como la temperatura (Carlisle et al., 2010).

Uno de los cultivos perennes más importantes en México es el nogal pecanero (*Carya illinoensis*); una especie de clima templado perteneciente a la familia Juglandaceae, cuyo taxón es famoso por su alto valor en el sector económico en el país. Su producción se destaca principalmente en los estados del norte como Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango y Nuevo León (CONACYT, 2017). En comparación con los otros estados, Sonora ha triplicado su

superficie dedicada a los cultivos de Nogal Pecanero en 8 años (SIAP-SAGARPA, 2012). La mayoría de estos cultivos se encuentran cercanos a la Costa de Hermosillo, Sonora, ocupando el 12.29% del territorio de Hermosillo dedicado a la agricultura (INEGI, 2009). Dicho esto, se muestra gran interés en la recolección de información sobre respuestas fisiológicas de los cultivos de nogal pecanero, ante diversos factores ambientales y de manejo.

Existen diversos problemas en cada uno de los ciclos productivos del nogal pecanero como la alternancia, la caída del fruto y la viviparidad (germinación precoz) (Tarango, 2012). El escenario contemporáneo del cultivo de nogal pecanero en la Costa de Hermosillo se enfrenta a una serie de problemáticas que manifiestan sus efectos en la producción y rendimiento final del cultivo. Para comprender estos fenómenos es necesario el monitoreo y registro constante de diversas variables ecofisiológicas para determinar las etapas críticas del ciclo productivo. De esta manera, se determinan las tendencias en las respuestas del cultivo al ambiente y su manejo agronómico. Es evidente que para que una huerta de nogal pecanero sea rentable, depende mayormente, en la eficiencia de absorción y uso de la energía lumínica por medio de la fotosíntesis que estimula la producción biológica de materia seca (Lombardini et al., 2009).

A nivel agroecosistema, la fotosíntesis es uno de los procesos primordiales que determinan la productividad, energía química y oxígeno del medio; lo anterior comprende una parte del balance del carbono en un ecosistema y depende de diversas variables ambientales y fisiológicas (Schulze et al., 2019). Además, el proceso fisiológico de la fotosíntesis requiere de condiciones adecuadas para aumentar su eficiencia como la disponibilidad de agua y nutrientes, una temperatura y luz óptima (Lambers y Oliveira, 2019). Sin embargo, las condiciones ambientales extremas, como en zonas áridas, causan respuesta de estrés en las plantas; paralelamente, se ralentizan las tasas de crecimiento y otros procesos fisiológicos (Schulze et al., 2019). Entre los indicadores para analizar el funcionamiento y el rendimiento de los procesos fotosintéticos en las hojas son las curvas de respuesta a la luz (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

En los últimos años ha existido un interés por describir las tasas fotosintéticas de diferentes variedades de nogal pecanero y su respuesta ante diversas variables ambientales o manejos agronómicos. Por lo general, se busca observar el comportamiento de la fotosíntesis en diferentes escenarios para eficientizar el uso de los recursos del sistema agrícola y, de esta manera, mejorar el manejo del cultivo. Datos reportados por Heerema (2014) presentaron tasas

de fotosíntesis alrededor de los $12 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, comparando hojas de brotes con frutos y sin frutos; por otro lado, Lombardini reportó tasas alrededor de $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en las variedades “Stuart” y “Pawnee”. Este último estudio comparó las hojas que se encontraban dentro y fuera del dosel, esta información es útil para la planificación de las podas anuales de los árboles.

Otra variable de interés en el efecto de la fotosíntesis es el recurso hídrico. La eficiencia del manejo de los riegos es importante para mantener rendimientos redituables y para distribuir el agua en las diferentes regiones agrícolas. Othman *et al.* (2014), reportó la respuesta fotosintética con base en diferentes niveles de potencial hídrico de los tallos; sus datos presentan valores máximos de fotosíntesis alrededor de los $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Otros factores pueden influir en la respuesta fotosintética como el clima, la variedad y el manejo del cultivo, así mismo, es importante observar estos comportamientos para manejar el cultivo en cada una de sus etapas fenológicas como lo son el llenado y madurez del fruto.

En esta investigación se planteó estudiar la respuesta fotosintética de individuos de nogal pecanero en una huerta ubicada en una zona árida cálida como la Costa de Hermosillo, como una manera de entender la respuesta de la fotosíntesis en estas plantas, a variables ambientales (radiación, temperatura ambiental, déficit de presión de vapor, humedad de suelo), y su impacto en la productividad primaria bruta.

I. ANTECEDENTES

I.1. Descripción de la especie

El nogal pecanero pertenece a la familia *Juglandaceae*, a la cual pertenecen árboles que producen drupas. Los géneros más importantes de esta familia es *Juglans* y *Carya*, del primero se destaca la nuez de castilla (*J. regia*) y del segundo el nogal pecanero (*C. illinoensis*) (Nuñez-Moreno et al., 2001). La distribución natural del pecanero es, principalmente, en los estados de Texas, Oklahoma, Arkansas, Luisiana y Mississippi, a las orillas de los ríos y otros cuerpos de agua. El límite sur de la distribución natural en América del Norte es México y se han reportado nogales nativos en 14 estados mexicanos. (Brison, 1976).

En México se han reportado 5 especies de *Carya*, entre ellas *Carya illinoensis* y cuentan con una serie de características para su identificación en campo. Actualmente, la especie *Carya illinoensis* es de gran importancia económica en diversas regiones agrícolas alrededor del mundo y es considerada como uno de los frutales más rentables en proyectos agrícolas (Calderón, 2021).

Los principales órganos de un nogal son las raíces, tallos, flores y fruto. El primer órgano en desarrollarse, después de la germinación, son las raíces. El sistema radicular tiene una raíz principal y, a su vez, tiene raíces laterales. Los tallos son leñosos, pueden desarrollarse varios troncos principales y, en cada nudo se pueden encontrar de una a tres yemas (Nuñez-Moreno et al., 2001). Los árboles, en su fase de maduración del fruto, el pericarpio y el mesocarpio se secan y, al endocarpio (cáscara) y a la semilla (almendra) se le llama nuez. Los árboles son caducifolios y pueden alcanzar alturas de 15-20 metros. El pecanero es una planta diploide, monoica y dicogámica, hay variedades que desarrolla primero la flor femenina y después la masculina, y en otras variedades el caso es a la inversa (Brison, 1976). Generalmente, tienen hojas compuestas, los brotes terminales son vellosos y los laterales son parduscos con glándulas amarillentas dispersas, mientras que sus folíolos son ligeramente lepidotas, no lustrosos y falcados. (Manning, 1949).

I.2. Fenología

La fenología estudia el comportamiento de las especies y su respuesta ante el ambiente donde se desarrollan. Por ejemplo, las plantas pueden diferir en su comportamiento fisiológico, morfológico y bioquímico dependiendo de la especie y del hábitat determinado (Tarango, 2012).

En cultivos perennes se pueden observar las etapas fenológicas a través del año, conforme cambia el clima. El nogal pecanero tiene una serie de etapas que se presentan en un año natural, donde la especie desarrolla su ciclo productivo. Entre los mismos nogales puede haber diferencias en el desarrollo y presentación de sus fases fenológicas, dependiendo de la variedad y edad del cultivo. Es de suma importancia tener conocimiento de la fenología del nogal pecanero para poder realizar un manejo agronómico de acuerdo con la variedad y el clima del sitio (Tarango, 2012).

Las etapas fenológicas se aprecian conforme el clima del sitio cambia a través del año natural (Figura 1). En las temporadas de frío se presenta la dormancia del nogal pecanero, cuando las hojas llegan a su senescencia y se encuentra en un estado de reposo para la siguiente temporada. A grandes rasgos, las fases fenológicas se presentan en el siguiente orden (de acuerdo con el clima): brotación, elongación del brote, emergencia y desarrollo de flores, floración, crecimiento del fruto, maduración del fruto y senescencia y comienzo de dormancia (Han et al., 2018).

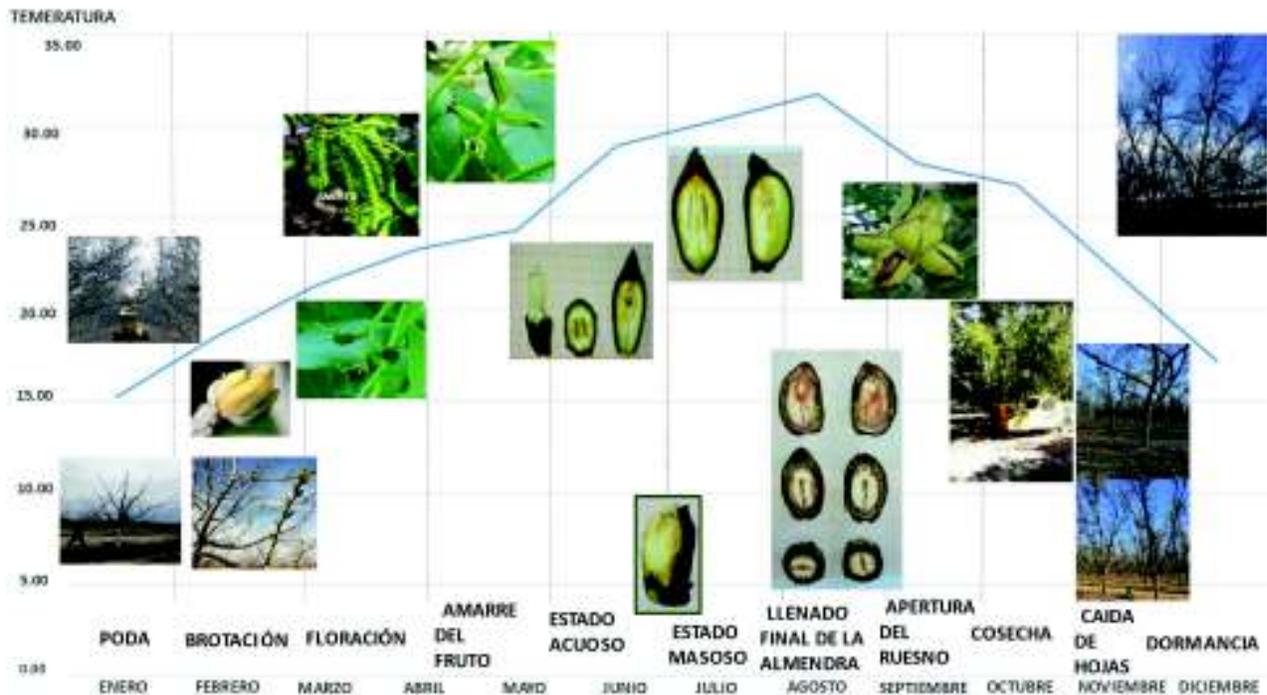


Figura 1. Etapas fenológicas de nogal pecanero en la Costa de Hermosillo. La línea continua azul representa las temperaturas promedio del aire. El registro fue tomado en el campo Viñas de la Costa por el Ing. Abraham Gámez.

I.3. Cambio climático

El cambio climático ligado al calentamiento global aumenta la temperatura de la superficie del planeta, simultáneamente, se degradan los suelos y se afecta el ciclo hidrológico; este cambio que se desarrolla en conjunto con otras variables abióticas puede crear nuevos escenarios de estrés para las plantas (Balfagón, 2020). Por lo tanto, se busca comprender detalladamente al cambio climático y su crucial efecto ante los recursos naturales alrededor del mundo.

De acuerdo con la IPCC, la tendencia de este fenómeno, que se acentúa porque continuará el incremento en concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera en los próximos años (Dinpanosh et al., 2019).

Se estiman impactos severos en diferentes tipos de sistemas naturales, incluyendo los agroecosistemas. Los efectos del cambio climático son diversos, uno de los más notorios es el aumento de las temperaturas promedio anuales. Este aumento puede afectar el desarrollo de diferentes cultivos agrícolas como lo son las huertas de perennes caducifolios como el nogal pecanero (Grageda et al., 2019).

Por otro lado, otro problema urgente a atender es la escasez del recurso hídrico y la competencia por agua entre usuarios agrícolas (Fereres y Soriano, 2007; Bittelli, 2010). En la región oeste y árida de Norteamérica, cerca del 90% del agua está siendo utilizada por la agricultura (Skaggs et al., 2011). En el noroeste de México, la agricultura también es el principal usuario y su principal fuente es el agua subterránea, por lo que su disponibilidad está totalmente comprometida (CONAGUA, 2014).

I.4. Balance de carbono del ecosistema

La variabilidad de la tasa de crecimiento del CO₂ atmosférico depende directamente de la introducción del carbono a los ecosistemas terrestres (Smith et al., 2017); a su vez, el intercambio vertical entre un ecosistema y la atmósfera depende de diferentes factores para determinar la tendencia o la dirección de los flujos de materia y energía.

El balance del carbono en un ecosistema expresa el resultado de diversos procesos que incluyen a este elemento, donde la producción neta del ecosistema (NEP) es lo que resulta de una resta entre la producción primaria bruta (GPP) o fotosíntesis bruta y el total de la respiración del ecosistema (Lambers y Oliveira, 2019). En otras palabras, se consideran las entradas y salidas del carbono para observar la tendencia del proceso, donde una parte importante del carbono asimilado por los árboles es respirada, perdida como exudado o como hojarasca (Camacho, 2016).

El carbono que se mantiene en el ecosistema se incorpora como compuestos orgánicos y las plantas lo aprovechan producir nueva biomasa (Scandellari et al., 2016). En ecosistemas agrícolas las entradas y salidas de carbono pueden ser de manera antropogénica como con labores orgánicas del suelo y con las cosechas. Las huertas de árboles frutales pueden fijar

significativamente el carbono atmosférico pero su potencial o capacidad de secuestro de carbono se ha mantenido incierto (Scandellari et al., 2016).

I.5. Fotosíntesis y su papel en el ciclo del C en los ecosistemas

Las zonas áridas y semiáridas cubren alrededor del 40% de la superficie terrestre del planeta y mantienen un rol muy importante en la estacionalidad del consumo del CO₂ por los ecosistemas (Poulter et al., 2015; Smith et al., 2017). A nivel individuo la fotosíntesis se considera un proceso importante, dado a que las plantas forman el 40% de su materia seca con el carbono fijado (Lambers y Oliveira, 2019).

La fotosíntesis es uno de los procesos fisiológicos principales para la generación energía química y oxígeno dentro de los ecosistemas (Schulze et al., 2019). El proceso fotosintético puede aumentar su eficiencia en dependencia de la disponibilidad de agua y nutrientes, una temperatura óptima y recepción de luz (Lambers y Oliveira, 2019). En escenarios con condiciones ambientales extremas, como en zonas áridas, se puede causar estrés en las plantas; paralelamente, se ralentizan las tasas de crecimiento y otros procesos fisiológicos (Schulze et al., 2019).

En los últimos años ha existido un interés por describir las tasas fotosintéticas de diferentes variedades de cultivos, en particular del nogal pecanero y su respuesta ante diversas variables ambientales o manejos agronómicos. Por lo general, se busca observar el comportamiento de la fotosíntesis en diferentes escenarios para eficientizar el uso de los recursos del sistema agrícola, y de esta manera mejorar el manejo del cultivo.

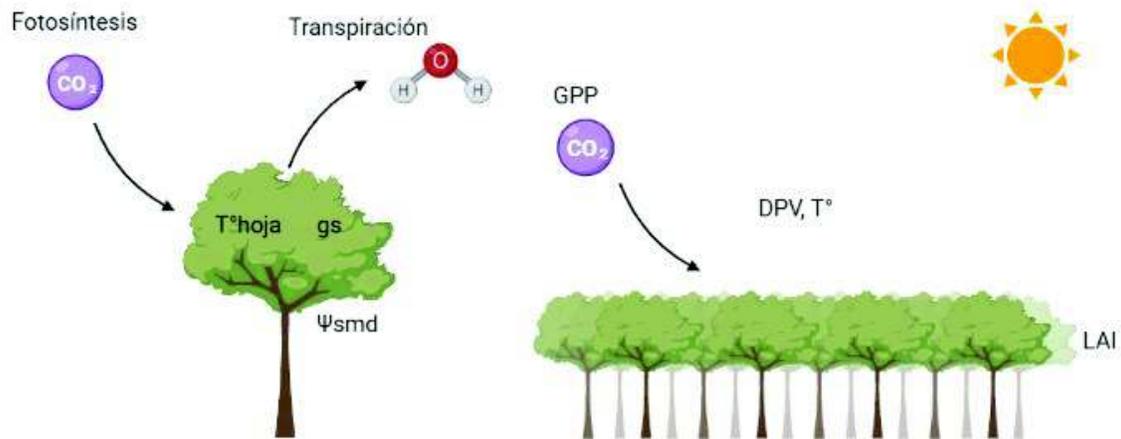


Figura 2. Esquema del agroecosistema con las variables exploratorias: Fotosíntesis, transpiración, temperatura de hoja ($T^{\circ}\text{hoja}$ °C), conductancia estomática (g_s), potencial hídrico del tallo (Ψ_{smd}), productividad primaria bruta (GPP), déficit de presión de vapor (DPV), temperatura ambiental (T°) y índice de área foliar (LAI). Creado con BioRender.com.

