



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FRUTICULTURA

EFFECTOS DE NIVELES DE HUMEDAD EN EL SUELO EN EL DESARROLLO DE *Carica papaya* L.

DAVID TRUJILLO GARCÍA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO.

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Efectos de niveles de humedad en el suelo en el desarrollo de *Carica papaya* L.**, realizada por el estudiante: **David Trujillo García**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

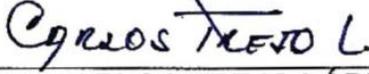
MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FRUTICULTURA

CONSEJO PARTICULAR

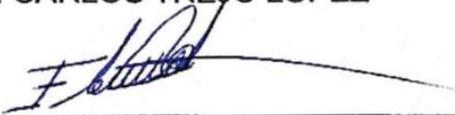
CONSEJERO


DR. ALBERTO ENRIQUE BECERRIL ROMÁN

CO-DIRECTOR


DR. CARLOS TREJO LÓPEZ

ASESOR


DR. EBANDRO USCANGA MORTERA

ASESOR


DR. MARCO A. OTERO SÁNCHEZ

ASESOR


M.C. DAVID JAÉN CONTRERAS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, octubre de 2022

EFFECTOS DE NIVELES DE HUMEDAD EN EL SUELO EN EL DESARROLLO DE *Carica papaya* L.

David Trujillo García, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

Ante la inminente posibilidad de escasez de agua en el mundo, son necesarias alternativas para eficientizar su uso y asegurar la producción agrícola con un gasto mínimo eficaz. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue determinar en *Carica papaya* L, respuestas fisiológicas, desarrollo y productividad al déficit de riego en un sistema semi-protegido en condiciones de trópico subhúmedo. El experimento se estableció en condiciones semi-protegidas de casa sombra, en macetas con capacidad de 60 kg. Se aplicaron tres tratamientos: Testigo (T1), aplicación al sustrato de 1678 L de agua pl^{-1} ; tratamiento RDI-41 (T2), de 679.79 L de agua pl^{-1} ; y tratamiento RDI-34 (T3), de 573.6 L de agua pl^{-1} . Los tratamientos se aplicaron desde los 89 a los 296 días después del trasplante (ddt) y se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completamente al azar con 6 repeticiones. Los resultados mostraron modificaciones en las relaciones hídricas de las plantas de papaya, así como también reducción parcial del intercambio de gases, aumentando la eficiencia en el uso del agua. Los tratamientos de riego deficitario aplicados disminuyeron el crecimiento vegetativo de *Carica papaya* L., pero no afectaron significativamente el rendimiento y el número de frutos por planta. Los tratamientos de riego deficitario lograron maximizar la productividad del agua en un 89 % comparado con plantas de riego a capacidad de campo, obteniendo una reducción de la huella hídrica azul, en promedio, se necesitaron 25 L de agua $kg\ fruto^{-1}$ (RDI-41 y RDI-34). La calidad de la fruta no mostró cambios significativos entre tratamientos de riego.

Palabras clave: *Carica papaya* L., déficit de riego, intercambio de gases, relaciones hídricas, prolina.

**EFFECTS OF MOISTURE LEVELS IN THE SOIL
IN THE DEVELOPMENT OF *Carica papaya* L**

**David Trujillo García, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022**

ABSTRACT

Given the imminent scarcity of water in the world, alternatives are needed to make it more efficient to use it and ensure agricultural production with its minimum consumption. Therefore, the objective of the present research was to determine physiological responses, development and productivity of *Carica papaya* L. to the deficit of irrigation in a semi-protected system in subhumid tropic conditions. The experiment was established in semi-protected conditions under a shade house, in pots with a capacity of 60 kg. Three treatments were applied: Control (T1), application to the substrate of 1678 L of water pl^{-1} ; treatment RDI-41 (T2), 679.79 L of water pl^{-1} ; and treatment RDI-34 (T3), 573.6 L water pl^{-1} . The treatments were applied from 89 to 296 days after transplant (ddt) and were distributed in a randomized complete block design with 6 replicates. The results showed modifications in the water relations of papaya plants, as well as partial reduction of gas exchange, increasing efficiency in water use. The deficit irrigation treatments applied decreased the vegetative growth of *Carica papaya* L., but did not affect the yield and the number of fruits per plant. Deficient irrigation treatments managed to maximize water productivity by 89 % compared to field capacity irrigation plants, obtaining a reduction of the blue water footprint, an average 25 L of water kg fruit^{-1} (RDI-41 and RDI-34) were needed. The quality of the fruit showed no significant changes among irrigation treatments.

Key words: *Carica papaya* L., deficit irrigation, gas exchange, proline, Water relations.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Colegio de Postgraduados, por la oportunidad de poder realizar mis estudios de posgrado y el presente trabajo de investigación.

Al campus Montecillos, así como al programa de Recursos genéticos y Productividad-Fruticultura y Botánica, por las facilidades y atenciones durante la presente investigación y estancia.

Al Dr. Alberto Enrique Becerril Román, por su labor como Consejero, orientación, aportaciones, enseñanzas para el desarrollo del presente trabajo de investigación y amistad.

Al Dr. Carlos Trejo López, por la dirección de la investigación y tesis, colaboración y atención a mi formación dada a lo largo del plan de estudios establecido para obtener el grado, así como por su amistad, confianza y afecto.

Al Dr. Ebandro Uscanga Mortera, por sus aportaciones, sugerencias, consejos para el presente trabajo de investigación, su disponibilidad y amistad brindada.

Al Dr. Marco A. Otero Sánchez, por su apoyo, sugerencias y atención dada para realizar el presente trabajo, así como la amistad y confianza brindada.

Al M.C. David Jaén Contreras, por su amistad y confianza brindada, apoyo y sugerencias en el presente trabajo.

Al personal del vivero “Valerio Trujano” del CEP-CSAEGRO, por su apoyo y amistad recibida durante mi estancia para el desarrollo del trabajo en campo.

DEDICATORIA

A mis padres

Cesar Trujillo Rizo y

Mireya García Abarca

A mis hermanos:

Alexis y Bianca

Gracias por su apoyo y confianza

Con cariño para ustedes

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.1.1. Objetivos específicos	3
2.2. Hipótesis general	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1. Generalidades del cultivo de papaya.....	5
3.1.1. Origen	5
3.1.2. Producción mundial.....	5
3.1.3. Producción nacional e Importancia económica	6
3.2. Condiciones agroecológicas del cultivo de papaya.....	6
3.3. El agua: Situación actual	7
3.4. Eficiencia en el uso del agua (EUA) en las plantas.....	8
3.4.1. Alternativas para la eficiencia en el uso del agua en los cultivos	9
3.5. Intercambio de gases.....	10
3.5.1. Movimiento estomático.....	11
3.6. Relaciones hídricas.....	12
3.6.1. Potencial hídrico.....	12
3.6.2. Componentes del potencial hídrico	13
3.6.3. Técnicas para medir el estatus hídrico del suelo y la planta	14
3.7. Respuestas de la planta a déficits hídricos	15
3.7.1. Señalización en plantas	17
3.7.2. Señales hidráulicas	18
3.7.3. Señales químicas (molécula señal principal)	19