I.5.1. Conductancia estomática

Los estomas de las hojas permiten un intercambio gaseoso (CO_2 y H_2O) entre la planta y la atmósfera, por lo que las plantas controlan estratégicamente los estomas para eficientizar la entrada de carbono sin comprometer su estatus hídrico (Schulze et al., 2019). La mayor parte del intercambio de gases y pérdida de agua depende de la conductancia estomática (Schulze et al., 2019); por otro lado, la conductancia estomática se puede ver modificada por variables ambientales como el déficit de presión de vapor (Lambers y Oliveira, 2019). Otras variables que afectan la conductancia estomática son la disponibilidad de agua en el suelo y el ácido abscísico (Ázcon-Bieto y Talón, 2013). En los nogales pecaneros se han reportado conductancias estomáticas entre 0.1 y $0.3 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en huertas donde no existía estrés hídrico (Othman et al., 2014).

I.5.2. Transpiración

La transpiración representa la fuerza motriz más importante de las plantas para el movimiento de agua (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Una estrategia realizada por las plantas como realimentación del déficit de agua en el suelo es reducir su transpiración (Jamshidi et al., 2020). Para que la planta pueda mantener su actividad fisiológica, se debe regular la pérdida de agua por medio de la transpiración (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

La transpiración se incrementa, paralelamente, con la conductancia estomática, así se incrementa la asimilación de CO₂ y la pérdida de agua. Lo anterior, es por la frecuente diferencia de la concentración de vapor entre la hoja y la atmósfera (Lambers y Oliveira, 2019). En nogal pecanero, Othman et al. (2014) reportó tasas de transpiración en un intervalo de 2 hasta arriba de 8 mmol H₂O m⁻²s⁻¹ en condiciones hídricas no limitantes.

I.6. Panorama de fotosíntesis en nogal pecanero

En los cultivos de nogal pecanero en Norteamérica se ha buscado describir el comportamiento de la fotosíntesis en diferentes situaciones para eficientizar el uso de los recursos del sistema agrícola y, de esta manera, mejorar el manejo del cultivo con diferentes variedades. Los datos reportados por Heerema et al. (2014) muestran tasas de fotosíntesis alrededor de los 12 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹, comparando hojas de ramas con frutos y hojas de ramas sin frutos. Por otro lado, Lombardini et al. (2008) reportó tasas alrededor de los 10 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹ en huertas con variedades “Stuart” y “Pawnee”; en este estudio se compararon hojas que se encontraban dentro del dosel y hojas por fuera del dosel.

Por otro lado, se ha estudiado la fotosíntesis en nogal pecanero y su relación con el recurso hídrico aportado con los riegos. Othman et al. (2014) reportó la respuesta fotosintética con base en diferentes niveles de potencial hídrico de los tallos, siendo una variable que describe el estatus hídrico de las plantas. Sus datos presentaron valores máximos de fotosíntesis alrededor de los 15 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹. Así como el riego, otros factores pueden influir en la respuesta fotosintética como el clima, la variedad y el manejo agronómico del cultivo, por ello, es importante identificar estas respuestas fotosintéticas para manejar el cultivo de manera adecuada en cada una de sus etapas fenológicas críticas, como lo son el llenado y madurez del fruto.

I.7. Respuestas fotosintéticas

La respuesta de las plantas a condiciones de estrés da como resultado una reducción en el crecimiento y otros procesos fisiológicos (Schulze et al., 2019). Las curvas de respuesta fotosintética a diferentes variables pueden proporcionar información útil sobre el funcionamiento y rendimiento de las hojas (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

I.7.1. Temperatura ambiental

La temperatura ambiental es una variable determinante de la fotosíntesis, las tasas fotosintéticas pueden variar ampliamente en el transcurso de un día y en diferentes épocas del año debido a la variación constante de la temperatura (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Las temperaturas por encima de ciertos niveles pueden ocasionar cambios fisiológicos que alteran el desarrollo de las plantas.

El estrés calórico puede inactivar los receptores de electrones del PSII, deshabilitar enzimas del Ciclo de Calvin, reducir la actividad de la Rubisco, entre otras cosas; lo anterior da como resultado una inhibición en la fotosíntesis y asimilación de carbono (Balfagón, 2020). En zonas áridas y cálidas, la temperatura es una variable determinante, ya que suele ser extrema en ciertas horas del día.

I.7.2. Déficit de presión de vapor

El déficit de presión de vapor (DPV) es una variable que describe la deficiencia de humedad de la atmosfera con una humedad relativa y temperatura predeterminada, en comparación con la humedad de la atmósfera en saturación (Salas-Rivera et al., 2020). El aumento del DPV (una disminución de la humedad relativa) provoca una elevación en la tasa de transpiración de las plantas.

No obstante, el incremento de la transpiración no es paralelo al incremento de la tasa fotosintética, por lo que es posible que se disminuya la eficiencia del uso del agua (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Las plantas tienden a regular este intercambio gaseoso por medio de la apertura o cierre estomático para evitar pérdidas excesivas de agua (Lambers y Oliveira, 2019).

I.7.3. Luz

Las tasas fotosintéticas aumentan paralelamente con un aumento de radiación. El continuo aumento de radiación, eventualmente, satura el proceso fotosintético (Schulze et al., 2019). Por otro lado, una baja irradiancia afecta directamente a la fotosíntesis neta al reducir la utilización de la energía de los fotones, no obstante, esto puede variar entre especies.

El dosel de cultivos como el nogal pecanero es un complejo recolector de luz, que puede interceptar entre 65 y 70% de la luz solar disponible y hasta 95% en huertas con altas densidades sin podar (Lombardini et al., 2008).

I.8. Índice de área foliar

El índice de área foliar (LAI) es el área total de hojas por unidad de área de la superficie (Lambers y Oliveira, 2019), esta variable se utiliza para cuantificar la cobertura de la vegetación en un sitio determinado y para estudiar la fisiología de las plantas (Vahdatpour et al., 2021). La mayor parte de la entrada de radiación es absorbida por el dosel de la vegetación. Los cambios en el dosel ocurren paralelamente con los cambios de LAI (Schulze et al., 2019).

En huertas de frutales es importante el monitoreo del dosel de las plantas, ya que determina gran parte de la recepción de la luz solar. A su vez, esta recepción lumínica puede determinar respuestas en los cultivos como características de calidad de los frutos (Bastías y Corelli-Grappadelli, 2012).

I.9. Potencial hídrico

El potencial hídrico se describe como el estado termodinámico del agua. Técnicamente, se refiere a la energía requerida para remover las moléculas de agua de un sistema que contenga agua (Schulze, 2019). Por lo tanto, cuando el agua es limitante en un sistema, el potencial hídrico tiende a disminuir. En situaciones de sequía, se disminuye el potencial hídrico de manera pronunciada (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

En el nogal pecanero se ha investigado la determinación de los valores de potencial hídrico significantes donde algunos procesos fisiológicos, como la fotosíntesis, se vean afectados

negativamente. Existe el reporte de Othman et al. en el 2014, donde se menciona que un potencial hídrico de hasta -0.85 MPa no reduce significativamente la fotosíntesis. Principalmente, la disminución del contenido de agua de las plantas puede causar un cierre estomático afectando directa o indirectamente a la fotosíntesis (Lambers y Oliveira, 2019). Este tipo de información es útil en sistemas de producción de nogal pecanero para regular el uso del recurso hídrico sin comprometer el rendimiento del cultivo.

I.10. Cultivo de nogal pecanero

El nogal pecanero, es un frutal de alta rentabilidad, por esta razón se ha aumentado la superficie sembrada año tras año (Zaragoza-Lira, 2011); por ello, en proyectos agrícolas de esta especie es primordial conocer qué respuesta expresa el nogal en cada fase fenológica para analizar y evaluar el rendimiento y la calidad del fruto. De esta manera, se desarrollan los planes agronómicos donde se aplican insumos o prácticas culturales de manera oportuna y en la cantidad adecuada (Tarango, 2012).

El conocimiento de las fases fenológicas del nogal pecanero en las regiones agrícolas es elemental para la planeación de las prácticas y actividades agrícolas (Tarango, 2012). Las prácticas para las huertas de nogal pecanero incluyen actividades como fertilización, riegos, aplicaciones foliares, podas, control de malezas, plagas y enfermedades, etc. Es necesario conocer el proceso fenológico del cultivo para evaluar y mejorar el manejo por medio de las respuestas fisiológicas (Calderón, 2021).

El Estado de Sonora, ocupa el tercer lugar nacional en superficie cultivada de nogal pecanero, siendo la nuez un producto de demanda creciente (Retes et al., 2014). La mayoría de estos cultivos se encuentran en el distrito de riego Costa de Hermosillo, que cuenta con una superficie mayor a las 10 mil hectáreas y representa el 52% de la superficie total cultivada en el estado (Rodríguez et al., 2022). El cultivo ocupa el 12.29% del territorio hermosillense que se dedica a la agricultura (INEGI, 2009), con marcos de plantación diferentes (6x12, 8x8, 10x10) con alrededor de 130 árboles por hectárea.

Datos del 2010 mencionan que Sonora produjo alrededor de 15,500 toneladas, 78% del total de la producción de nuez proveniente de la Costa de Hermosillo (Retes et al., 2014). Los

rendimientos de nueces producidos cada temporada dependen parcialmente de procesos fisiológicos como la fotosíntesis, dado que el carbono fijado es utilizado por la planta para el mantenimiento y generación de tejidos vegetales, entre ellos las nueces. El mejoramiento del uso de la luz solar para la fotosíntesis es una estrategia sostenible para el desarrollo del cultivo en regiones como la Costa de Hermosillo.

No obstante, la información acerca de la fotosíntesis a través de un ciclo productivo de la nuez pecanera en zonas áridas cálidas es escasa; por ello, resalta la importancia de responder las siguientes preguntas: ¿Cómo varía la fotosíntesis del nogal pecanero en un ciclo productivo y qué variables afectan significativamente al proceso fotosintético? Los resultados pueden crear mejores bases informativas para la realización de futuras estrategias agronómicas para un mejoramiento del manejo de recursos en este cultivo agrícola.

II. HIPÓTESIS

Las tasas fotosintéticas del cultivo de nogal pecanero (*Carya illinoensis*) en la Costa de Hermosillo están ligadas a las relaciones ecofisiológicas del agroecosistema, expresando valores mayores que en otras regiones agrícolas por ser una zona cálido-árida.

III. OBJETIVOS

III.1. Objetivo general

- Determinar la tendencia fotosintética en un ciclo productivo del nogal pecanero en una zona árida cálida.

III.2. Objetivos específicos

1. Definir la tendencia de variables micrometeorológicas y fisiológicas.
2. Registrar la tasa de fotosíntesis a lo largo de un ciclo productivo.
3. Relacionar a las variables exploratorias con el comportamiento fotosintético del cultivo de nogal pecanero.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el distrito de riego (DR) 051 de la Costa de Hermosillo, Sonora, México (Figura 3). La extensión territorial del distrito de riego (DR) 051 representa el 12.29% del área total dedicado a la agricultura en Hermosillo (INEGI, 2009). El acuífero se encuentra en una zona sobreexplotada y con problemas de salinidad (Rangel et al., 2003).



Figura 3. Costa de Hermosillo, Sonora, México. El sitio experimental se encuentra ubicado con el marcador. Imagen obtenida de Google Earth Pro.

Esta región agrícola se caracteriza por su alta productividad de nogal pecanero; no obstante, se mantienen limitantes como altas temperaturas y poca disponibilidad hídrica. El cultivo experimental es una huerta de nogal pecanero (*Carya illinoensis*), donde las parcelas se encuentran divididas por año de plantación.

IV.2. Sitio experimental

El sitio experimental se localiza en el predio Viñas de la Costa S.A. de C.V. (28.9240° latitud N, 111.2996° longitud W), ubicado en el kilómetro 41 de la carretera Hermosillo-Bahía de Kino (Figura 4). El predio Viñas de la Costa S.A. de C.V. cuenta con alrededor de 100 hectáreas de cultivo de nogal pecanero. Al ser un cultivo perenne se mantiene un manejo de mínima labranza, donde el suelo y las plantas son manipulados de manera reducida en comparación con los cultivos anuales.



Figura 4. Ubicación de la parcela Viñas de la Costa en la carretera Hermosillo Bahía de Kino. Imagen obtenida de Google Earth Pro.

El marco de plantación es de 6X12 (6 metros entre árboles y 12 metros entre hileras). Dentro del cultivo existen dos variedades, que son Wichita y Western, intercaladas en una proporción de 80% de Wichita y 20% Western; el estudio se realizó en arboles de la variedad Wichita trasplantados en el año 1999.

En la huerta se cuenta con un sistema de riego presurizado por goteo con un gasto de 1.2 L h^{-1} . A su vez, los árboles reciben podas anuales que pueden ser laterales o de copa, por lo que la altura de los árboles oscila entre los 9 y 12 m; dichas podas se realizan en invierno cuando los árboles se encuentran en estado de reposo (dormancia). Por otra parte, la fertilización se basa en fuentes nitrogenadas y fosforadas por el sistema de riego y fuentes de zinc con aplicaciones foliares.

Las prácticas de manejo se basan en las etapas fenológicas del cultivo conforme pasa el ciclo productivo. La finalidad de estas prácticas es maximizar el rendimiento por hectárea, asegurando la satisfacción de las necesidades del cultivo. De esta manera, se eficientiza las actividades biológicas, fisiológicas y bioquímicas del nogal pecanero.

La brotación comienza a mediados del mes de marzo, paralelamente, se inician las aplicaciones de fertilizantes. En los meses próximos se desarrollan las etapas vegetativas y reproductivas para terminar con la cosecha en el mes de septiembre. Para la cosecha se utilizan vibradores para ayudar a caer las nueces y se maneja una recolección automatizada con maquinaria.

IV.3. Variables ecofisiológicas y ambientales

Se registraron los datos de variables ecofisiológicas con el sistema portátil de fotosíntesis (LI-6400XT) durante el año 2020. Las variables medidas con el instrumento fueron fotosíntesis neta, conductancia estomática, transpiración, temperatura del aire, temperatura de la hoja y DPV. Las variables fisiológicas fueron medidas simultáneamente con la fotosíntesis, con excepción del potencial hídrico que tuvo su muestreo individual. Las fechas de muestreo de la fotosíntesis coinciden con la conductancia estomática, transpiración y temperatura de la hoja. Por otra parte, el potencial hídrico coincidió con la fotosíntesis en 30 veces de los casos. Las variables de eficiencia de uso del agua intrínseca (UEA_{intrins}) se obtuvo dividiendo la fotosíntesis neta (A_n) entre la conductancia estomática (g_s), por otro lado, la eficiencia de uso del agua instantánea (UEA_{inst}) se obtuvo dividiendo la fotosíntesis neta (A_n) entre la transpiración (Tr).

Las variables ambientales fueron medidas con una torre micrometeorológica instalada en la parcela. Se trata de una torre T45 de 21m de altura con un equipo de Covarianza de vórtices

(EC). Se localiza dentro de una huerta de nogal pecanero de las variedades Wichita y Western, trasplantadas entre el año 1999 y 2000. Las mediciones de covarianza de vórtices se realizaron a 10 Hz usando el sistema GHG de la marca LICOR, donde se almacenan los datos y se crean archivos cada 30 minutos. Los datos meteorológicos fueron medidos a 0.1 Hz y se almacenaron los promedios cada 10 minutos. En la torre se encuentra instalado un anemómetro sónico orientado de sur a norte con un analizador de gases infrarrojo.

Con la torre de covarianza se tomaron datos meteorológicos y ecofisiológicos, de los cuales se seleccionaron la temperatura ambiental y el DPV. La torre toma los datos cada media hora durante todo el año, para posteriormente promediar cada variable por día.

IV.4. Torre de covarianza

La torre midió el flujo del carbono atmosférico, con el sistema de Eddy Covariance de LICOR Biosciences. Consiste en una medición constante de los intercambios de gases y energía entre la atmósfera y la vegetación. La productividad primaria bruta (GPP) fue obtenida procesando los datos en <http://www.bgc-jena.mpg.de/REddyProc/brew/REddyProc.html>, sitio del Instituto Max Planck para biogeoquímica. Los datos de los flujos de CO₂ se capturan automáticamente cada media hora desde el año 2016. Fueron seleccionados solo aquellos datos que coincidían con los días de muestreo del LI-6400 XT para el análisis estadístico.