3.7.4.	Otras moléculas señal.....	21
3.8.	Relación del uso eficiente del agua, nutrición y luz en el proceso de fotosíntesis y metabolismo vegetal	21
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
4.1.	Descripción del lugar del experimento y condición ambiental.....	23
4.2.	Material vegetal.....	24
4.3.	Casa sombra	24
4.4.	Producción de plántulas.....	24
4.5.	Control de plagas y enfermedades	25
4.6.	Fertilización foliar y edáfica.....	25
4.7.	Establecimiento del experimento en casa sombra.....	25
4.8.	Instalación del sistema de riego y temporizador	26
4.9.	Fertilización.....	27
4.10.	Prácticas culturales.....	28
4.10.1.	Control de malezas	28
4.10.2.	Control de plagas y enfermedades.....	29
4.10.3.	Deshojado y deschuponado.....	29
4.11.	Tratamientos y diseño experimental	30
4.12.	Cosecha.....	34
4.13.	Variables respuesta	34
4.13.1.	Intercambio de gases.....	34
4.13.2.	Relaciones hídricas	35
4.13.2.1.	Potencial hídrico (Ψ_A MPa).....	35
4.13.2.2.	Prolina	35
4.13.2.3.	Potencial osmótico (Ψ_o MPa).....	36
4.13.2.4.	Potencial de turgencia (Ψ_t MPa).....	37
4.14.	Crecimiento y desarrollo de la planta y fruto.....	37
4.15.	Calidad poscosecha.....	39
4.16.	Rendimiento.....	40
4.17.	Análisis estadístico	40
V.	RESULTADOS.....	41

5.1.	Relaciones hídricas.....	41
5.2.	Intercambio de gases, transpiración y eficiencia en el uso del agua	44
5.3.	Prolina en la hoja	48
5.4.	Crecimiento vegetativo	50
5.5.	Producción y calidad del fruto.....	53
VI.	DISCUSIÓN	59
6.1.	Situación de la escasez del agua y demanda de riego del cultivo de papayo59	
6.2.	Relaciones hídricas.....	60
6.3.	Intercambio de gases.....	61
6.4.	Prolina.....	64
6.5.	Crecimiento vegetativo	65
6.6.	Producción y calidad del fruto.....	68
VII.	CONCLUSIONES	71
VIII.	LITERATURA CITADA	72
APENDICE		88

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Sensibilidad generalizada al estrés hídrico de los procesos o parámetros de la planta.....	16
Cuadro 2. Determinación de humedad volumétrica (volumen de agua retenida/Volumen de suelo) mediante diferencias de peso (kg).....	30
Cuadro 3. Pretratamientos de riego aplicados de los 78 a 84 ddt.	32
Cuadro 4. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de 89 a 94 ddt.	32
Cuadro 5. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 95 a 105 ddt.....	32
Cuadro 6. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 105 a 109 ddt.....	33
Cuadro 7. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 110 a 127 ddt.....	33
Cuadro 8. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 128 a 187 ddt.....	33
Cuadro 9. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 188 a 295 ddt.....	33
Cuadro 10. Volumen total de riego aplicado en el experimento por tratamiento de los 0 a 88 y 89 a 296 ddt (07 de abril al 04 de julio de 2021 y 05 de julio de 2021 al 28 de enero de 2022).	34
Cuadro 11. Huella hídrica y eficiencia agronómica del uso del agua de la cantidad total de agua aplicada durante el desarrollo de <i>Carica papaya</i> L. en diferentes niveles de humedad del sustrato.	57
Cuadro 12. Volumen de agua aplicado en el desarrollo de <i>Carica papaya</i> L.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción mundial de papaya de 2016 a 2020 (A) y los principales países productores de papaya en el año 2020 (B) (FAO, 2022).	5
Figura 2. Producción (2016-2020) (A) y principales estados productores de papaya en el año 2020 (B) (SIAP, 2021).	6
Figura 3. Regulación de canales iónicos, bombas y transportadores localizados en la membrana plasmática de las células guarda durante la epoca y cierre de los estomas (Fuente: Daszkowska-Golec y Szarejko, 2013).....	12
Figura 4. Temperaturas máximas (●), mínimas (▲) y humedad relativa (barras) registradas en el área experimental durante el desarrollo del experimento con Carica papaya L. Los datos fueron obtenidos con un registrador electrónico de datos HOBOR® U12-012 (Valores promedio de una semana).	23
Figura 5. Instalación del sistema de riego y temporizador.....	26
Figura 6. Diagrama esquemático del sistema de riego por goteo y temporizador.....	27
Figura 7. Cambio de maceta con capacidad de 60 kg de sustrato.....	28
Figura 8. Plástico sobre la maceta para evitar el crecimiento de las arvenses, la evaporación o la entrada de agua.....	29
Figura 9. Comportamiento de la evapotranspiración estimada en mililitros (mL) por diferencias de peso cada 2 h, de 8 a 18 h.....	31
Figura 10. Representación esquemática de la hoja de papayo.....	38
Figura 11. Dinámica del potencial hídrico (A), osmótico (B) y turgencia (C) de la hoja de Carica papaya L., por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41(X), RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 1-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 5$).	42
Figura 12. Promedio del potencial hídrico (A), osmótico (B) y turgencia (C) de la hoja de Carica papaya L. en diferentes niveles de humedad del sustrato. Las barras son el promedio \pm error estándar ($n = 5$) Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$).	43

- Figura 13.** Dinámica de la conductancia estomática por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X), y RDI-34. Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 2-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$)..... 44
- Figura 14.** Dinámica de la asimilación de CO_2 por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X), y RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 3-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$)..... 45
- Figura 15.** Dinámica de la transpiración por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X), y RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 4-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$)..... 46
- Figura 16.** Dinámica de la eficiencia en el uso del agua por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X), y RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 5-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$)..... 47
- Figura 17.** Promedio de la conductancia estomática (A), asimilación de CO_2 (B), transpiración (C) y eficiencia en el uso del agua instantánea (D) de Carica papaya L. en diferentes niveles de humedad del sustrato. Las barras son el promedio \pm error estándar ($n = 24$). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$). 48
- Figura 18.** Dinámica de la concentración de prolina en hojas de Carica papaya L. (A), en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41 (X) y

RDI-34 (●). Promedio de la concentración de prolina (B). Los puntos (A) y barras (B) son el promedio \pm error estándar (n = 5). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$).	49
Figura 19. Dinámica del área foliar por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X) y RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$). El Cuadro 7-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) (n= 6).....	50
Figura 20. Dinámica del diámetro del tallo (A), peciolo (B), y longitud del peciolo (C), por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X) y RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$). El Cuadro 7-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) (n= 6).....	52
Figura 21. Promedio del diámetro del tallo (A), peciolo (B), longitud del peciolo (C), y área foliar (D) de <i>Carica papaya</i> L. en diferentes niveles de humedad del sustrato. Las barras son el promedio \pm error estándar (n= 6). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($P < 0.05$ Tukey).	53
Figura 22. Peso del fruto del fruto de <i>Carica papaya</i> L. en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41, y RDI-34. Las barras representan el promedio \pm error estándar (n= 5). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$)	54
Figura 23. Firmeza del fruto de <i>Carica papaya</i> L. en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41, y RDI-34. Las barras representan el promedio \pm error estándar (n= 5). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$)	55
Figura 24. Acidez titulable del fruto de <i>Carica papaya</i> L. en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41 y RDI-34. Las barras representan el promedio \pm error estándar (n= 5). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$).	56

Figura 25. Solidos solubles totales (°Brix) del fruto de *Carica papaya* L en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41 y RDI34. Las barras representan el promedio \pm error estándar (n= 5). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$)..... 57

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural, vital e imprescindible en las actividades de la humanidad, del cual cada vez se requiere en mayor proporción, tal es el caso de las actividades agropecuarias, representando actualmente, un consumo del 70-80 % del agua dulce disponible (Van Schilfgaarde, 1994; Hamdy *et al.*, 2003; SEMARNAT, 2020; The World Bank, 2022). Los expertos indican que este consumo está excedido debido a que se ignora la demanda real de alimentos, teniendo en muchas ocasiones excedentes de producción. La poca disponibilidad del agua es el principal factor limitante de dichas actividades y, esto puede ser mayor en los próximos años, de acuerdo con las previsiones de las variaciones climáticas globales, determinadas por organismos internacionales. Por ello es importante la buena gestión y eficiencia del uso de los recursos hídricos; cabe mencionar, que se tienen indicios de que en los últimos años la eficiencia del uso del agua ha aumentado (Basso y Ritchie, 2018).

Para llegar a la eficiencia del uso del recurso hídrico, es importante considerar estrategias y tecnologías para tener un mayor ahorro de agua, como es el uso de calendarios de riego y, láminas de riego y del riego deficitario que contribuye a un incremento de la eficiencia de uso del recurso hídrico. El riego deficitario es aplicable a frutales con poca demanda de agua y resistentes a los déficits, que sean impactados en lo mínimo en sus rendimientos (Galindo *et al.*, 2018); es importante mencionar, que dentro de la planta se desencadenan una serie de respuestas morfológicas, fisiológicas y metabólicas, asociadas al intercambio de gases, relaciones hídricas y señalizaciones químicas e hidráulicas (Loveys *et al.*, 2000; Davies *et al.*, 2005; Wilkinson y Hartung, 2009; Hamid Ahmadi *et al.*, 2010; Alghory y Yazar, 2019).

Actualmente, para la producción de papaya se tiene un alto consumo de agua con tecnologías de riego poco eficientes, tal es el caso de riego por gravedad con láminas de riego de 816 mm (8160 m³) (Mellado-Vázquez, *et al.*, 2005), siendo un cultivo de alto uso consuntivo de agua. Diversas investigaciones han demostrado que el cultivo de papaya puede ser tolerante a los déficits de riego, teniendo diversas respuestas en sus procesos metabólicos, producción y calidad del fruto, así como, una mejora en la eficiencia en el

uso del agua (de Lima *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2021a), estos trabajos han reportado láminas de riego inferiores a las aplicadas de manera convencional (Santos *et al.*, 2021ab).

Los frutales tropicales requieren de grandes cantidades agua, por ello la importancia de conocer las respuestas del estímulo del déficit de riego y, en el caso de papaya, conocer el efecto de los niveles de humedad en el sustrato y su relación con el intercambio de gases, las relaciones hídricas, el crecimiento vegetativo, la concentración de prolina, el contenido nutrimental en la hoja y el comportamiento poscosecha de frutos de *Carica papaya* L.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de tres niveles de humedad en el suelo en el desarrollo, rendimiento y eficiencia en el uso del agua de *Carica papaya* L. en condiciones de casa sombra.

2.1.1. Objetivos específicos

Determinar el efecto de tres niveles de humedad en el suelo en las relaciones hídricas, intercambio gaseoso, contenido de prolina y contenido nutrimental de la hoja de *Carica papaya* L.

Determinar el efecto de tres niveles de humedad en el suelo en el crecimiento de la planta y frutos de *Carica papaya* L.

Determinar el efecto de tres niveles de humedad en el suelo en el rendimiento y calidad de fruto de *Carica papaya* L.

Comparar la huella hídrica azul, productividad del agua de los diferentes niveles de humedad en el suelo en el cultivo de *Carica papaya* L. en estudio.

2.2. Hipótesis general

Los niveles de humedad deficitarios en el suelo, reducen el crecimiento, no afectan el rendimiento y se mejora la eficiencia en el uso del agua de *Carica papaya* L.

2.1.2. Hipótesis específicas

Los niveles de humedad deficitarios en el suelo, afectan las relaciones hídricas de la hoja, reducen parcialmente el intercambio de gases e incrementan el contenido de prolina en *Carica papaya* L.

Los niveles de humedad deficitarios en el suelo, disminuyen el crecimiento de la planta y del fruto en *Carica papaya* L.

El rendimiento es similar en los diferentes niveles de humedad en el suelo en estudio y algunas variables de calidad poscosecha de la fruta muestran modificaciones en *Carica papaya* L.

La huella hídrica azul y la productividad del agua, incrementan con los niveles deficitarios de humedad en el suelo en *Carica papaya* L.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Generalidades del cultivo de papaya.

3.1.1. Origen

Carica papaya L., pertenece a la familia Caricaceae y de acuerdo a estimaciones, la especie se originó hace 25 millones de años, corresponde a un pequeño clado confinado a México, Guatemala y El Salvador (Antunes-Carvalho y Renner, 2012). *Carica papaya* L., fue domesticada y cultivada en Mesoamérica, posiblemente, por los mayas en el siglo XVI (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo Villareal, 2004), esto derivó en que actualmente se cuente con una gran diversidad genética, materiales cultivables y silvestres en Mesoamérica (Chávez-Pesqueira y Núñez-Farfán, 2017).

3.1.2. Producción mundial

La dinámica de la producción mundial muestra que del año 2016 al 2020 se observó un aumento de 6.8 % (Figura 1 A). De acuerdo con la FAO (2022), India, República Dominicana, Brasil y México, figuraron como principales productores de papaya en el año 2020 (Figura 1 B).

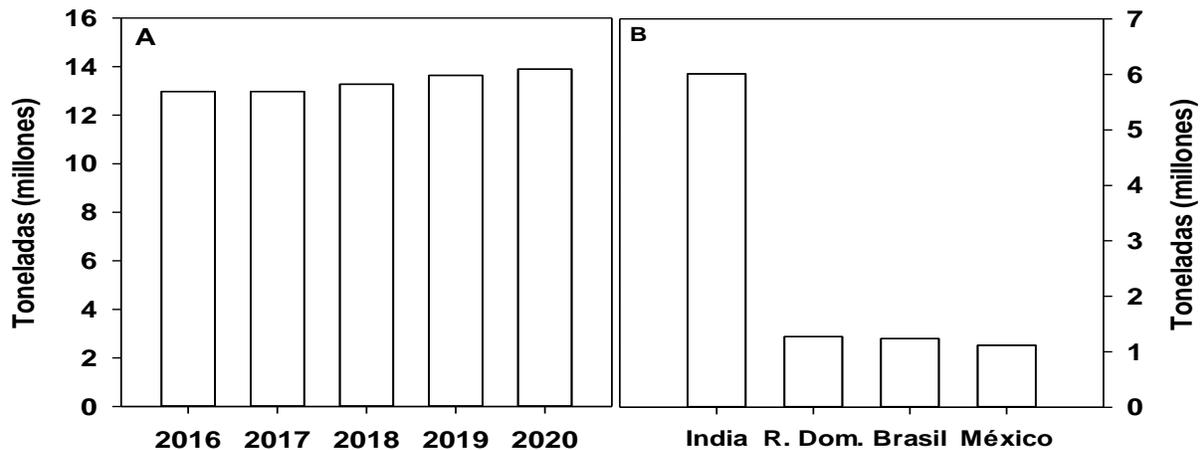


Figura 1. Producción mundial de papaya de 2016 a 2020 (A) y los principales países productores de papaya en el año 2020 (B) (FAO, 2022).