IV.5. Potencial hídrico

En el caso de la medición del estado hídrico de los árboles se utilizó el método del potencial hídrico del tallo a medio día con una bomba Scholander; una hora antes de tomar las mediciones se seleccionaron 10 árboles al azar y de cada árbol se seleccionó una hoja. Al seleccionar los individuos se cubren las hojas con papel aluminio para igualar el potencial hídrico al del tronco principal, procedimiento similar que el reportado por Wells (2015). Se cortan las hojas para ser medidas inmediatamente y se promediaron los datos por fecha de muestreo para ser archivados.

IV.6. Fotosíntesis

El muestreo en campo se realizó a lo largo del ciclo productivo del año 2020. Se obtuvieron datos a partir del mes de mayo hasta la senescencia de las hojas en el mes de diciembre, las mediciones se obtuvieron entre las 09:00 y 13:00 horas. Se midieron valores de fotosíntesis de manera instantánea, al igual que curvas de respuesta a la luz. Las hojas elegidas fueron maduras, sin deformidades, sin daños por plagas, no sombreadas y que se encontraran en una rama con fruto. Para el experimento se mantuvo una altura uniforme de medición entre 8 y 10 m con andamios y una plataforma automatizada. (Figura 5)

El instrumento utilizado para las mediciones fue el sistema de fotosíntesis portátil LI6400XT (Licor, Lincoln, NE, USA) para determinar intercambio gaseoso en condiciones de campo. De igual manera, se utilizó la cámara de fluorescencia con su respectiva configuración en el sistema de Leaf Fluorescence Chamber (LCF). Se determinó la capacidad fotosintética neta (Anet), conductancia estomática (gs), transpiración (Tr) y curvas de respuesta a la luz. Para el flujo de aire a la consola se utilizó un tanque externo de 20 litros y la velocidad del flujo de aire en la cámara fue de 300-500 $\mu\text{mol s}^{-1}$. En las mediciones instantáneas se aplicaron niveles de radiación fotosintéticamente activa (PAR) de 1600-1900 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con la cámara de fluorescencia. En las curvas de respuesta se aplicaron 15 niveles PAR, de 0 a 2000 $\mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con paso variable. Los puntos de PAR en las curvas de respuestas fueron a: 2000, 1800, 1500, 1200, 1000, 900, 600, 450, 300, 200, 100, 75, 50, 25, 0 $\mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Las curvas se graficaron mediante un modelo de ajuste a una parábola no rectangular con el código de R publicado por Heberling (2013).

En cada muestreo se llevó a cabo el mismo procedimiento para la toma de datos. Dentro del sitio experimental se eligieron 3 árboles al azar y se midieron 3 hojas por árbol para las mediciones instantáneas de fotosíntesis. Se promediaron los valores obtenidos por hoja, para así recabar los valores por árbol. El promedio de los 3 árboles por sesión fue archivado para su posterior análisis. Para las curvas de respuesta de luz se eligió un árbol al azar del sitio experimental por sesión. Se registraron las curvas de respuesta y fueron archivadas por fechas de la sesión.



Figura 5. Medición con el Li-6400XT, a una altura entre 8 y 10m por fuera del dosel de los árboles.

IV.7. Índice de área foliar

El índice de área foliar (LAI) se midió utilizando el LAI-2200C de LICOR. Los datos se tomaron minutos antes del amanecer o a mediodía para evitar la distorsión por las sombras del dosel. En cada sesión de muestreo se trazó una recta de 200 metros en diagonal a las hileras del cultivo, tomando datos sobre la hilera, a 3 metros y a 6 metros. El LAI-2200C promedia los valores tomados en cada sesión para presentar un valor final de LAI por jornada de medición. El valor del índice de área foliar se archivó por día del muestreo para su posterior análisis.

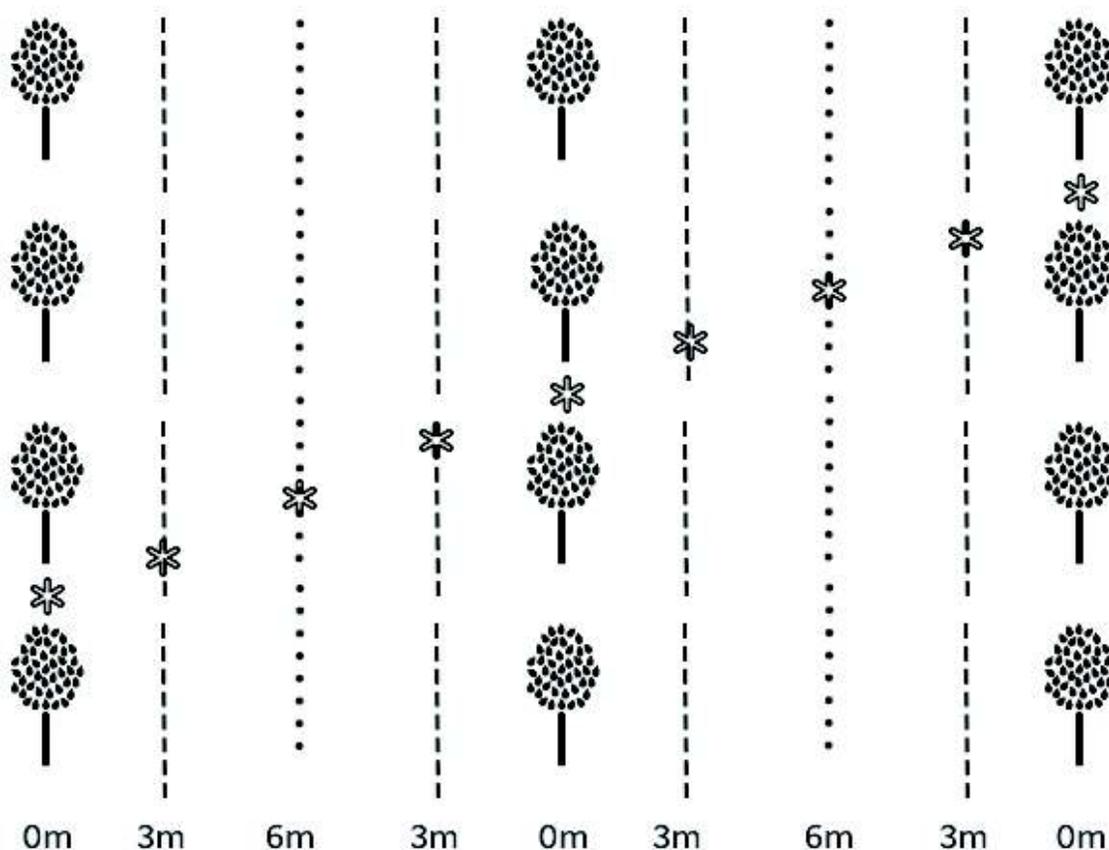


Figura 6. Procedimiento de la toma de datos de LAI. Ruta en diagonal a las hileras de los árboles con toma de datos cada 3 metros.

IV.8. Análisis estadístico

Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el programa Minitab 2019 con un nivel de significancia de $\alpha= 0.05$. Se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro Wilk para definir si los datos se ajustaban a una distribución normal, pruebas de homocedasticidad de Levene para definir igualdad de varianzas entre los grupos analizados. Se realizaron una serie de análisis de regresión lineal para determinar el efecto de las variables exploratorias sobre la respuesta de fotosíntesis. Por otro lado, los gráficos fueron realizados en Origin Pro 21.

Se utilizó una ANOVA de un factor para determinar la existencia de efectos reales entre las fechas de muestreo a la respuesta de fotosíntesis, esto es para probar la hipótesis estadística $\mu_1= \mu_2= \dots = \mu_n$ y $\mu_1 \neq \dots \neq \mu_n$. A su vez, se utilizó una prueba de *post hoc* de Tukey para clasificar el orden descendente real de los meses con base en sus promedios de tasas fotosintéticas.

Se utilizó un análisis de componentes principales (ACP) para determinar las variables que expliquen la mayor parte de la varianza de todas las variables exploratorias estudiadas en el ciclo productivo del nogal pecanero. Estas variables fueron: productividad primaria bruta, índice de área foliar, potencial hídrico del tallo, fotosíntesis neta, conductancia estomática, transpiración, temperatura de las hojas, déficit de presión de vapor y temperatura del aire. De igual manera, se diferenciaron las respuestas del análisis por fechas.

V. RESULTADOS

V.1. Variables ecofisiológicas y ambientales

Las variables exploratorias se midieron simultáneamente con la fotosíntesis, con excepción del potencial hídrico que tuvo su muestreo individual. Las fechas de muestreo de la fotosíntesis coinciden con la conductancia estomática, transpiración y temperatura de la hoja. Por otra parte, el potencial hídrico coincidió con la fotosíntesis en 30 jornadas de muestreo. Dicho lo anterior, se logró observar la tendencia de cada una de las variables a través del tiempo y sus efectos en la fotosíntesis mediante regresiones lineales ($p < 0.05$).

El área donde se ubica el campo agrícola muestra características ambientales representativas de una zona árida cálida, algunas de las variables más importantes que pueden afectar el comportamiento del cultivo son las temperaturas máximas y el déficit de presión de vapor. Se capturaron datos ambientales con la torre de covarianza y el Li-6400XT; la diferencia entre ambos métodos es que con los datos del Li-6400XT se aprecian las variables a nivel individual, y los datos de la torre de covarianza expresan valores a nivel dosel.

Los datos recabados por el Li-6400 XT mostraron los máximos de temperatura en el aire en el mes de junio (Figura 10); después, la temperatura fue disminuyendo gradualmente hasta llegar a valores hasta los 20°C en el mes de diciembre. Las mayores oscilaciones se presentaron en los meses de otoño. Por otro lado, las temperaturas máximas capturadas con la torre de covarianza mostraron los picos en el verano en el mes de julio.

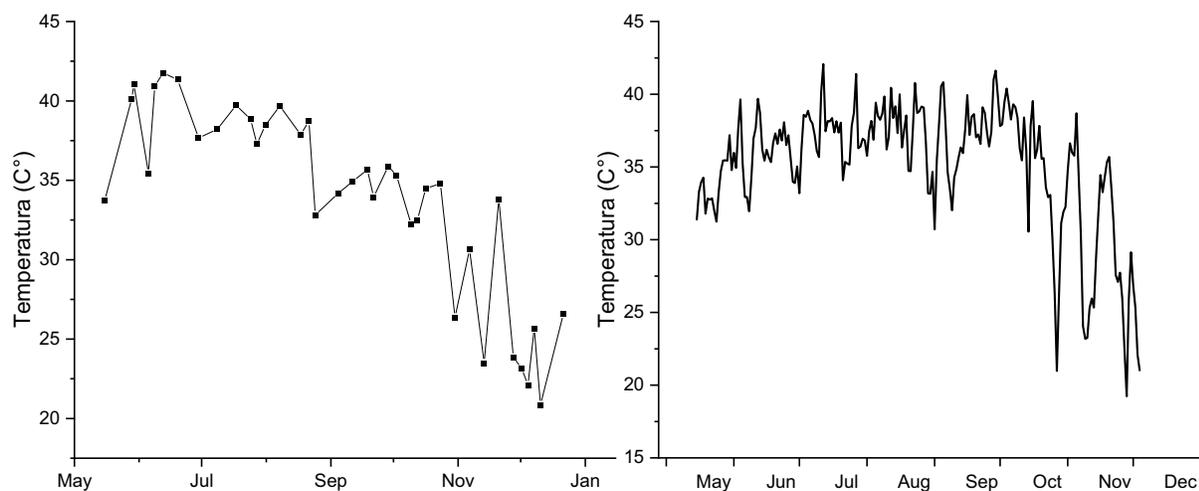


Figura 7. Datos promedio de la temperatura ambiental capturados por el LI-6400XT (izquierda) y la torre de covarianza (derecha).

Los valores del déficit de presión de vapor oscilaron entre 0.4 y 2.4 kPa en el periodo de mediciones entre el mes de mayo hasta el mes de diciembre (Figura 8). Lo anterior es con base en los datos del LI-6400XT, que fueron capturados entre las 09:00 y 13:00 horas y, se obtuvieron sus valores máximos en agosto. La caída de los valores de DPV comenzó en otoño conforme bajaron las temperaturas. En el caso de los valores capturados por la torre de covarianza, se obtuvo una oscilación de valores entre 0.69 y 4.38 kPa a través del ciclo productivo (Figura 8); las mínimas se encontraron a finales de diciembre.

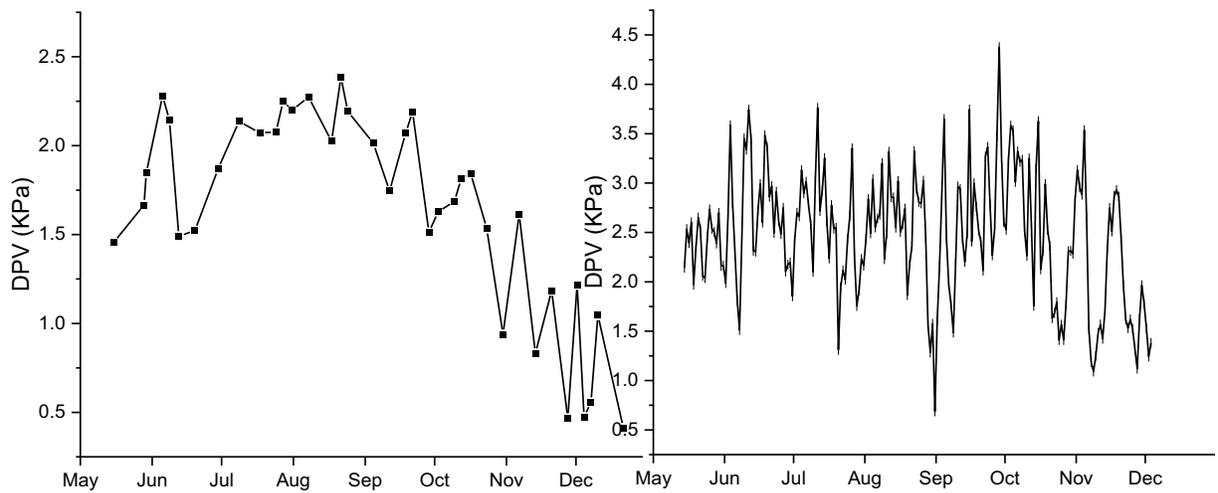


Figura 8. Valores promedio del DPV a través del ciclo productivo; los datos fueron recolectados por el LI-6400XT (izquierda) y la torre de covarianza (derecha).

El índice de área foliar aumentó notoriamente en el mes de junio y julio, después de la brotación de marzo y abril (Figura 9). En el mes de agosto se observó una caída en el índice, dado al peso de los frutos que estaban próximos a ser cosechados. El índice volvió a aumentar algunos días después de la cosecha de septiembre, pero los datos volvieron a decaer conforme las hojas viejas caían en los meses frescos hasta llegar a los valores mínimos obtenidos antes de la senescencia.

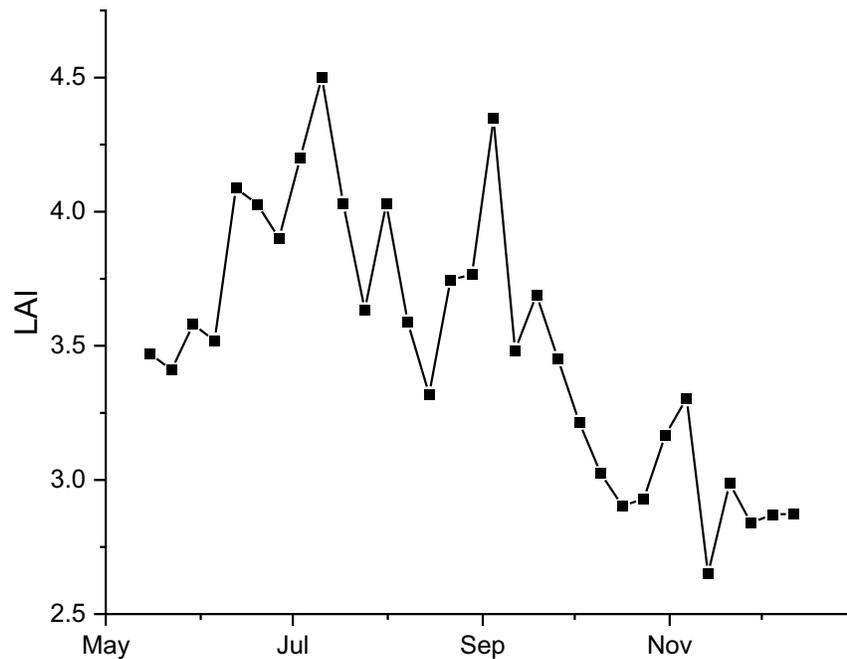


Figura 9. Evolución del comportamiento del índice de área folia (LAI).