3.1.3. Producción nacional e Importancia económica

En los últimos cinco años, la producción de papaya en México aumentó en un 15 %; la producción pasó de 952,000 a 1, 120,000 toneladas (incrementó en 168, 000 toneladas, periodo 2016-2020) (Figura 2 A). El valor de la producción del 2020 fue de \$ 6.32 x10⁹ (SIAP, 2021). De la producción obtenida en el 2020, el 87 % se produjo en los estados de Oaxaca, Colima, y Chiapas (Figura 2 B).

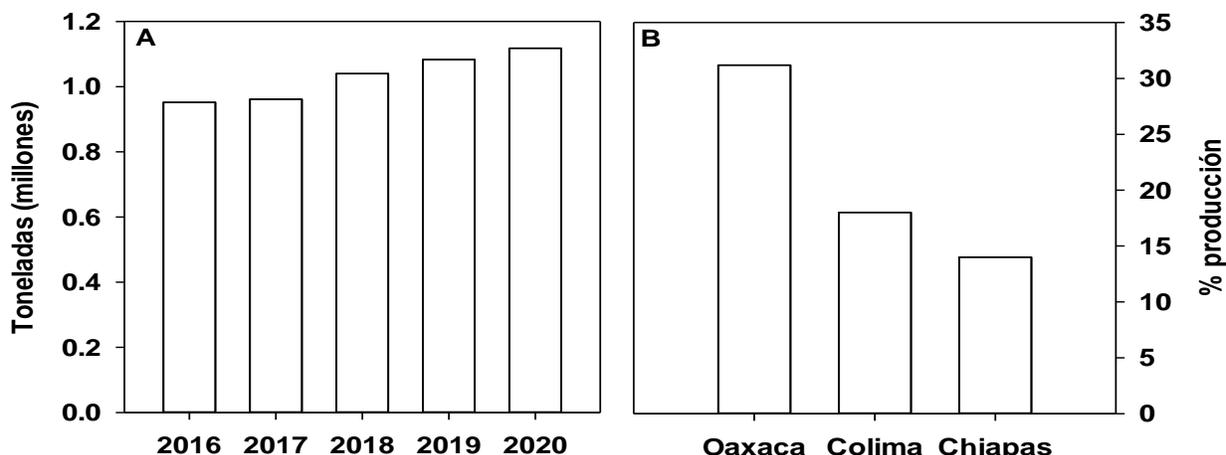


Figura 2. Producción (2016-2020) (A) y principales estados productores de papaya en el año 2020 (B) (SIAP, 2021).

3.2. Condiciones agroecológicas del cultivo de papaya

El papayo presenta un metabolismo fotosintético C3 (Campostrini y Glenn, 2007), crece óptimamente en zonas tropicales hasta a una altura de 1500 m y en zonas subtropicales sin heladas, en regiones entre 32 °N a 32 °S del ecuador (Morton, 1987; Samson, 1986). Las temperaturas promedio requeridas por el papayo se ubican entre 21 y 33 °C, con óptimas para la fotosíntesis entre 25 y 30 °C; temperaturas menores a 17 °C durante la floración, causan que los estambres de las flores se fusionen con los carpelos del ovario (carpeloidia); temperaturas mayores a 35 °C, provocan esterilidad femenina por el atrofiamiento del ovario, por lo que el fruto no se desarrolla o se deforma (carpeloidía) (Paull y Duarte, 2011).

Para el desarrollo del papayo se requiere de 1000 a 1500 mm de lluvia al año (Samson, 1986), con una precipitación mínima mensual de 100 mm (Paull y Duarte, 2011). La humedad relativa, no debe ser < a 66 % para mantener una conductancia estomática

óptima (Paull y Duarte, 2011). En cuanto a luz, prefiere áreas soleadas; una radiación fotosintéticamente activa entre 1000 a 1650 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Jeyakumar *et al.*, 2007; Paul y Duarte, 2011). Los vientos mayores de 64 km h^{-1} afectan a la planta, provocando mayor evapotranspiración y ocasionando estrés hídrico; en ocasiones, los vientos mayores a 120 km h^{-1} pueden quebrar plantas, ocasionar abscisión de flores y frutos y, disminuir los sólidos solubles de los frutos maduros (De los Santos *et al.*, 1997; Paul y Duarte, 2011).

Se desarrolla en suelos francos arenosos, con un buen drenaje. Además, es favorable que el pH del suelo oscile entre los 5.0 y 7.0, siendo más deseable 6.5. En suelos con turba, se recomienda la aplicación de cal (6 a 8 t ha^{-1}) para modificar el pH dentro de lo recomendable (Paul y Duarte, 2011).

3.3. El agua: Situación actual

A nivel mundial, de 1,386 millón de millones de hm^3 de agua, el **97.5 %** es agua salada y el **2.5 %** es agua dulce (35 millón de millones de hm^3) y, de ese porcentaje de agua dulce, el **69 %** no está disponible para el uso y consumo humano ya que se encuentran en forma de glaciares, nieve y hielo, **30 %** es agua subterránea de difícil acceso y solo **1 %** está disponible (CONAGUA, 2018). De este 1 %, el 69 % es para usos agropecuarios, el 19 % para la industria y el 12 % para zonas pobladas (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2021).

Debido al porcentaje limitado de agua disponible usado en los sectores productivos y sociales, es importante una buena gestión de nuestros recursos hídricos. Asimismo, por su papel en la regulación del clima, debe ser uno de los pilares de la protección del ambiente (Eurostat Statistics Explained, 2021). Considerar que la creciente escasez de agua es preocupante, ya que la población con escasez de agua ha aumentado 16 veces durante los últimos años (Kummu *et al.*, 2016).

En México se cuenta con una superficie agrícola de 1.81×10^7 ha; el 30.6 % son de riego y el 69.4 % son de temporal (SIAP, 2021). El riego es fundamental para la producción de alimentos; de acuerdo con estimaciones de la FAO, en el año 2011, de la

superficie cultivada, sólo el 19 % tenía infraestructura de riego, no obstante, producía más d el 40 % de las cosechas de los cultivos del mundo.

De acuerdo con lo anterior, en México, las políticas públicas, tratan de incrementar el tratado de aguas residuales, el reúso del agua y la administración de las aguas nacionales, mediante la verificación de aprovechamientos, y la actualización de métodos para el pago de derechos por uso o aprovechamiento de aguas nacionales, con la finalidad de preservación. Ante esto, es importante considerar posibles escenarios futuros en México, uno, es el crecimiento de la población y su concentración en zonas urbanas que conlleva a un mayor uso del agua derivado del crecimiento de las actividades económicas que realiza dicha población (CONAGUA, 2018).

3.4. Eficiencia en el uso del agua (EUA) en las plantas

Las predicciones del cambio climático muestran un aumento de las temperaturas (aumento potencial de la evapotranspiración) y cambios en el ambiente, como sequías y variaciones de temperatura; aunado a lo anterior, el incremento de la población en el mundo está detonando la escasez de recursos hídricos. Tal situación se podría contrarrestar aumentando la eficiencia en el uso del agua (EUA) en los cultivos, de modo que, mejorar la EUA de los cultivos es un objetivo principal en la agricultura y de seguridad alimentaria (Medrano *et al.*, 2015).

En la actualidad es un hecho el considerar la eficiencia en el uso del agua en la producción agrícola; por lo tanto, se buscan técnicas para maximizar la producción con el mínimo gasto en agua, ante un clima cambiante en factores ambientales como la temperatura, precipitación y dióxido de carbono (CO₂) que afectan de manera directa la EUA. La eficiencia en el uso del agua se puede considerar a diferentes niveles, por ejemplo, cuando se determina la transpiración y la tasa de fijación de CO₂ con un analizador de gases en una hoja, esta EUA se denomina eficiencia en el uso del agua instantánea (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

La EUA a nivel de hoja está directamente relacionada con los procesos fisiológicos que controlan los gradientes de CO₂ y H₂O (Hatfield y Dold, 2019). La EUA_{ph} instantánea se expresa de la siguiente manera:

$$EUA_{ph} = \frac{\text{Absorción neta de CO}_2 \text{ umol m}^{-2} \text{ s}^{-1}}{\text{Tasa transpiratoria mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}}$$

Por otro lado, la eficiencia del uso del agua en una plantación o cultivo se denomina el uso del agua de la productividad, es el total de materia seca producida por unidad de agua consumida en el proceso de evapotranspiración (Azcón-Bieto y Talón, 2008). La EUA_p en una plantación se calcula de la siguiente manera:

$$EUA_p = \frac{\text{Materia seca o rendimiento del cultivo (kg ha}^{-1} \text{)}}{\text{Volumen aplicado (L H}_2\text{O ha}^{-1} \text{)}}$$

3.4.1. Alternativas para la eficiencia en el uso del agua en los cultivos

La gestión del suelo, ya sea por labranza, manejo de rastrojo o incorporación de coberturas vivas, son prácticas que varían de acuerdo con los climas y los sistemas de producción, que propician beneficios en el aprovechamiento de los recursos hídricos.

La labranza facilita la filtración del agua a través del perfil del suelo y un almacenamiento mayor de agua, y, por lo tanto, un mejor desarrollo radical. Sin embargo, la labranza puede favorecer la evaporación comparada con superficies con coberturas, en las cuales la evaporación es mínima. Por lo tanto, un suelo con labranza, facilitará una mayor evaporación, siendo recomendable la labranza mínima (Hatfield, 2011).

La incorporación de residuos de los cultivos al suelo (Johnson y Davis 1972) generan cambios positivos en la eficiencia en el uso del agua (EUA), debido a que la evaporación del agua se disminuye como resultado de la disminución de la temperatura del suelo por efecto de la reflexión de luz, evitando la difusión del agua a la atmósfera (Greb, 1966).

El estado nutrimental del suelo tiene relación en la EUA, para que esta relación sea positiva, se tiene que considerar el cultivar, el manejo de nutrientes y la tasa fotosintética, (Viets, 1962; Davis y Quick 1998).

El riego deficitario es una alternativa para disminuir la proporción de agua que normalmente se aplica a un cultivo durante sus diferentes etapas fenológicas, con el fin de obtener producciones económicamente sustentables. Existen tres estrategias principales de riego deficitario: Una, riego deficitario sostenido (RDS), el agua de riego utilizada en cualquier momento de la temporada está por debajo de la demanda de evapotranspiración del cultivo (ET_c); y otras, dos, riego deficitario regulado (RDI) y secado parcial de la zona radical, ambas basadas en aspectos fisiológicos de la respuesta de las plantas al déficit hídrico (Galindo *et al.*, 2018).

Estos sistemas tienen como ventaja una reducción en el vigor de las plantas, teniendo una baja demanda de agua, así como también en la lixiviación de los fertilizantes (nutrimentos) en la zona radical, (Goodwin y Boland, 2002; Ünlü *et al.*, 2006), y así como el incremento de la calidad de la cosecha (Kang y Zhang, 2004).

Boland *et al.* (1996) y Kaman *et al.* (2006), mencionaron algunas desventajas de los déficits de riego, tales como la salinización del suelo como consecuencia de la disminución de la lixiviación de sales y el uso de agua de riego de baja calidad. También Fereres *et al.* (1978) y Costa *et al.* (2007), indicaron que los cultivos toleran cierto grado de déficit hídrico, teniendo una reducción del rendimiento, excepto cuando la disponibilidad del agua del suelo complementa el riego para alcanzar la evapotranspiración del cultivo (ET_c).

3.5. Intercambio de gases

El intercambio de gases y la actividad fotosintética se da a través del área foliar verde, y la magnitud varía con la edad, tamaño y número de hojas, así como, con las características fisiológicas, morfológicas y anatómicas de las hojas, de manera directa, las plantas fijan carbono de la atmósfera para producir biomasa, dando lugar a la pérdida de vapor de agua a la atmósfera (Medrano Gil *et al.*, 2007).

La eficiencia en el uso del agua de las plantas, dependerá principalmente de dos tipos de factores: En primer lugar, de aquellas características propias del material vegetativo que tengan relación con su metabolismo fotosintético; y, en segundo lugar, a las

condiciones edafoclimáticas en el que se expresan sus etapas ontogénicas (Medrano Gil *et al.*, 2007).

3.5.1. Movimiento estomático

Generalmente, la magnitud del déficit de vapor de agua es grande; por lo tanto, la planta está perdiendo agua constantemente. Sin embargo, para contrarrestar la pérdida de agua, la planta ha desarrollado mecanismos fisiológicos y anatómicos para el intercambio de O_2 y CO_2 , evitando su deshidratación excesiva (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Los estomas son estructuras fundamentales para la adaptación a un ambiente continuamente cambiante, además de permitir con su mecanismo de apertura y cierre, el intercambio físico activo entre las partes aéreas de la planta y la atmósfera (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Los estomas son aberturas en la epidermis, delimitadas por dos células guardas que rodean a un poro (ostiole), el cual comunica el interior de la planta con la atmósfera. Los estomas podrían considerarse como válvulas operadas hidráulicamente, capaces de integrar señales ambientales y endógenas para controlar la apertura estomática y permitir la difusión de gases entre la planta y la atmósfera (Roelfsema y Hedrich, 2005; Daszkowska-Golec y Szarejko, 2013).

El grado de la apertura del estoma es importante, ya que con ello se optimiza la eficiencia del uso del agua a través de cambios dinámicos en la turgencia de las células guarda (Daszkowska-Golec y Szarejko, 2013). La luz, temperatura y CO_2 intercelular controlan la apertura del estoma en relación con la demanda fotosintética de CO_2 ; es decir, bajas concentraciones de CO_2 intercelular desencadenan la apertura del estoma y viceversa. La luz y el CO_2 son factores a los que responde el estoma, y no solamente la fotosíntesis controla este proceso (Figura 3) (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Como se mencionó anteriormente, las células guarda son capaces de integrar señales, la percepción de un estrés abiótico da como resultado a una transducción de señales activadas por las fitohormonas, como, por ejemplo, el ácido abscísico (ABA), fitohormona presente en el cierre de los estomas, ácido jasmonico, brasinoesteroides, citoquininas y

etileno, están presentes en la respuesta estomática al estrés (Daszkowska-Golec y Szarejko, 2013).