El LAI demostró su pico máximo el 11 de julio con 4.50. El segundo pico de LAI fue de 4.35 el 5 de septiembre. Estos últimos valores fueron durante la cosecha del nogal cuando los frutos llegaron a su madurez fisiológica.

La conductancia estomática mantuvo sus valores más altos en los meses de verano. Desde el 16 de mayo hasta el pico máximo se mantuvo una tendencia ascendente en la tasa de conductancia, el valor más alto fue de $0.28 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ el primer día de agosto. De igual manera, se observó una caída gradual en los meses de otoño y los valores de conductancia estomática más bajos se encontraron en el mes de diciembre al acercarse la caída de las hojas (Figura 10).

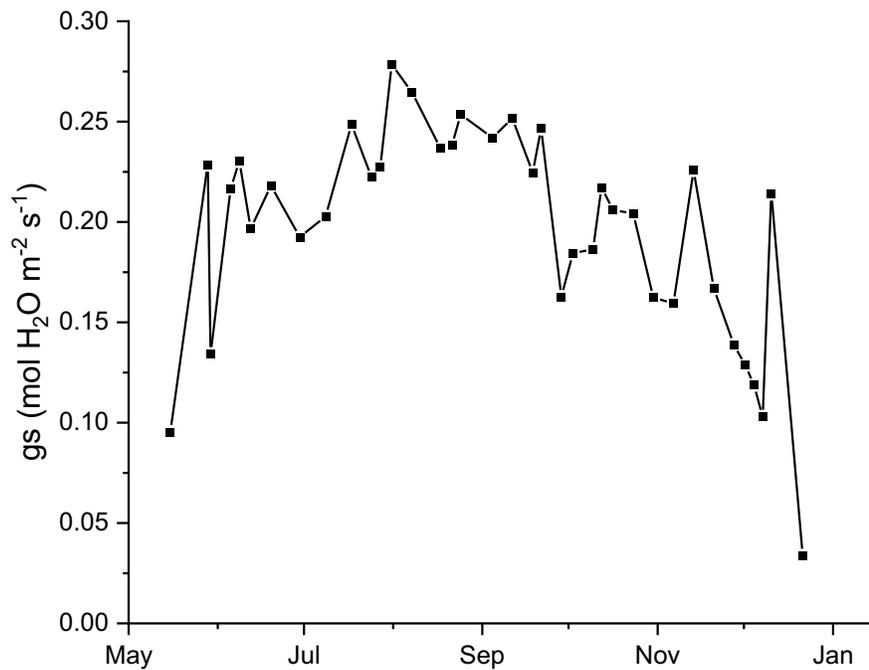


Figura 10. Evolución de la conductancia estomática en nogal pecanero durante el estudio.

La transpiración de las hojas osciló entre 1.05 y 12.89 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ (Figura 11). Se observó una tendencia creciente en los meses cálidos, la máxima en la transpiración se presentó el 13 de junio, posteriormente, esta variable disminuyó ligeramente hasta llegar a los 8.54 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ el 9 de julio. Después del 12 de septiembre, durante la cosecha, la transpiración empezó a disminuir gradualmente hasta llegar a sus valores mínimos en los últimos meses del año.

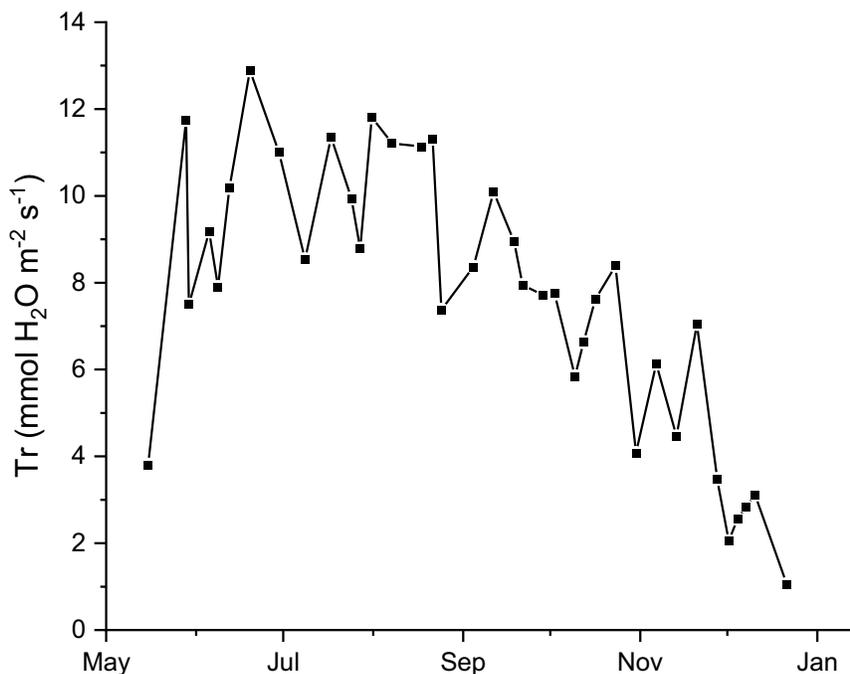


Figura 11. Evolución de la transpiración al momento de muestreo.

En los meses de otoño los valores de transpiración bajaron gradualmente desde 8.95 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ hasta llegar a 1.06 H₂O mmol m⁻² s⁻¹, este último valor fue obtenido en la última jornada del 22 de diciembre.

La temperatura de las hojas en el momento del muestreo mostró una tendencia a la baja desde los meses cálidos del año hasta los últimos meses próximos a la senescencia. Los datos oscilaron entre los 41 y los 21 °C a través del ciclo productivo. La temperatura máxima de las hojas se encontró el 20 de junio con 41.76° C, mientras que la mínima fue el 5 de diciembre con 21.90 °C (Figura 12).

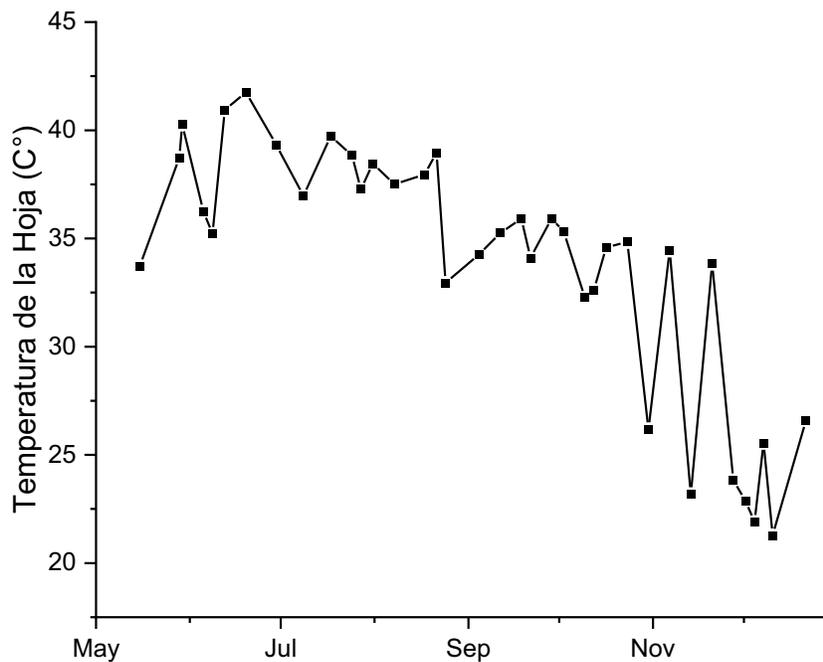


Figura 12. Evolución de la temperatura de las hojas al momento de muestreo.

Las condiciones ambientales del sitio experimental demostraron meses de verano cálidos, donde las temperaturas máximas se presentaron en el mes de junio arriba de los 40.0°C y el DPV máximo se observó entre agosto y septiembre con valores por encima de los 2.0 kPa. Ambas variables obtuvieron valores descendentes en el transcurso del otoño hasta llegar a las fechas finales del año natural. Las variables fisiológicas exploratorias demostraron una mayor actividad en el verano, destacando en el mes de junio con una mayor temperatura de hojas y transpiración.

V.2. Fotosíntesis

Los primeros datos de tasa fotosintética del nogal pecanero se obtuvieron en la segunda quincena del mes de mayo, donde la fotosíntesis presentó una tasa promedio de $7.11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Al comienzo del siguiente mes se obtuvieron los valores máximos de fotosíntesis del ciclo. El pico fotosintético mantuvo valores arriba de los $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; la tasa fotosintética máxima se encontró el 6 de junio que fue un promedio de $23.86 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

No obstante, en las siguientes sesiones de muestreo la tasa bajó considerablemente hasta llegar a niveles cercanos a los $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; la jornada donde se encontraron las tasas fotosintéticas más bajas del verano fue la del 25 de julio con $12.21 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Al acercarse la temporada de cosecha, la tasa fotosintética aumentó gradualmente hasta llegar a los $19.48 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ el 12 de septiembre. El segundo pico fotosintético se presentó al final del verano el 12 de septiembre, los valores en cercanas a esta fecha oscilaron entre 12.22 y $19.48 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Después de la cosecha, la tasa fotosintética fue disminuyendo conforme se acercaba el invierno y, a su vez, la senescencia de los árboles. El comportamiento varió en diferentes estaciones del ciclo, así como algunas variables ambientales y ecofisiológicas del sistema. En resumen, el nogal pecanero mostró una curva temporal de fotosíntesis con dos picos fotosintéticos y con disminuciones de los valores al principio del verano y al final otoño (Figura 13).

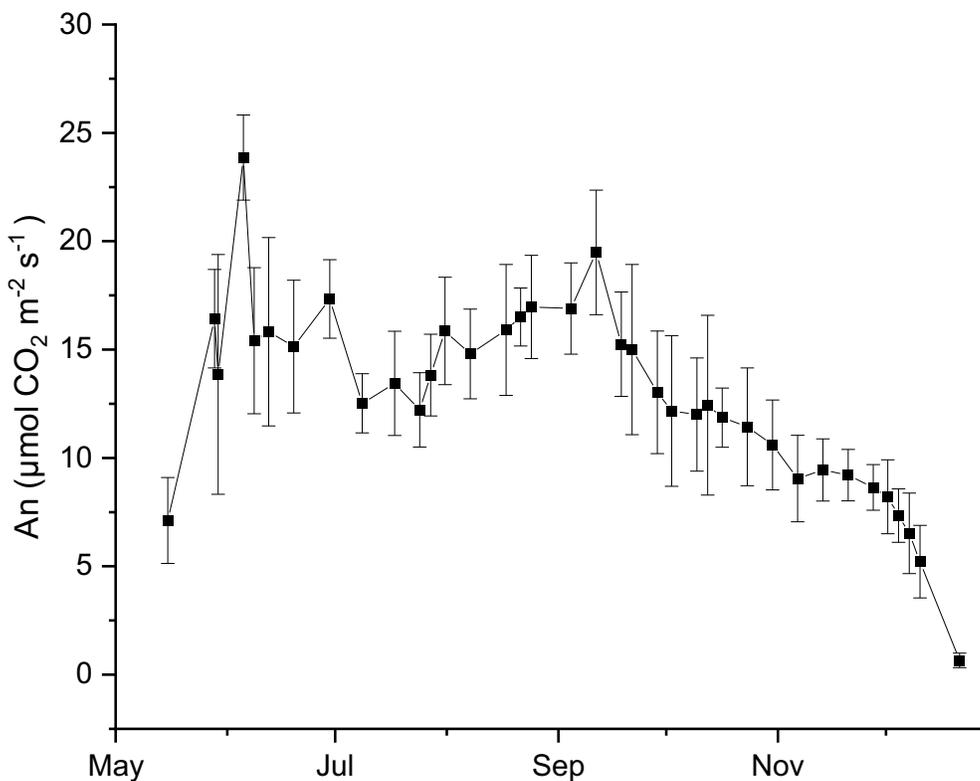


Figura 13. Comportamiento de la tasa fotosintética a través del ciclo productivo del año 2020. Los datos son promedios por jornada de medición con D.E.

En determinados meses se mostró una actividad fotosintética más elevada que en otros. Los promedios mensuales oscilaron entre los 5 y 18 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Con una prueba de Tukey se logró identificar las diferencias significativas entre los meses. Se encontró evidencia estadística ($p < 0.001$) que demuestra que en el mes de junio se presentó la mayor tasa fotosintética, cuando los árboles se encuentran en sus primeras etapas del desarrollo de fruto y las temperaturas se encuentran entre las más cálidas del año (Tabla 1). Por otro lado, el mes con la menor tasa fotosintética promediada fue diciembre, cuando se presentan las temperaturas invernales y los árboles se preparan para entrar en dormancia.

Tabla 1. Efecto temporal con base en meses en los árboles de nogal pecanero en su respuesta fotosintética. Los valores de efectos principales son promedios \pm D.E. de número de muestras desiguales. Los valores con diferente superíndice dentro de la misma columna de efectos principales son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Mes	Respuesta ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Mayo	12.46 ^{abc} \pm 4.81
Junio	17.51 ^a \pm 3.65
Julio	13.00 ^{abc} \pm 0.76
Agosto	16.01 ^{ab} \pm 0.82
Septiembre	15.93 ^{ab} \pm 0.82
Octubre	11.75 ^{bc} \pm 0.65
Noviembre	9.08 ^{cd} \pm 0.34
Diciembre	5.59 ^d \pm 2.97

Se obtuvieron 23 curvas de respuesta fotosintética a la luz en el transcurso del estudio, comenzando en el mes de mayo hasta el mes de diciembre (Figura 14). Cada curva de respuesta a la luz se obtuvo de en el transcurso de una sesión de medición. La mayor tasa de fotosíntesis se encontró en niveles de PAR alrededor de los 1800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. A su vez, se encontró la curva de respuesta con los valores más altos el 25 de agosto.

Las hojas brotan en primavera, paralelamente, se presenta un aumento gradual en la eficiencia del funcionamiento fotosintético desde la brotación hasta finales de junio, después, inicia la caída de la fotosíntesis con valores alrededor de 10 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Posteriormente, se recupera para obtener valores cercanos a 20 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en agosto y septiembre. En los meses de otoño las hojas comienzan a envejecer y disminuye su actividad fisiológica (fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática) hasta llegar a la senescencia.

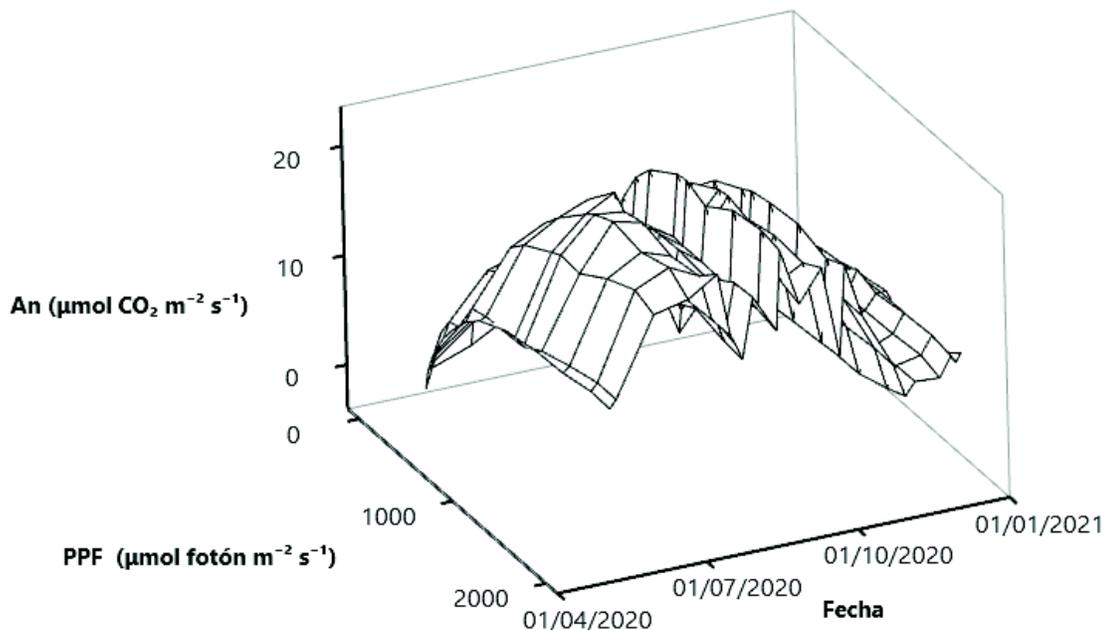


Figura 14. Gráfico de superficie de curvas de respuesta a la luz (0-2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Las curvas fueron tomadas desde el 12 de mayo hasta el 11 de diciembre.