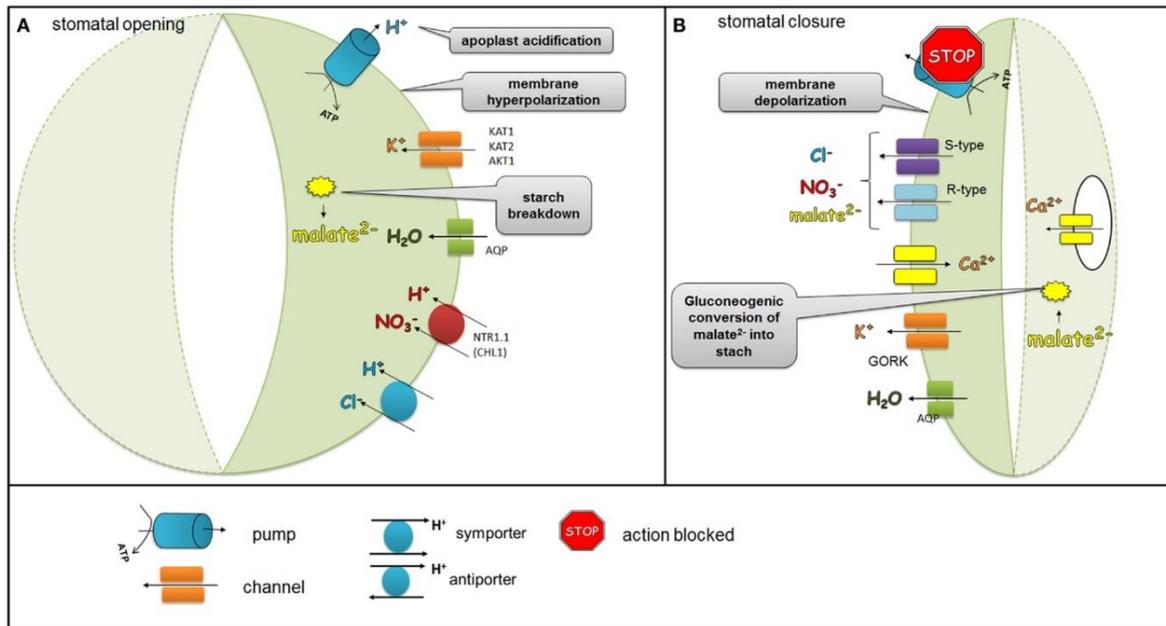


Figura 3. Regulación de canales iónicos, bombas y transportadores localizados en la membrana plasmática de las células guarda durante la época y cierre de los estomas (Fuente: Daszkowska-Golec y Szarejko, 2013).

3.6. Relaciones hídricas

El agua es fundamental para las funciones fisiológicas y de transporte por membranas, siendo también transporte para el movimiento de nutrientes, reguladores de crecimiento por el xilema y floema (Jones y Tardieu, 1997). Las necesidades hídricas dependen del material vegetativo, y etapa fenológica, en el caso de *Carica papaya* L., se considera un frutal sensible a la sequía, con alto requerimiento hídrico, por su vida productiva corta, aunado a esto, los requerimientos hídricos de la planta a escala de huertos no son confiables (Carr, 2013).

3.6.1. Potencial hídrico

El potencial químico, rige el movimiento del agua (variación de energía del agua entre dos puntos). La energía libre del agua en la planta, permite que se mueva de un punto a otro, siempre y cuando exista un diferencial; de tal fundamento, se deriva el potencial hídrico Ψ (Azcón y Talón, 2008; O'Leary, 1970). La entrada de agua a la planta es

fundamental para el crecimiento celular, y ello se realiza por gradientes de potencial de agua (Boyer, 1968).

El potencial hídrico se define entonces como la energía que tiene el agua (en el suelo, en la planta o la atmósfera) para realizar trabajo, a la misma temperatura y presión atmosférica (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

3.6.2. Componentes del potencial hídrico

El potencial hídrico es la suma de varios componentes:

$$\Psi = \Psi_t + \Psi_o + \Psi_m + \Psi_g$$

Donde:

Ψ_t : Potencial de presión

Ψ_o : Potencial osmótico

Ψ_m : Potencial matricial

Ψ_g : Potencial gravitacional

El Ψ_t representa la diferencia en presión hidrostática y, ésta puede ser, positiva o negativa; el Ψ_o es debido a los solutos disueltos, estos disminuyen la energía libre del agua, son valores negativos (Azcón-Bieto y Talón, 2008); el Ψ_m es la fuerza de atracción entre líquidos y sólidos, y está determinado por las fuerzas de London-Van der Waal de corto alcance, que actúan en unas pocas capas moleculares, y, las fuerzas electrostáticas de mayor alcance, presentes cuando las superficies de las partículas del suelo están cargadas (Passioura, 1980); y, por último, el Ψ_g , que es a consecuencia de diferencias en energía potencial, debido a la diferencia de altura con un punto de referencia, siendo positivo, si es superior al punto de referencia, o, negativo, si es inferior a dicho punto (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

3.6.3. Técnicas para medir el estatus hídrico del suelo y la planta

El contenido de agua en el suelo, se puede determinar utilizando las siguientes técnicas:

Gravimétrica, esta técnica consiste en tomar una muestra de suelo (100 g), pesarla y después secarla en horno a 105 °C durante 24 h, o bien, cuando la muestra presente un peso constante, y posteriormente pesarla para determinar la humedad de ese suelo. Esta técnica presenta una gran ventaja, ya que es una medición directa y precisa y no influye el tipo de suelo; una desventaja, que es una técnica destructiva y no puede ser utilizada en otros muestreos (Zazueta y Xin, 1994).

Dispersor de neutrones, este medidor de humedad, utiliza una fuente de neutrones rápidos (5 mega-electronvoltios) y un detector de neutrones lentos (0.025 eV) (Jayawardane *et al.*, 1984), su funcionamiento es a través de una sonda que se inserta en un tubo de acceso en el suelo para la toma de datos (Li *et al.*, 2003). Los neutrones rápidos emitidos por una fuente radiactiva se termalizan o ralentizan por las colisiones con núcleos de hidrogeno presentes en el suelo, dado que la mayor parte de los átomos de hidrogeno presentes en el suelo, son parte de moléculas de agua; en conclusión, la proporción de neutrones termalizados se relaciona con el contenido de humedad del suelo (Elder y Rasmussen, 1994; Amoozegar *et al.*, 1989).

Reflectómetro en el dominio del tiempo (TDR), que mide la propagación de ondas electromagnéticas o señales en el suelo; esta propagación de señales eléctricas está determinada por el contenido de agua del suelo y su conductividad eléctrica. La constante dieléctrica, determinada por el TDR, indica la magnitud del contenido de agua en el suelo, de manera independiente de la textura del suelo, temperatura y salinidad (Toop *et al.*, 2000).

Las técnicas más comunes para determinar el estatus hídrico de la planta son las siguientes:

Uso del dendrómetro, este dispositivo se basa en el flujo de savia, el cual indica la transpiración, el aumento del flujo de savia es una señal de planta sana que transpira

activamente, y a medida que el flujo de savia disminuye, es señal de un déficit de riego. Los dendrómetros miden las variaciones en el diámetro del tallo debido a ciclos de contracción o hinchazón, que se deben al contenido de agua en la planta; este dispositivo se instala alrededor de la circunferencia del árbol para detectar su expansión y contracción mediante un sensor, así como también, se colocan dos varillas, una se coloca en el duramen y la segunda se coloca contra la corteza para medir cambios de diámetro (Agriculture Victoria, 2019).