La caída fotosintética en las curvas de respuesta fue en el mes de julio, por lo tanto, se identificaron y se observaron las distinciones entre las curvas antes, durante y después de esta disminución de la actividad fotosintética (Figura 15). Las curvas de respuesta antes, durante y después de la caída son promedios de 3 curvas de respuestas. Las curvas antes de la caída son desde el mes de junio hasta principios de julio. Las curvas seleccionadas para promediarse durante la caída son desde mediados de julio hasta principios de agosto, por último, las curvas después de la caída son valores recolectados desde finales de agosto hasta mediados de septiembre.

Antes de la caída fotosintética se promediaron valores máximos de la curva alrededor de los $19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, durante la caída fotosintética se observaron valores máximos cerca de

los $16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y, después de la caída hubo un nuevo incremento en la eficiencia fotosintética al alcanzar máximas cercanas a los $18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

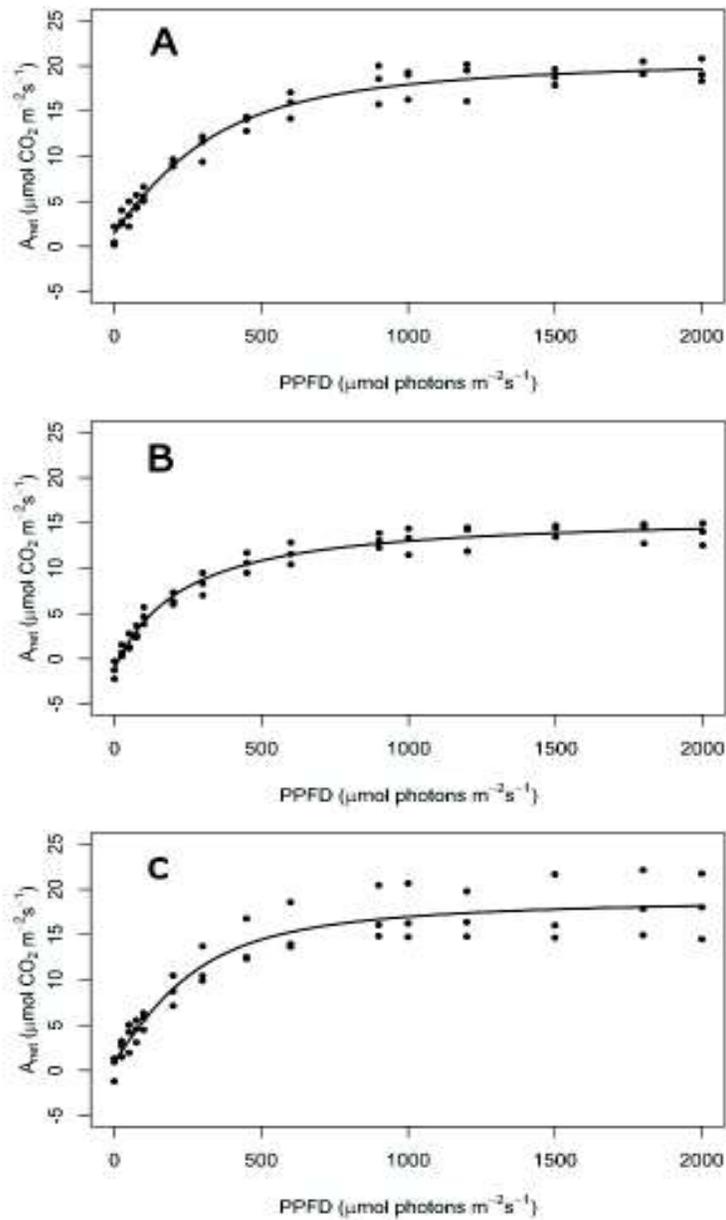


Figura 15. Curvas de respuesta a la luz antes (A), durante (B) y después (C) de la caída fotosintética de verano.

Tabla 2. Atributos fotosintéticos antes, durante y después de la caída de los valores de fotosíntesis en verano. R_o = respiración en oscuridad ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), ϕ = rendimiento cuántico de la fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$ fotones), A_{max} = fotosíntesis máxima, PSL= punto de saturación de la luz, PCL= punto de compensación de la luz.

Fecha	R_o	ϕ	A_{max}	PSL	PCL
Antes	-1.47 ± 0.49	0.05 ± 0.01	19.81 ± 1.28	629.69	29.4
Durante	1.04 ± 0.49	0.07 ± 0.01	16.10 ± 1.02	694.48	15.83
Después	-0.91 ± 0.93	0.05 ± 0.02	18.37 ± 1.97	502.02	18.2

V.3. Relaciones de fotosíntesis y variables ecofisiológicas y ambientales

El comportamiento fotosintético varió en diferentes estaciones del ciclo, así como algunas variables ambientales y ecofisiológicas del sistema. A groso modo, el nogal pecanero mostró una curva temporal de fotosíntesis con dos picos fotosintéticos y con disminuciones de los valores en verano y otoño.

El déficit de presión de vapor y la temperatura ambiental expresaron sus máximos valores en los meses de verano (Tabla 3). En adelante, hubo un decremento en los meses posteriores en el caso de ambas variables ambientales. El valor de DPV más alto fue de 2.17 kPa, por otro lado, la temperatura máxima promedio fue de 39.37 °C.

Así mismo, las variables fisiológicas que representan al intercambio gaseoso de las hojas demostraron valores altos en los meses de verano, con excepción del mes de julio donde hubo una caída en los valores. Al final del ciclo existió un decremento gradual de los valores en los meses de otoño.

Tabla 3. Valores Promedio de Déficit de Presión de Vapor (DPV), Temperatura Ambiental (T) Fotosíntesis Neta (An), Conductancia Estomática (gs) y Transpiración (Tr), Uso Eficiente del Agua Intrínseca (UEA_{intrins}) y Uso Eficiente del Agua Instantánea (UEA_{inst}) divididos por mes. Los valores instantáneos son promedios \pm D.E. de 3 jornadas por mes.

	DPV (kPa)	T (°C)	An (μmol $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	gs (mol $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Tr (mmol $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	UEA _{intrins}	UEA _{inst}
Mayo	1.66 \pm 0.19	38.31 \pm 4.00	11.03 \pm 0.47	0.15 \pm 0.05	6.31 \pm 0.64	73.53	1.75
Junio	1.97 \pm 0.42	39.37 \pm 3.44	19.78 \pm 0.99	0.21 \pm 0.02	8.32 \pm 0.49	94.19	2.38
Julio	2.10 \pm 0.64	38.93 \pm 0.76	14.07 \pm 1.16	0.22 \pm 0.02	7.48 \pm 0.99	63.95	1.88
Agosto	2.17 \pm 0.13	38.67 \pm 0.92	18.31 \pm 3.61	0.26 \pm 0.26	10.36 \pm 1.29	70.42	1.77
Septiembre	1.94 \pm 0.17	34.93 \pm 0.74	15.37 \pm 4.12	0.17 \pm 0.07	7.44 \pm 1.89	90.41	2.07
Octubre	1.71 \pm 0.10	33.34 \pm 1.70	13.89 \pm 4.56	0.18 \pm 0.11	6.02 \pm 3.56	77.17	2.31
Noviembre	1.21 \pm 0.39	29.32 \pm 5.29	7.40 \pm 0.32	0.12 \pm 0.03	3.87 \pm 0.69	61.67	1.91
Diciembre	0.69 \pm 0.41	23.81 \pm 1.83	7.92 \pm 0.64	0.14 \pm 0.05	3.60 \pm 0.68	56.57	2.20

Se observan datos relativamente bajos en la fotosíntesis neta, pero la conductancia estomática y la transpiración se mantienen en valores similares en el mes de julio, cuando la temperatura ambiental está cerca de los 39 °C y el DPV está por encima de los 2.0 kPa. No obstante, en el mes de agosto cuando el DPV se encontraba en sus valores máximos del ciclo productivo, hubo una recuperación en la tasa fotosintética y se presentó un aumento simultáneo de los valores de transpiración y conductancia estomática; el nogal pecanero demostró su máxima tasa fotosintética en el mes de junio cuando el DPV se encontraba en valores menores a 2.0 kPa.

Se encontró significancia estadística en la regresión lineal entre la conductancia estomática y la fotosíntesis; $p=0.0001$, $r^2=0.736$ (Figura 16). En el caso de la regresión lineal con la transpiración se encontró significancia estadística, con $p=0.0001$, $r^2=0.802$. En el tercer caso con la temperatura de la hoja también se encontró significancia estadística; $p=0.0001$, $r^2=0.687$. La transpiración fue la variable con un mayor porcentaje de variación explicada por un modelo lineal con un 80%.

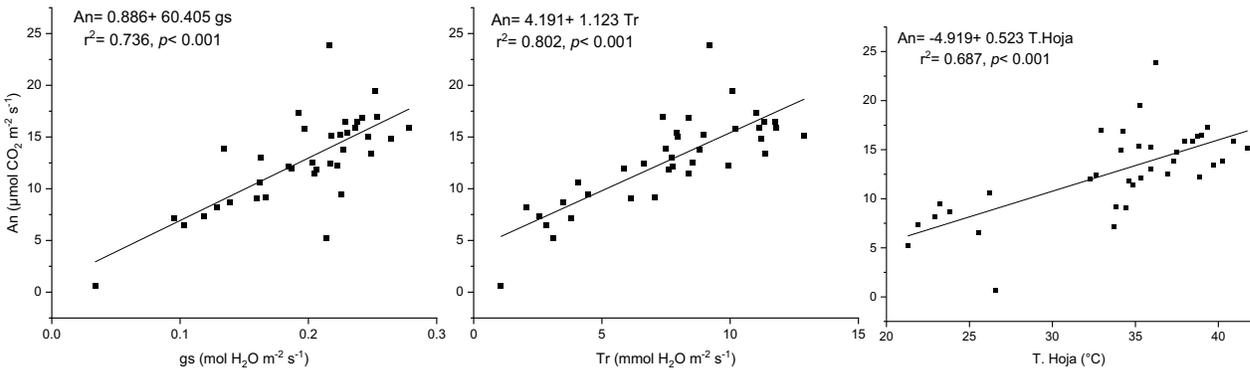


Figura 16. Datos recopilados con el Li-6400XT. Regresión lineal entre fotosíntesis y las variables de conductancia estomática, transpiración y temperatura de la hoja ($P < 0.001$).

La relación positiva entre la temperatura de las hojas y la fotosíntesis ($r^2 = 0.687$, $p < 0.001$) presenta una tendencia ascendente (Figura 16). Paralelamente, la fotosíntesis neta fue disminuyendo en otoño hasta llegar a hasta los $0.66 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; el decremento simultaneo de las temperaturas de las hojas y la fotosíntesis se mantiene hasta llegar a la etapa de senescencia. En los meses de verano donde se presentaron los valores altos de transpiración se registraron tasas fotosintéticas entre 15 y $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Los datos comparativos de la GPP con la fotosíntesis se obtuvieron desde mediados de mayo hasta el mes de diciembre; ambas variables coincidieron en los picos máximos, el primero el 6 de junio y el segundo el 12 de septiembre (Figura 17). El primer pico máximo de productividad primaria bruta obtuvo un valor de $11.98 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$; lo anterior es la entrada total de carbono al sistema el día 6 de junio. El segundo pico fotosintético del 12 de septiembre los valores de GPP oscilaron entre 9.69 y $10.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Entre ambos picos se obtuvo una ligera baja en lo que fueron los meses de julio y agosto, después del segundo pico se observó el descenso gradual de los valores hasta llegar a la senescencia.

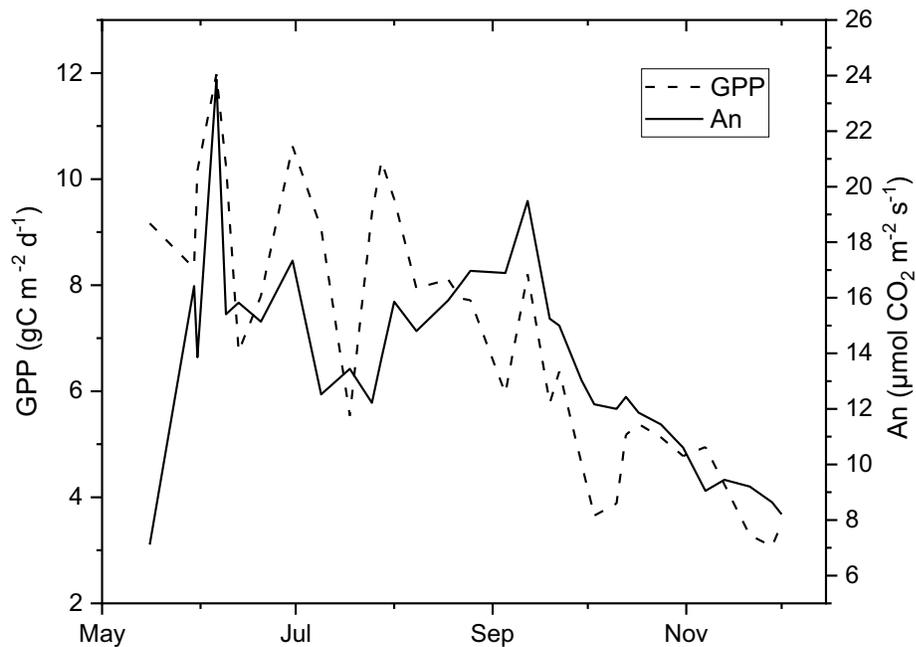


Figura 17. Gráfico temporal con comparación entre la productividad primaria bruta (GPP) y la fotosíntesis neta (An).

Se obtuvo una regresión lineal de ambas variables ($F= 23.18$, $g.l.= 31$, $p< 0.5$). La prueba muestra significancia estadística de una asociación positiva entre la fotosíntesis y la productividad primaria bruta (Figura 18). Se observó una r^2 de 62.3%, lo que nos dice que el GPP predice solo una parte de la respuesta en la fotosíntesis.

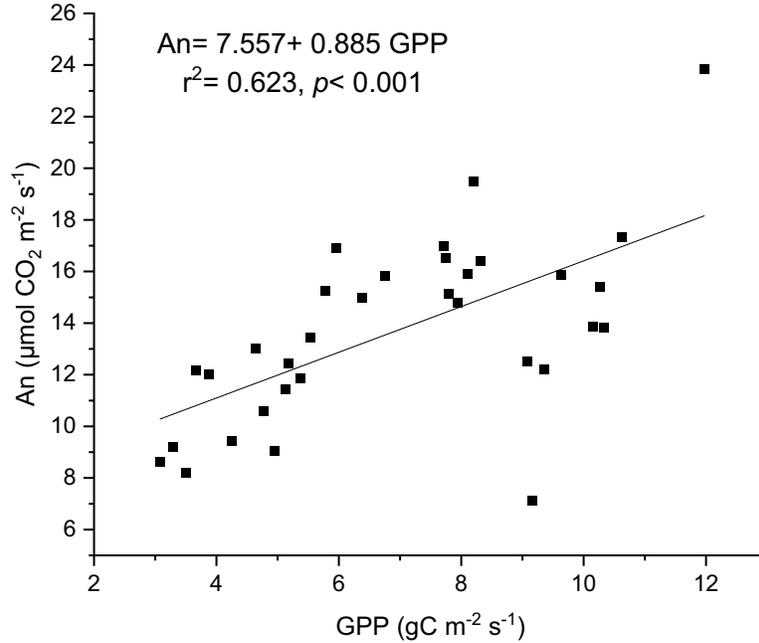


Figura 18. Regresión lineal entre GPP y fotosíntesis neta. Se muestra la relación entre ambas variables ($P < 0.05$).

El potencial hídrico de los tallos se mantuvo constante durante la mayor parte del ciclo. La mayoría de los valores se encontraron entre 0.59 y 0.82 MPa (Figura 19); este rango representa el potencial hídrico donde se presenta la mayor parte de la fotosíntesis. De igual manera, se obtuvo el mismo rango de actividad fisiológica para la conductancia estomática y la transpiración.