Bomba de Scholander, se introduce una hoja cortada a nivel del peciolo a la cámara de la bomba y se aplica presión a la hoja, hasta que se refracte la luz por presencia de agua en el corte del peciolo. Al momento de este evento, se interpreta que la presión positiva aplicada, es igual a la tensión negativa con la que el agua estaba retenida en la hoja previa a cortarse. La cámara mide la presión matricial del apoplasto o pared celular (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

3.7. Respuestas de la planta a déficits hídricos

El déficit hídrico es un factor relevante debido a que afecta diversos procesos durante el desarrollo de la planta (Azcón-Bieto y Talón, 2008) (Cuadro 1). El efecto de mayor relevancia de un déficit hídrico es la disminución en el crecimiento, toda vez que la expansión celular es muy sensible a déficits hídricos; la presión de turgencia de las células en crecimiento proporciona la fuerza motriz para la expansión celular, pero, la tasa de expansión está regulada por la variación en el potencial hídrico. Aun con déficits hídricos leves, se sigue con la síntesis de materia de la pared celular. Así entonces, el tamaño de la hoja y fruto disminuyen (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Cuadro 1. Sensibilidad generalizada al estrés hídrico de los procesos o parámetros de la planta

Proceso o variables afectadas	Muy sensible	Sensibilidad al estrés	Relativamente insensible	Observaciones
	Reducción del Ψ del tejido necesario para afectar al proceso			
	0 bars	10 bars	20 bars	
Crecimiento celular (-)	-----			Tejido rápido crecimiento
Síntesis de la pared celular (-)	-----			
Síntesis de proteína	-----			
Nivel de nitrato reductasa (-)		-----		Tejido de rápido crecimiento
Acumulación de ABA(+)		-----		
Nivel de citoquinina (+)		-----		
Apertura estomática (-)		-----	-----	Depende de la especie
Asimilación de CO ₂ (-)		-----	-----	
Respiración (-)		-----		
Acumulación de prolina (+)		-----		
Acumulación de azúcar (+)		-----		

La longitud de las líneas horizontales representa el rango de niveles de tensión dentro del cual un proceso se ve afectado por primera vez.

Las líneas discontinuas significan deducciones basadas en datos más tenues

Los signos (+) y (-) indican aumento o disminución.

Fuente: (Hsiao, 1973).

Los efectos del déficit hídrico también afectan la calidad del fruto, en algunos casos mejora, y para algunos otros no, por ejemplo, en colza (*Brassica napus* L) el contenido

de aceite en la semilla disminuye (Ghobadi *et al.*, 2006); en jitomate, el tamaño del fruto disminuye (Kirda *et al.*, 2005); en cítricos, los frutos y el contenido del jugo, disminuyen, pero aumentan los °Brix y acidez (Hutton y Loveys, 2011); en bayas, disminuye el color, los °Brix y las antocianinas (Romero *et al.*, 2013); en durazno, aumentan los °Brix y la acidez titulable (Gelly *et al.*, 2004). En algunas especies un periodo de déficit hídrico leve, estimula la floración o en su caso estimula la aparición de yemas florales (se adelanta en plantas anuales y se atrasa en perennes). Algunos aspectos de intercambio de gases, como la transpiración, disminuye, repercutiendo en una baja asimilación de CO₂ (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

3.7.1. Señalización en plantas

Ya son casi 40 años desde que Bates y Hall (1981; 1982) reportaron el cierre estomático como resultado de una disminución del contenido de agua en el suelo. Desde entonces, muchas investigaciones se han desarrollado para entender los mecanismos por los cuales el cierre de estomas se estimula y se reduce el crecimiento de las plantas, inducidos por una disminución del agua del suelo, aun cuando la parte aérea mantiene valores óptimos de potencial de agua (Davies y Zhang, 1991).

Las evidencias indican que existe una comunicación entre la raíz y el tallo, en donde la raíz es el primer sensor de la disminución de agua en el suelo, produciendo una señal química, la cual, se mueve por el torrente de transpiración (Jones, 1980). Esta señalización química de la raíz llega a la parte aérea y provoca una serie de cambios en el funcionamiento y desarrollo de las plantas, aunque no existan cambios en el potencial de agua del vástago (Else *et al.*, 2006; Atkinson *et al.*, 2008). No son solamente el cierre de estomas, la inhibición del crecimiento, etc., las reacciones provocadas por las señales químicas de la raíz, sino que, además, hay otro tipo de respuestas como la promoción de la biosíntesis de otros reguladores del crecimiento y otros metabolitos secundarios que están asociados con las propiedades nutraceuticas (color, sabor, propiedades antioxidantes, etc.) de las plantas (Dodds *et al.*, 2007).

Cuando se identificó esta señalización entre la raíz y el tallo, se pensó que tenía un efecto solamente negativo en los procesos fisiológicos de las plantas; sin embargo, se

ha demostrado que esta señalización moderada, puede tener un efecto positivo en el desarrollo y el rendimiento de las plantas y, principalmente, en el uso más eficiente del agua. Actualmente, hay muchos intentos en utilizar este conocimiento en sistemas de riego y de producción, por ejemplo, la utilización del secado parcial de la raíz o el déficit de irrigación para estimular la señalización en las plantas, han demostrado incrementos substanciales en el uso eficiente del agua (Loveys *et al.*, 2004).

3.7.2. Señales hidráulicas

La supervivencia de las plantas depende del agua que se absorbe por el sistema radical y asciende a través del tallo y las ramas en cantidad suficiente para reemplazar el agua perdida por transpiración en las hojas. Además, el sistema a través del cual se mueve el agua ha de permitir una tasa de transporte relativamente rápida, ya que la difusión del agua de una célula a otra es un proceso demasiado lento para suministrar agua suficiente a la parte superior de la planta. De hecho, la existencia de la flora terrestre ha dependido de la evolución de un sistema vascular conductor de agua (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

El déficit hídrico en las plantas ha mostrado cambios en procesos de desarrollo que tienen varios efectos sobre el crecimiento. Uno de principal importancia es la limitación específica de la expansión foliar, toda vez que el área foliar es importante, pues de ella depende la fotosíntesis, aunque una rápida expansión foliar puede afectar negativamente la adaptación a la poca disponibilidad de agua. Otro proceso que se modifica es el crecimiento radical, la disponibilidad de agua afecta la relación entre el crecimiento de la parte aérea y la raíz; la raíz continúa su desarrollo, mientras que la parte aérea deja de crecer por causa del estrés. Así, las plantas son capaces de continuar el desarrollo de sus raíces en búsqueda de agua en zonas más profundas del suelo (Orcutt y Nilsen, 2000).

Otro mecanismo de resistencia a nivel fisiológico es el cierre de estomas, ya que estos son los responsables de la mayor pérdida de agua en las plantas (Taiz y Zeiger, 2006).

El proceso de cierre de estomas, cuando el mesófilo comienza a sufrir deshidratación, está regulado por el ácido abscísico (ABA) (Leung y Giraudat, 1998); el contenido de

ABA en la hoja se incrementa debido a la descompartmentalización y redistribución desde los cloroplastos de las células del mesófilo y, a la síntesis y transporte desde las raíces, siendo liberado al apoplasto para llegar a las células guarda a través de la corriente de transpiración (Zhang y Outlaw, 2001).

La mayoría de los cultivos ante una situación de déficit hídrico tienden a modificar su forma y arreglo celular. Valladares *et al.* (2004), mencionaron que la planta ante las diferentes oscilaciones de humedad del suelo, modifica la conductividad hidráulica entre las distintas partes de la planta para minimizar las embolias, así como, adapta el sistema radical para mejorar la captación de agua.