El riego en la huerta fue constante durante el ciclo productivo, con excepción de las semanas de cosecha donde se disminuyeron los riegos para mantener el suelo seco y, de esa manera, facilitar el paso de la maquinaria. En el intervalo entre 0.5 y 0.8 MPa se encuentra la mayor cantidad de los datos. Los puntos con potencial hídrico más negativo representan las fechas de poco riego dado a la temporada de cosecha.

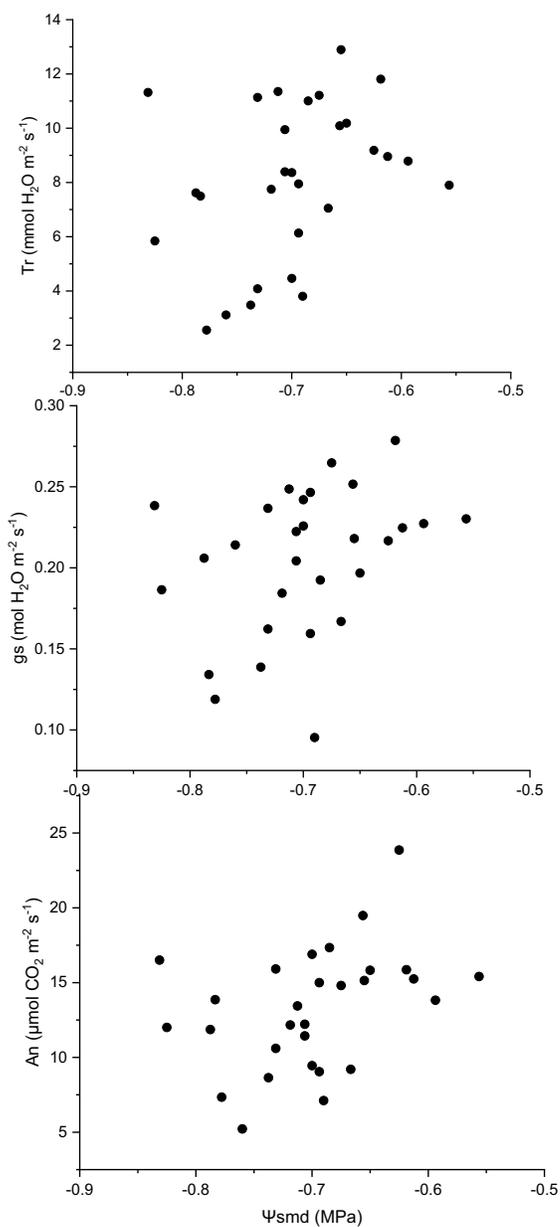


Figura 19. Valores de potencial hídrico (Ψ_{smd}) y el efecto en la conductancia estomática (g_s), fotosíntesis neta (A_n) y transpiración (Tr).

Los comportamientos de la variable LAI y fotosíntesis neta mostraron tendencias similares a través del ciclo productivo (Figura 20). El aumento de ambas variables coincidió en

el mes de junio y con un segundo pico en los días cercanos a la cosecha. Conforme se acercaban los meses fríos del año, ambas variables disminuyeron sus valores, paulatinamente; se llegó a los valores mínimos en el mes de diciembre, cerca de la senescencia. Primer pico de los valores encontrado en el mes de junio cuando los árboles se encuentra en crecimiento del fruto. El segundo pico se observó en los días cercanos a la cosecha de septiembre. Después, una disminución en los valores en los meses después de la cosecha.

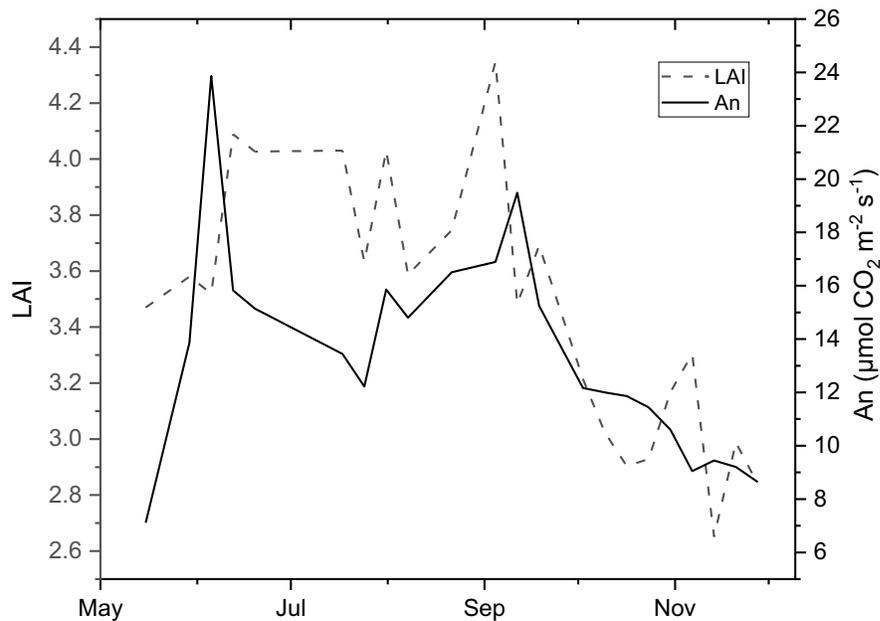


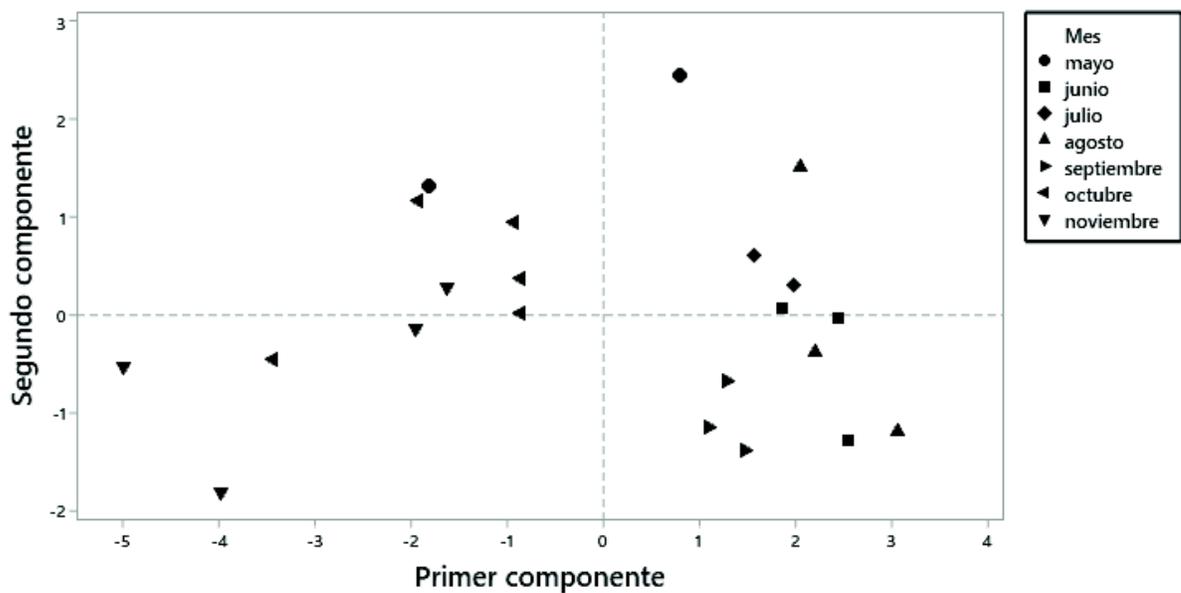
Figura 20. Evolución de la fotosíntesis neta (An) e índice de área foliar (LAI).

El LAI demostró su pico máximo el 11 de julio con 4.50; en estas fechas las tasas fotosintéticas oscilaban entre los 12 y 14 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 20). El segundo pico de LAI fue de 4.35 el 5 de septiembre, esta fecha coincide con el segundo pico fotosintético de 19.48 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

El análisis de componentes principales permitió identificar las variables que más contribuyen en la varianza entre las diferentes jornadas de medición. Las variables incluidas en

el análisis fueron productividad primaria bruta, índice de área foliar, potencial hídrico del tallo, fotosíntesis neta, conductancia estomática, transpiración, temperatura de las hojas, déficit de presión de vapor y temperatura del aire. Los primeros dos componentes explicaron el 73.2% del total de la varianza; el primer componente (x) se relacionó, principalmente, con la transpiración y, el segundo componente (y) se relacionó, mayormente, con la temperatura de las hojas.

Se concentraron jornadas de junio, agosto y septiembre en el cuadrante inferior derecho, donde se relaciona positivamente con el primer componente y se relaciona negativamente con el segundo componente. En estos meses se encontraron los dos picos fotosintéticos del ciclo productivo. Asimismo, se observan los datos de julio relacionados positivamente con el segundo componente temperatura de hojas y, también positivamente con el primer componente transpiración. En este mes de julio fue donde se observó la caída de fotosíntesis en verano (Figura 21). Sigue faltando la matriz de PCA, donde se muestre la contribución de cada variable en la contribución total.



Las variables exploratorias mostraron gran diversidad junto con la respuesta fotosintética de los árboles de nogal pecanero. Las variables que más destacaron fueron la transpiración y la temperatura de hojas, que explicaron el 72.3% de la varianza total del conjunto de variables. Las jornadas de mayor tasa fotosintética promedio se concentraron en el eje positivo del primer componente y negativo del segundo componente. Es decir que son jornadas con tasas de transpiración relativamente altas y temperatura de hojas alrededor de los 35°C.

VI. DISCUSIÓN

VI.1. Respuesta fotosintética a la luz

Como se ha mencionado, las tasas fotosintéticas varían dependiendo de diversas variables y una de las principales es la disponibilidad de luz, conforme aumenta la irradiancia la actividad fotosintética tiende a incrementarse hasta un cierto límite. A su vez, la actividad fotosintética en especies caducifolias varía por sus características como rápida brotación de las hojas, la existencia de un pico máximo de actividad fotosintética y decrementos al final del ciclo (Schulze et al., 2019).

Las curvas de respuesta fotosintética a la luz, naturalmente, incluyen un punto de compensación donde el intercambio gaseoso de CO₂ es nulo. Eventualmente, con el aumento continuo de la irradiancia se puede alcanzar una saturación lumínica (Schulze et al., 2019). El análisis de la respuesta a la luz de las hojas es necesario para ver la eficiencia y comportamiento fisiológico de las hojas (Azcón-Bieto y Talón, 2013); de esta manera, se observan los cambios en la actividad fotosintética dependiendo de las etapas del cultivo a través del ciclo productivo.

La mayor tasa de fotosíntesis se observó en niveles de PAR de los 1800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y se midió la curva de respuesta con los valores más altos el 25 de agosto. Alrededor de estas fechas los frutos se encuentran en sus fases finales para su llenado del fruto y su posterior cosecha. Por lo tanto, existieron dos etapas con eficiencia fotosintética elevada; la primera en el mes de junio y la segunda entre agosto y septiembre.

Antes de la caída fotosintética se promediaron valores máximos de la curva alrededor de los 19.0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; el nogal pecanero en la Costa de Hermosillo se diferencia en su eficiencia fotosintética con otras regiones nogaleras de dos maneras. En primer lugar, los nogales “Wichita” en la Costa de Hermosillo alcanzaron sus valores máximos en un nivel de PAR cercano a los 1800.0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; en contraste con los datos reportados por Lombardini et al. (2008), donde las máximas se encontraron alrededor de los 800 y 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en Texas con las variedades “Stuart” y “Pawnee”; por otra parte, los mismos valores de fotosíntesis en

ese rango de PAR se mantienen más elevados en el caso de la Costa de Hermosillo. (entre los 900 – 1000 de PAR, An, casi no cambia, similares a otras variedades)

En las curvas de respuesta a la luz se observaron los valores más altos alrededor del nivel de PAR de 1800.0 $\mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{s}^{-1}$; Briceño et al. (2019) mencionan que el nogal pecanero requiere de una intensidad de luz adecuada entre 700 y 800 $\mu\text{mol fotón m}^{-2}\text{s}^{-1}$, sin embargo, se encontraron tasas fotosintéticas mayores en niveles más altos de PAR en la Costa de Hermosillo. Lo anterior se puede deber a la exposición constante a altas irradiancias, por otro lado, la variedad Wichita es de las variedades mejores adaptadas a altas tasas de irradiancia (Briceño et al., 2019).

El comportamiento fotosintético del nogal pecanero demostró valores por encima de los reportes de fotosíntesis en nogal de otras regiones agrícolas; a su vez, mantuvo una mayor eficiencia fotosintética a través del ciclo productivo. No obstante, se observó una caída de la fotosíntesis en el mes de julio para recuperarse de nuevo en agosto; la segunda caída gradual de los valores se expresó en los meses de otoño hasta llegar a la senescencia de las hojas.

En los meses de verano se presentaron curvas de respuesta con valores altos en relación con el resto (Tabla 2). La curva con tasas fotosintéticas más altas se encontró en agosto cuando se alcanza el tamaño final de los frutos. Los datos obtenidos coinciden con los reportes de Lombardini et al. (2008), ya que las curvas que demuestran mayor eficiencia fotosintética se encuentran en los meses de verano, a excepción de la caída fotosintética en julio. En este mes de julio los árboles se encuentran en su etapa de crecimiento del fruto (Tarango, 2012). La actividad metabólica realizada en las hojas puede variar por la etapa fenológica de los árboles, existe evidencia significativa que la concentración de nutrientes como nitrógeno y fósforo en las hojas disminuye en etapas críticas, tales como floración y fructificación en frutales (Aburto-González et al., 2017).

VI.2. Recepción lumínica en el dosel

Se obtuvo la tendencia de la productividad Primaria Bruta (GPP en inglés) durante el año 2020, el primer pico máximo de GPP obtuvo un valor de 11.98 $\text{gC m}^{-2} \text{día}^{-1}$; lo anterior es la entrada total de carbono al sistema el día 6 de junio. El segundo pico fotosintético del 12 de septiembre

los valores de GPP oscilaron entre 9.69 y 10.32 gC m⁻² día⁻¹. Entre ambos picos se obtuvo una ligera baja en lo que fueron los meses de julio y agosto. Después del segundo pico se observó el descenso gradual de los valores hasta llegar a la senescencia.

La GPP bruta de la huerta presentó valores mixtos a través del ciclo productivo. Cerca de la fecha del primer pico máximo se registró un rango de temperatura ambiental entre 35 y 41 °C con el Li-6400 XT, que son valores cercanos a los más altos encontrados en el ciclo productivo. En el reporte de Croft et al. (2015) se menciona que la temperatura junto con la PAR son controladores primarios en la dinámica del consumo de carbono por el ecosistema.

El reporte de Smith *et al.* (2018), mencionan la tendencia de la GPP de un ecosistema árido de Arizona, donde se encontraron tasas máximas cercanas a los 5 gC m⁻² d⁻¹ entre julio y agosto. La vegetación de estudio incluía pastizales, matorrales, sabanas y bosques mixtos, utilizando imágenes satelitales con el Índice de Vegetación Mejorado (EVI en inglés). El valor máximo obtenido en la huerta de nogal pecanero fue de 11.98 gC m⁻² d⁻¹ en el mes de junio; por lo tanto, existe una diferencia importante entre un ecosistema natural y un agroecosistema en relación con su asimilación de carbono ambiental. Lo anterior apoya la hipótesis de Gilmanov et al. (2010) donde mencionan que los agroecosistemas pudieran estar capturando más CO₂ que los ecosistemas naturales. La GPP del agroecosistema demostró valores contrastantes en comparación con reportes de un ecosistema árido; esta variable expresó valores arriba del doble. A su vez, las máximas del índice de área foliar ocurrieron en el mismo mes de junio con una caída en el siguiente mes.

La etapa de brotación de los nogales es cuando las yemas se hinchan y, posteriormente, se aparece el primordio foliar. La ocurrencia de esta fase depende de la región geográfica y de la variedad del cultivo, siendo la “Wichita” una variedad de temprana brotación (Tarango, 2012). A partir de la etapa de brotación es cuando comienzan prácticas como la fertilización foliar, ya que el dosel comienza a incrementarse. La mayor parte de la radiación fotosintéticamente activa que es absorbida por las plantas depende del índice de área foliar, por lo que tienden a presentar tendencias similares (Lambers y Oliveira, 2019).

En el predio de estudio, los árboles comenzaron a brotar a partir de la segunda quincena de marzo. Estudios han demostrado que en bosques caducifolios se alcanza el índice de área

foliar máximo aproximadamente 10 días después del comienzo de la brotación (Croft et al., 2015); en el caso de la huerta de nogal fue diferente, ya que el índice de área foliar demostró su valor máximo el 11 de julio con 4.50. Otros frutales, como el durazno, alcanzan un valor máximo de LAI de 3.98 en su etapa de maduración (Ouyang, 2013). Es necesario alcanzar valores mayores de índice de área foliar, ya que se estimula una mejor recepción de luz y una mayor fotosíntesis. De esta manera, se incrementa el rendimiento del cultivo como lo reportes de Vahdatpour et al. (2021) en un cultivo de haba.

El LAI de la huerta experimental osciló entre 2.65 y 4.35 (Figura 12); dichos valores son relativamente altos en comparación con los datos reportados por Othman y Hilarie (2021) en dos huertas de nogal pecanero de 20-30 años con una oscilación de LAI entre 1.11 y 2.06. Específicamente, el índice de área foliar es directamente modificado por el manejo de podas de despunte o laterales que se manejen en cada campo agrícola (Tarango, 2012).

VI.3. Demandas atmosféricas en una zona árida

La demanda evapotranspirativa guiada por la temperatura y el DPV pueden presentar un efecto indirecto en el funcionamiento de procesos fisiológicos de las plantas (Kole, 2013). En los meses cálidos las temperaturas promedio al momento de medición oscilaron entre 37 y 40°C. Briceño et al. (2019) mencionan que el nogal pecanero se desarrolla en su ambiente natural con temperaturas máximas de verano de 41 hasta 46 °C, por lo que el estrés calórico pudiera no ser limitante en esta temporada productiva. En los meses de verano los valores del DPV promedio oscilaron entre 1.75 y 2.38 kPa, siendo la temporada con valores más altos (Figura 11). A su vez, la temperatura ambiental promedio al momento de medición en los mismos meses osciló entre 32.83 y 39.72°C (Figura 10).

Los valores más altos de conductancia estomática se presentaron en la primera quincena de agosto (Figura 13). Las temperaturas al momento de medición oscilaban entre 38 y 40°C. Dichas temperaturas se acercan a las máximas registradas en el año; Balfagón. (2020) reportó una respuesta a temperaturas altas en cítricos, donde la conductancia estomática aumentaba gracias al aumento simultaneo de la transpiración; de esta manera, las hojas se refrescan cuando se evapora el agua en la superficie de las células en el mesófilo (Lambers y Oliveira, 2019).

El potencial hídrico (ψ) de los tallos se mantuvo constante durante la mayor parte del ciclo. La mayoría de los valores se encontraron entre -0.59 y -0.82 MPa. El riego en la huerta fue casi constante durante el ciclo productivo, con excepción de las semanas de cosecha donde se disminuyeron los riegos para mantener el suelo seco y, de esa manera, facilitar el paso de la maquinaria.

La mayor parte del intercambio gaseoso entre las hojas y la atmósfera depende de la conductancia estomática y, esta variable representa una alta influencia en la pérdida de agua de la planta (Schulze et al., 2019). El valor más alto de conductancia estomática se observó el primer día de agosto con $0.28 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; en esta jornada se registró un valor del DPV de 2.20 kPa con el Li-6400XT y un valor de 2.16 kPa con la torre de covarianza. Dichos valores oscilan entre los más altos registrados en el ciclo productivo. En cultivos de cítricos en zonas áridas la conductancia estomática desciende en las temporadas con DPV alto (Jamshidi et al., 2020). No obstante, esta tendencia se pronunció en tratamientos de condiciones de estrés hídrico con riegos disminuidos.

Las condiciones ambientales como la temperatura del aire y la humedad atmosférica crean un escenario donde el agua se transfiere desde las plantas a la atmósfera por medio del gradiente del potencial hídrico. Las hojas de los árboles regulan su pérdida de agua en la transpiración por medio del control estomático; los estomas permanecen abiertos para permitir la asimilación del carbono, pero a su vez se aumenta la transpiración (Lambers y Oliveira, 2019). Por esta razón, la transpiración y la conductancia estomática se encuentran positivamente relacionadas como resultado de las diferencias de concentración de vapor de agua entre el aire y las hojas.

Las condiciones de la Costa de Hermosillo demuestran altas temperaturas en verano y un déficit de presión de vapor cercanos a los 4.0 kPa. A su vez, las precipitaciones de verano fueron casi nulas en el 2020; por lo tanto, el aire no recibió la humedad que normalmente obtiene en los meses de julio, agosto y septiembre. Dicho lo anterior, las condiciones ambientales y de manejo (riego) propiciaron la apertura de las estomas constantemente durante el ciclo productivo.

El aumento de la demanda evaporativa incrementa paralelamente con la temperatura ambiental; esto da como resultado una mayor tasa de transpiración de las plantas (Kole, 2013).

El valor más alto de transpiración se registró el 20 de junio con $12.89 \text{ H}_2\text{O mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; la temperatura ambiental del mismo día se registró con $41.34 \text{ }^\circ\text{C}$ con el Li-6400 XT, dicha temperatura es la segunda más alta registrada en el ciclo productivo. Las temperaturas altas pueden provocar estrés calórico dando como resultado una transpiración excesiva que puede alterar las reservas de los árboles de nogal pecanero (Briceño et al., 2019).

En los meses de verano donde se presentaron los valores altos de transpiración y se registraron tasas fotosintéticas entre 15 y $20 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Los datos de Rosati et al. (2006) reportaron tasas fotosintéticas en el mismo rango de valores en un cultivo de nogal (*J. regia*) bien irrigado. El manejo adecuado de la irrigación requiere cuantificar el consumo de agua de las plantas que es equivalente a la transpiración (Ayyoub et al., 2017). Los valores mínimos de transpiración encontrados en diciembre son similares a los valores mínimos de Othman et al. (2014) de agosto a octubre. Mientras que en la Costa de Hermosillo se mantienen activas las actividades fisiológicas, como la transpiración, hasta el invierno.

Las altas temperaturas pueden perjudicar el funcionamiento de las plantas por un efecto directo al aumento de la temperatura de sus tejidos (Kole, 2013). En condiciones de altas temperaturas la reacción de oxigenación incrementa más que la carboxilación, por lo que se puede presentar una importante fotorrespiración, disminuyendo la fotosíntesis neta (Lambers y Oliveira, 2019). Durante el ciclo productivo no se encontraron promedios de temperaturas de hojas que comprometan el proceso fotosintético.

La temperatura máxima promedio de hojas se registró el 20 de junio con $41.8 \text{ }^\circ\text{C}$; valores similares se mantuvieron en los meses de verano. Las tasas de fotosíntesis neta en nogal pecanero en la Costa de Hermosillo se reducen significativamente a partir de los 45°C (Ramos y Martínez, 2020). La relación positiva entre la temperatura de las hojas y la fotosíntesis ($r^2=0.687$, $p<0.001$) presenta una tendencia ascendente.

Asimismo, las bajas temperaturas limitan las tasas de reacciones enzimáticas relacionadas a las reacciones oscuras de la fotosíntesis y, se ralentizan procesos bioquímicos y el transporte de electrones (Lambers y Oliveira, 2019). Las temperaturas mínimas promedio al momento de medición llegaron hasta 21.28°C en los meses de otoño; paralelamente, la fotosíntesis neta fue disminuyendo en otoño hasta llegar a hasta los $0.66 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El decremento simultáneo

de las temperaturas de las hojas y la fotosíntesis se mantiene hasta llegar a la etapa de senescencia.

El DPV y la temperatura ambiental son dos de las principales variables ambientales que representan a las respuestas fisiológicas de las plantas; por ejemplo, un aumento en el déficit de presión de vapor de la atmósfera eleva los valores de transpiración sin un aumento paralelo de la fotosíntesis. Así mismo, una elevada temperatura del aire junto con un alto DPV disminuye la eficiencia fotosintética (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Existe evidencia que se presenta mayor sensibilidad al estrés hídrico en diversos procesos como crecimiento del fruto (Steduto et al., 2012). En el mes de julio es cuando se presenta el estado masoso de los frutos y su tasa de crecimiento es acelerado, mismo mes cuando se presenta la baja fotosintética del verano.

Por otro lado, un decremento en la conductancia estomática puede ser respuesta a los altos niveles de DPV, pero esta sensibilidad estomática puede variar entre especies (Lambers y Oliveira, 2019). Existe evidencia de que, como respuesta a los incrementos del déficit de presión de vapor, los estomas de árboles de olivo se cierran parcialmente y se presenta un decremento en la asimilación de carbono, incluso si se mantienen bien irrigados (Steduto et al., 2012).

VI.4. Estado del agua

El estatus hídrico de las plantas medido con el potencial hídrico de los tallos a medio-día se mantuvo en un rango entre -0.59 y -0.82 MPa, sin llegar a los límites extremos donde los procesos fisiológicos se ven afectados. Existieron excepciones donde se obtuvieron valores más negativos en las fechas de cosecha por la privación del riego. Los datos reportados por Othman et al. (2014) confirman el decremento significativo de la fotosíntesis a partir de los -0.9 MPa; se encontraron solo 3 datos donde los valores del potencial hídrico superaban este valor. Estos datos coinciden con las fechas cercanas a la cosecha cuando disminuyen el riego por cuestiones del manejo de la maquinaria agrícola. Dado a que el potencial hídrico se encontraba en niveles donde la fotosíntesis no se ve afectada significativamente, se puede considerar que en este sistema agrícola el agua no es limitante para este proceso fisiológico.

Rosati et al. (2006), tasas fotosintéticas cercanas a los $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ cuando el potencial hídrico de los tallos oscilaba entre -0.1 y -0.4 MPa. Los datos mencionados fueron

obtenidos en una huerta de nogal europeo en California. Por otro lado, en el nogal pecanero de la Costa de Hermosillo se mantuvieron valores similares de fotosíntesis en un rango común de -0.5 y -0.8 MPa a través del ciclo productivo; por lo tanto, hubo un mayor aprovechamiento del recurso hídrico en el nogal pecanero, ya que el estatus hídrico de las plantas se mantuvo en valores más negativos durante el ciclo. A su vez, los valores de fotosíntesis eran similares, incluso mayores en algunas jornadas de medición.

Los datos del potencial hídrico de los tallos mostraron que el estatus hídrico del nogal pecanero se mantuvo en condiciones que no afectan los procesos fisiológicos como la conductancia estomática. Por lo tanto, el recurso agua no fue limitante para la conductancia estomática. Los datos de Othman et al. (2014) en nogal pecanero mencionan una disminución significativa entre el 35% y 55% de la conductancia estomática cuando los valores del potencial hídrico de los tallos estaban entre -0.90 y -1.45 MPa, debajo de -1.45 MPa puede bajar la conductancia hasta un 90%. En el sitio experimental se registraron solo 3 datos donde el potencial hídrico de los tallos se encontraba en dicho rango, los valores fueron de -0.94, -1.23 y -1.46 MPa que se registraron el 15 de agosto, 29 de septiembre y 13 de octubre, respectivamente.

VI.5. Fotosíntesis a través del ciclo productivo

La fotosíntesis de las huertas de nogal pecanero es un factor importante que determina la rentabilidad del proyecto agrícola, ya que influye en los rendimientos de nuez; lo anterior se debe a que con este proceso fisiológico se aprovecha la energía lumínica para estimular la producción de materia seca en los árboles (Lombardini et al., 2008). Las tendencias de las tasas fotosintéticas dependen de variables tanto ambientales (temperaturas y luz) como la disponibilidad de agua y nutrientes, y también de variables fisiológicas de los individuos (Lambers y Oliveira, 2019). Aun así, cuando las condiciones no son favorables, ciertas especies tienden a continuar con su proceso fotosintético, debido a un proceso de aclimatación o adaptación en el sitio donde se desarrollen. En el caso del nogal pecanero en la Costa de Hermosillo, se encuentra en una zona árida cálida; esta especie de nogal se desarrolla naturalmente en ambientes húmedos y templados (Wells et al., 2017). Por consiguiente, ciertas variables ambientales pueden ser desfavorables para el desarrollo fenológico del cultivo.

Los valores obtenidos en este estudio fueron relativamente más altos en comparación con huertas de nogal pecanero en otros sitios como Texas y Nuevo México (Heerema et al. 2014 y Lombardini et al. 2008). La tasa promedio máxima de fotosíntesis encontrada en el ciclo productivo del año 2020 en la Costa de Hermosillo estuvo arriba de $20.0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, al inicio del verano cuando los nogales se encuentran en su etapa fenológica del crecimiento del fruto.

Al acercarse la temporada de cosecha, la tasa fotosintética llegó a valores de $19.48 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ el 12 de septiembre; este segundo pico fotosintético se presentó a finales del verano y, durante estas fechas se mantuvieron valores entre 12.22 y $19.48 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Dichos valores son similares e incluso mayores a los datos reportados en nogal pecanero en Nuevo México durante la etapa del llenado del fruto (Heerema et al., 2014).

Por otro lado, los datos se asemejaron a los reportes de Rosati (2006) donde las tasas de fotosíntesis de nogal europeo en el condado de Solano, California llegaron a valores cercanos a los $20.0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En ese reporte se realizaron las mediciones en agosto, cuando los valores se asemejan a los valores de nogal pecanero de la Costa de Hermosillo en el mismo mes. En este mes de agosto, los valores se aproximaban al segundo pico fotosintético de septiembre; lo anterior puede deberse a un conjunto de variables (fenología, temperatura, luz) que dan como resultado este fenómeno. No obstante, no existen reportes de tasas fotosintéticas en las etapas tempranas del ciclo productivo y fenológico del nogal pecanero.

El rango de los valores de fotosíntesis encontrados en el ciclo 2020 fue entre 0.66 y $23.86 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 7). Estos son promedios de los valores máximos de fotosíntesis en cada sesión de medición. Se encontró evidencia estadística ($p < 0.001$) con una ANOVA de una vía y con la prueba de Tukey, que el mes con mayor actividad fotosintética promedio fue junio (Tabla 1). En este mes los árboles comienzan el crecimiento rápido del fruto; al comienzo de esta etapa fenológica el manejo agronómico se enfoca en cuidar ciertos factores como riegos y fertilizaciones nitrogenadas para asegurar mayores tamaños del fruto (Tarango, 2012).

El segundo mes con mayor tasa fotosintética fue agosto con un promedio de $16.01 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, alrededor de esta fecha se logra el crecimiento máximo del fruto y, también existe

un aumento en el desarrollo de las raíces. Por ello, el plan de fertilización se adecúa a esta etapa del cultivo. (Tarango, 2012)

El tamaño final de los frutos depende en cierta parte de la actividad fisiológica (fotosíntesis, potencial hídrico, transpiración, etc.) de los árboles. En los siguientes meses, después de la cosecha de septiembre, las tasas fotosintéticas fueron disminuyendo gradualmente al acercarse el reposo invernal. Los datos de fotosíntesis en los meses de otoño coincidieron con los reportes de Heerema et al. (2014) donde las tasas oscilan entre 10 y 15 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$; en esta etapa las actividades metabólicas se reducen al mínimo para entrar en dormancia. (Tarango, 2012)

VI.6. Comportamiento general del sistema

El intercambio gaseoso entre las hojas y la atmósfera regulado por la apertura estomática permite la salida de agua de la planta vía transpiración y la entrada de CO_2 (Schulze et al., 2019); Una transpiración excesiva, generalmente, afecta considerablemente el rendimiento de los cultivos (Azcón-Bieto y Talón, 2013). No obstante, el aumento de la tasa de transpiración incrementa el flujo de nutrientes minerales dentro de la planta y, a su vez, enfría la superficie de las hojas cuando las temperaturas son altas (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Con ausencia de la transpiración la temperatura de las hojas aumenta, ralentizando procesos fisiológicos como la fotosíntesis hasta niveles severos (Lambers y Oliveira, 2019).

En situaciones donde la transpiración es mayor que la disponibilidad de agua para la planta puede llegar a un escenario de estrés hídrico (Schulze et al., 2019). En el caso de la huerta de nogal pecanero de estudio, el estatus hídrico de las plantas se mantuvo estable sin afectar la eficiencia de procesos fisiológicos como la fotosíntesis. Othman et al. (2014) reportó que la fotosíntesis neta del nogal pecanero se ve disminuida significativamente con valores de potencial hídrico del tallo por debajo de -0.9 MPa . Como se mencionó anteriormente, los valores de potencial hídrico del tallo durante el ciclo productivo se mantuvieron, mayormente, entre -0.5 y -0.8 MPa . Por lo tanto, se puede considerar que no existió una limitante hídrica dentro del agroecosistema.

La disminución de la temperatura de las hojas al momento de medición se asocia con las mayores tasas fotosintéticas del ciclo productivo del nogal pecanero. Ramos y Martínez (2020, no cita) mencionan una disminución significativa de la fotosíntesis en el nogal pecanero de la Costa de Hermosillo en temperaturas a partir de los 45°C. Las mayores tasas fotosintéticas se encontraron en jornadas con temperatura de hojas alrededor de los 35°C, sin mencionar que no se obtuvieron datos arriba de los 42°C. La eficiencia de la transpiración generó un efecto de enfriamiento de la superficie de las hojas, mejorando el rendimiento fotosintético.

VII. CONCLUSIONES

La fotosíntesis del nogal pecanero (*Carya illinoensis*) en la Costa de Hermosillo mantiene tendencias fluctuantes a través de su ciclo productivo. Se registraron dos picos máximos de valores promedio de la tasa fotosintética neta. El primer pico fue de $23.86 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ el 6 de junio y el segundo fue el 12 de septiembre con $19.5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; en ambas fechas, los árboles se encuentran en etapas fenológicas de desarrollo y maduración. Por ello, se puede inferir que en las fases de fructificación del nogal pecanero se aumentan las tasas fotosintéticas. Por ello, se recomienda analizar las hojas que presenten este aumento significativo de la fotosíntesis en estas fechas específicas para observar su contenido de elementos como el carbono, nitrógeno y potasio y, de esta manera, se puede obtener una evaluación más completa y profunda sobre el fenómeno fotosintético en el nogal pecanero en fructificación.

El 6 de junio el índice de área foliar fue de 3.52 y siete días después subió a 4.09 (el segundo valor máximo). En estas fechas se pronunció el crecimiento del dosel de los árboles y la tasa fotosintética fue relativamente alta en hojas jóvenes sin daños por insolación o plagas. Este gran aumento del LAI nos indica el intervalo temporal de la fase vegetativa de los árboles. Esta brotación puede variar dependiendo del contenido de reservas de carbohidratos en las raíces. Se pueden evaluar plantaciones con diferentes cantidades de reservas para observar su efecto en esta temporada de brotación del cultivo.

Algo muy característico del presente estudio fue que la fotosíntesis del nogal pecanero presentó una disminución al inicio del verano, lo cual puede ser consecuencia de la alta demanda energética por el crecimiento del fruto y/o las altas temperaturas, por lo que se recomienda la aplicación de un protector solar o un riego por microaspersión para reducir la temperatura del follaje y reducir el daño o impacto en la tasa fotosintética.

En el mes de julio fue cuando se redujo ligeramente la tasa fotosintética, siendo el mes de altas temperaturas, presencia de plagas, alta irradiancia y DPV elevado. Es clara la presión ambiental hacia los árboles, por lo que es necesario un estudio más profundo de los procesos fisiológicos y de los análisis foliares en estas fechas críticas. También se recomienda observar la condición de las hojas, dado a que en julio se observó la mayor presencia de daños en las hojas por la alta irradiancia, altas temperaturas y por pulgones. Por otro lado, en este mes el

fruto se encuentra en su fase de crecimiento constante. Es posible que la alta exigencia de nutrientes y agua por parte de la planta en estas fechas, junto con las condiciones ambientales, den como resultado un mayor estrés y una disminución en las tasas fotosintéticas.

El potencial hídrico se mantuvo en valores que no comprometen significativamente a la fotosíntesis, por ello, se puede descartar que el recurso hídrico es una limitante para este sistema agrícola. El estatus hídrico del nogal pecanero en la Costa de Hermosillo durante todo su ciclo productivo se encuentra por encima del nivel crítico donde se disminuye significativamente el rendimiento. No obstante, la región mantiene un déficit de agua por la sobreexplotación de los acuíferos, por lo que se recomienda medir y evaluar intensivamente los riegos para disminuirlos sin comprometer los rendimientos del cultivo.

Por otro lado, junio fue el mes con el mayor promedio de fotosíntesis en el ciclo productivo seguido por el mes de agosto. Las condiciones ambientales extremas que caracterizan a la Costa de Hermosillo como zona árida cálida (temperatura, irradiancia, DPV, etc.), de cierta manera también pueden potenciar este proceso fotosintético. Paralelamente, la eficiencia fotosintética aumentó también en agosto, datos que se observaron con las curvas de respuesta a la luz; estos puntos temporales son importantes para gestionar el manejo agronómico enfocado en la eficiencia del uso del recurso lumínico.

En los meses de otoño la tasa fotosintética fue disminuyendo gradualmente, después de la cosecha. No obstante, se registró actividad fisiológica importante en esta etapa del ciclo. Dicho lo anterior, es necesario un monitoreo y evaluación constante hasta la senescencia. De esta manera, se pueden mejorar las prácticas postcosecha para asegurar las reservas de los árboles para la siguiente temporada.

Por último, las variables que más influenciaron en el comportamiento del conjunto de variables fueron la transpiración y la temperatura de las hojas. Las mayores tasas de transpiración en los meses de verano ayudaron a mejorar las condiciones para los procesos fotosintéticos. A su vez, la importancia de mantener la temperatura de las hojas en niveles óptimos es crucial para mejorar el rendimiento fisiológico de los árboles. Se necesitan más estrategias agronómicas para regular el balance energético de las hojas inducido por la irradiancia y la temperatura ambiental.

VIII. LITERATURA CITADA

- Aburto-González, C. A.; G., Alejo-Santiago, L.G. Ramírez-Guerrero, R. Sánchez-Hernández. 2017. Concentración foliar de macronutrientes en diferentes etapas fenológicas del litchi cv. Brewster; *Interciencia*, 42(7):441-445.
- Fundación Produce Sonora. 2009. Gestión de la Innovación en la Productora de Nuez. Agenda de Innovación de Sonora. Hermosillo, Sonora.
- Ayyoub, A., S. Er-Raki, S. Khabba, O. Merlin, J. Ezzahar, J.C. Rodriguez, A. Bahlaoui, A. Chebouni. 2017. A simple and alternative approach based on reference evapotranspiration and leaf area index for estimating tree transpiration in semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 188: 61-68.
- Azcón-Bieto, J. y M. Talón. 2013. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. McGraw-Hill. Madrid, España.
- Balfagón, D. 2020. High Temperatures Modified Plant Responses to Abiotic Stress Situations. Tesis de Doctorado. Universitat Jaume. Escuela de Doctorado de la Universitat Jaume. Catellón de la Plana, España.
- Bastías, R. y L. Corelli-Grappadelli. 2012. Light Quality Management in Fruit Orchards: Physiological and Technological Aspects. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72: 574- 581.
- Briceño, E., A. Moreno, L.M. Valenzuela, C. García, J.R. Esparza, R. Rodríguez, J. Molina Jaime. 2019. Influencia de la temperatura e irradiación en la concentración de almidón en *Carya illinoensis* K. Koch variedades Wichita y Western. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25: 306-314.
- Brisson, F. R. (1976). *Cultivo del Nogal Pecanero (1era Edición)*. Comisión Nacional de Fruticultura. México.
- Bolin, B., B.R. Döös, J. Jager & R.A. Warrick. 1986. *The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystems*. John Wiley & Sons.
- Calderón-Jurado, M. 2021. Aplicación de Biorreguladores y su Influencia en la Fisiología del Nogal Pecanero para Mitigar la Alternancia. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ciencias Agrotecnológicas. Chihuahua, Chihuahua.
- Camacho, F. 2016. Productividad Primaria Bruta y Neta en Plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en la Región del Bío Bío, Chile. Tesis para grado de ingeniería. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Santiago, Chile.
- Carlisle, E., D. Smart, L.E. Williams Larry E., M. Summers. 2010. California Vineyard Greenhouse Gas Emissions. Assessment of Available literature and Determination of Research needs. California Sustainable Winegrowing Alliance. California, Estados Unidos.

- CONACYT. 2017. La Nuez Pecanera en México. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Centroconacyt.mx (<https://centrosconacyt.mx/objeto/nuez-pecanera/>)
- CONAGUA. 2006. Estadísticas del Agua en México. Edición 2006. SEMARNAT. Ciudad de México, México.
- Croft, H., J.M. Chen, N.J. Froelich, B. Chen, R.M. Staebler. 2015. Seasonal controls of canopy chlorophyll content on forest carbon uptake: Implications for GPP modeling. *Journal of Geophysics Resources Biogeoscience*. 120: 1576-1586.
- Dinpashoh, Y., S. Jahanbakhsh-Asl, A. A. Rasouli, M. Foroughi & V. P. Singh, 2018. Impact of climate change on potential evapotranspiration (case study: west and NW of Iran). *Theoretical and Applied Climatology*. 136: 185-201.
- FAO. 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. FAO Statistics Division. Italy.
- Fereres, E. y M. A. Soriano. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*. 58(2): 147-159. doi:10.1093/jxb/erl165
- Gilmanov, T., V. Allard, D. Baldocchi, P. Béziat, E. Ceschia, P. Cellier, J.F. Soussana. 2009. Productivity, Respiration, and Light-Response Parameters of World Grassland and AgroEcosystems Derived from Flux-Tower Measurements.
- Grageda, J., J. A. Ruiz Corral, G.E. García Romero, J.H. Núñez Moreno, J. Valenzuela Lagarda, O. Ruiz Álvarez y A. Jiménez Lagunes. 2016. Efecto del Cambio Climático en la Acumulación de Horas Frío en la Región Nogalera de Hermosillo, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13: 2487-2495.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2019. Comunicado de Prensa del IPCC. 2020 de IPCC. (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/2019-PRESS-IPCC-50th-IPCC-Session_es.pdf).
- Han, M., F. Peng, P. Marshall. 2018. Pecan phenology in Southeastern China. *Annals of Applied Biology*. 172: 160-169. doi:10.1111/aab.12408.
- Heberling M. 2013. A practical guide to measuring leaf-level photosynthesis. (https://sites.google.com/site/fridleylab/home/protocols/Heberling_PhotosynthesisProtocol_Feb2014.p)
- Heerema, R., D. VanLeeuwen, V. P. Gutschick y B. Cook. 2014. Leaf Photosynthesis in Nitrogen-starved ‘Western’ Pecan Is Lower on Fruiting Shoots than Non-fruiting Shoots during Kernel Fill. *Hortscience*. 139: 267–274.
- INEGI. 2009. Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Hermosillo, Sonora.
- Jamshidi, S., S. Zand-Parsa, A. A. Kamgar-Haghighi, A. R. Shahsavari, D. Niyogi. 2020. Evapotranspiration, Crop Coefficients, and Physiological Responses of Citrus Trees in Semi-arid Climatic Conditions. *Agricultural Water Management*. 227: 105-838. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105838.
- Kole, C. 2013. *Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops*. Springer. India.

- Lal, R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security Science. 304: 1623-1627.
- Lambers, H. and R. Oliveira. 2019. Plant Physiological Ecology Third Edition. Springer Nature Switzerland. Cham, Switzerland.
- Lombardini, L., H. Restrepo-Díaz y A. Volder. 2008. Photosynthetic Light Response and Epidermal Characteristics of Sun and Shade Pecan Leaves. American Society for Horticultural Science. 134(3): 372-378.
- Manning, W. 1949. The Genus *Carya* in Mexico. Journal of the Arnold Arboretum. 30: 425-432.
- Monreal, R., M. Rangel, J. Castillo y M. Morales. 2002. Estudio de Cuantificación de la Recarga del Acuífero de la Costa de Hermosillo, municipio de Hermosillo, Sonora, México. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora.
- Núñez Moreno, J. H., B.G. Valdez, Martínez Díaz & Valenzuela Corneo, E. 2001. El Nogal Pecanero en Sonora. Libro Técnico No. 3. INIFAP. Hermosillo, Sonora.
- Ordóñez, J., & O. Masera. 2016. Captura de carbono ante el cambio climático. Madera y Bosques. 7(1): 3-12.
- Othman Y., D. VanLeeuwen, R. Heerema y R. St. Hilaire. 2014. Midday Stem Water Potential Values Needed to Maintain Photosynthesis and Leaf Gas Exchange Established for Pecan. American Society for Horticulture Science. 139(5): 537-546.
- Othman Y. y R. St. Hilaire. 2021. Using Multispectral Data from Landsat ETM+ to Estimate Leaf Area Index of Pecan Orchards. Fresenius Environmental Bulletin. 30(3): 2613-2618.
- Ouyang, Z., X. Mei, Y. Li, J. Guo. 2013. Measurements of water dissipation and water use efficiency at the canopy level in a peach orchard. Agricultural Water Management. 129:80-86.
- Retes, R., N. Palafox, A. Ramsés, M. Medina, S. Denogean Ballesteros, F. G. Martin Rivera y Martha H. 2014. Análisis de Rentabilidad del Cultivo de Nogal Pecanero en la Costa de Hermosillo. Revista Mexicana de Agronegocios. 34: 872-882.
- Rodríguez, J.C., J. Grageda, C.J. Watts, A. J. Garatuza-Payan, A.E. Castellanos-Villegas, J. Rodríguez-Casas, J. Saiz y V. Olavarrieta. 2010. Water use by perennial crops on the lower, Sonora watershed. Journal of Arid Environment 74:603-610
- Rodríguez, J.C., J.A. Saiz-Rodríguez, C. Lizárraga-Celaya, J.E. López-Avenidaño, E. Yopez, E. González, A. Ochoa-Meza, J. Rodríguez-Casas, F. Paz-Pellat y C. Watts-Thorp, 2018. Los agroecosistemas ¿Funcionan como Sumidero de Carbono?. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México. Programa Mexicano del Carbono.
- Salas-Rivera R., L. A. Valdez-Aguilar, D. Alvarado-Camarillo, E. Rascón-Alvarado, F.M. Peña-Ramos, J.A. González-Fuentes. 2020. Balance Potasio: Calcio, Relación con el Déficit de Presión de Vapor y la Radiación Fotosintéticamente Activa en Tomate de Invernadero. Terra Latinoamericana. 38(2): 301-311.

- SIAP-SAGARPA. 2012. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. (http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/)
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2016). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta Nueva Generación (SIACONNG). <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Schulze, E.D., E. Beck, S. Clemens, K. Müller-Hohenstein. 2019. Plant Ecology. Springer. Berlin, Alemania.
- Skaggs, T.H., R.G.Andersona, J.G.Alfierib, T.M.Scanlonc y W.P.Kustas. 2018. Fluxpart: Open-source software for partitioning carbon dioxide and water vapor fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*. 253. 218-224.
- Smith W.K., J. A. Biederman, R. L. Scott, D. J. P. Moore¹, M. He, J. S. Kimball, D. Yan A. Hudson, M. L. Barnes, N. MacBean, A. M. Fox, y M. E. Litvak. 2018. Chlorophyll Fluorescence Better Captures Seasonal and Interannual Gross Primary Productivity Dynamics Across Dryland Ecosystems of Southwestern North America. *Geophysical Research Letters*. 45: 748- 757.
- Tarango, H. 2012. Manejo del Nogal Pecanero con base en su Fenología. SAGARPA. Cd. Delicias, Chihuahua.
- Rangel Medina, M., R. Monreal S., M. Morales M., J. Castillo Gurrola. 2004. Estimation of the Vulnerability to Saline Intrusion of the Coast of Hermosillo Aquifer, Sonora, Mexico. *Geofísica Internacional*. 43(4): 611-621.
- Rosati A., S. G. Metcalf, R. P. Buchner, A. E. Fulton y B. D. Lampinen. 2006. Physiological Effects of Kaolin Applications in Well-irrigated and Water-stressed Walnut and Almond Trees. *Annals of Botany*. 98: 267–275.
- Scandellari, F., G. Caruso, G. Liguori, F. Meggio, A. Palese, D. Zanotelli, M. Tagliavini. 2016. A Survey of Carbon Sequestration Potential of Orchards and Vineyards in Italy. *European Journal of Horticultural Science*. 81(2): 106-114.
- Steduto, P., T.C. Hsiao, E. Fereres, D. Raes. 2012. Respuesta del Rendimiento de los Cultivos al Agua. Estudio FAO: Riego y Drenaje.
- Vahdatpour, F., H. Aroiee, K. Hemmati, B. Kamkar y F. Sheikh. 2021. Leaf Area Index, Dry Matter Accumulation and Allocation Trends in *Vicia faba* L. Affected by Inoculation with Rhizobium and Pseudomonas. *Journal of Agriculture Science Technology*. 23: 903-914.
- Wells, L. 2015. Irrigation Water Management for Pecans in Humid Climates. *HortScience*. 50: 1070-1074.
- Zaragoza-Lira, M. M., P. Preciado-Rangel, U. Figueroa-Viramontes, J.L. García-Hernández, M. Fortis-Hernández¹, M.A. Segura-Castruita, Á. Lagarda Murrieta, E. Madero-Tamargo. 2011. Aplicación de Composta en la Producción del Nogal Pecanero. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17(1): 33-37.