Estudios de estrés hídrico en especies forestales, han mostrado que hay cambios como la pérdida de conductividad hidráulica y de biomasa foliar a medida que aumenta el déficit (Vilagrosa *et al.*, 2003), con el avance de la desecación se observaron dos fases: Una fase óptima desde plena hidratación hasta la pérdida de turgencia ($\Psi_{\text{presión}} = 0$) y, una fase de resistencia, donde se produjeron fenómenos de cavitación del xilema y las plantas debieron regular la biomasa foliar para evitar la muerte.

Con el incremento del déficit hídrico se sobrepasa el límite elástico de resistencia y se produce una deformación en la planta, en este caso, la pérdida de conductividad hidráulica por cavitación del xilema y la pérdida de biomasa foliar. Si las condiciones estresantes mejoran, la planta puede rebrotar y por lo tanto recuperar biomasa foliar., en cuyo caso se trataría de una deformación relativamente elástica, ya que, si la planta no puede recuperar la conductividad hidráulica completa, posiblemente no recupere la biomasa foliar inicial y se trataría en realidad de una deformación plástica. En caso de que persistan las condiciones de estrés, la planta sobrepasaría el límite de resistencia del material produciéndose la muerte del individuo (Vilagrosa *et al.*, 2003).

3.7.3. Señales químicas (molécula señal principal)

El cierre de los estomas y la inhibición del crecimiento de las hojas se encuentran entre las primeras respuestas a la sequía, y pueden ocurrir en respuesta a un secado muy suave del suelo, incluso cuando las tensiones de humedad son lo suficientemente bajas

como para que haya un suministro de agua disponible libremente. La influencia del déficit de agua se observa claramente en el desarrollo y funciones de las hojas (Wilkinson, 2004). En muchos casos, se ha descubierto la acción de reguladores químicos generados por interacciones entre la raíz o las hojas y el suelo o el aire que se están secando (Wilkinson, 2004).

Al presurizar el suelo alrededor del sistema de raíces de plantas intactas que crecen en suelo seco, para restablecer las relaciones de los brotes con el agua a niveles de control, se ha demostrado que las señales químicas actúan independientemente de las señales hidráulicas provocando cierre de estomas y reducción en el crecimiento (Wilkinson, 2004).

Dentro de las señales químicas, la participación de hormonas vegetales es notable, como el ABA, este actúa en la planta cuando el potencial hídrico del suelo disminuye por debajo de los valores óptimos (Pinheiro y Chaves, 2011). El aumento de ABA, tanto en la raíz como en el brote y la mejora del transporte de ABA como una señal de raíz a brote o brote a raíz, induce a una disminución del intercambio gaseoso y, como tal, la disminución de crecimiento, esto siempre y cuando la planta presente déficit de humedad (Davies y Zhang, 1991).

Estudios sugieren que el movimiento del ABA vía apoplasto y simplasto se inhibe por el aumento del pH (alcalinización) de la savia del xilema y la disminución de los gradientes de pH próximos a la membrana celular en los tejidos del tallo, las hojas o las raíces, cuando el suelo se seca, lo que finalmente conduce a la acumulación de ABA en las células del mesófilo, la deshidratación de las células de los estomas y luego el cierre de los mismos, lo que permite a la planta que conserve el agua (Raschke, 1987). Se ha identificado que el ABA estimula el cierre estomático, así como un sitio extracelular y intracelular de percepción del ABA (Allan *et al.*, 1994). El pH apoplástico tiene un efecto en los estomas (Wilkinson, 1999).

Se ha demostrado que el pH de la savia del xilema aumenta notablemente en respuesta al estrés por sequía en especies de *Commelina communis*, *Phaseolus vulgaris* L. (Hartung y Radin, 1989), y en *Helianthus annuus* L. (Gollan *et al.*, 1992). La diferencia

entre el pH de la savia del xilema y de la cavidad subestomática, resalta la dinámica del pH debido a la regulación activa del pH, indicando claramente que el cierre estomático se debe actividad H^+ -ATPasa (Hartung y Radin, 1989).

Por lo tanto, la regulación estricta que tiene el de afectar la distribución de ABA entre diferentes compartimentos foliares, influye en la concentración local de ABA disponible para los receptores de células guarda y, por lo tanto, en el cierre estomático inducido por ABA. Además, los estudios electrofisiológicos indican que el pH también podría modular la actividad del K^+ y los canales aniónicos que forman parte de la cohorte de canales iónicos de la membrana plasmática, mediante los cuales ABA regula el contenido iónico de las células guarda y, por tanto, la apertura estomática (Blatt y Grabov, 1997).

3.7.4. Otras moléculas señal

De acuerdo con Wilkinson (2004), existen otras moléculas que actúan como señales químicas en las plantas, tales como las citocininas, las cuales promueven la apertura estomática, con lo que se incrementa la conductancia estomática. El déficit de humedad del suelo reduce el transporte de las citocininas desde las raíces hacia el vástago, y, por lo tanto, se reduce la conductancia estomática. Aplicaciones externas de la citoquinina sintética, benzil adenina, inhibe el cierre de estomas debido al secado parcial de la raíz en vid (Stoll *et al.*, 2000).

Por último, Wilkinson (2004) indicó que el secado de suelo e inundación aumenta la síntesis y transporte del precursor del etileno el ACC (Ácido 1-amino-ciclopropano-1-carboxílico) de la raíz al vástago.

3.8. Relación del uso eficiente del agua, nutrición y luz en el proceso de fotosíntesis y metabolismo vegetal

Las plantas mayormente están constituidas en un 80-95 % de agua, encontrándose en diversas proporciones dentro de ellas, de acuerdo con las funciones metabólicas de cada uno de sus órganos (González *et al.*, 2016). Fuera de la planta, el agua tiene interacciones relevantes para su buen crecimiento, en particular, la del agua y los

nutrimentos, el aporte de los nutrientes es clave para la producción de cultivos (Li *et al.*, 2007).

El déficit de agua provoca una baja en la concentración y el contenido nutrimental en los árboles (Minoletti y Boerner, 1994), siendo necesario indicar que unos nutrientes son de gran impacto y, otros, de relevancia menor (Kreuzwieser y Gessler, 2010), pero igualmente esenciales, por ello, la importancia del contenido adecuado de humedad es primordial (Kreuzwieser y Gessler, 2010). Para el caso de N, en condiciones de sequía mínima, la eficiencia y absorción de nutrientes varía (Chai *et al.*, 2015), encontrándose una mayor concentración y distribución de N en el dosel (Wang *et al.*, 2010).

La disponibilidad del agua y nutrientes influyen en el crecimiento y producción de las plantas, las cuales, poseen mecanismos para eficientar el uso del agua y dichos nutrientes (Kudoyarova *et al.*, 2015). La falta de agua tiene relevancia en la producción agrícola, debido a los efectos en la absorción de agua por las raíces y nutrientes, así como en la acumulación de materia seca y transporte (Zhou *et al.*, 2021), causando que, bajo estas condiciones, la raíz tenga mayor desarrollo que la parte aérea, siendo afectada la expansión de las hojas (Rodríguez, 2001), perturbando el aprovechamiento de factores abióticos (radiación) que, de manera directa, afectan el funcionamiento de las plantas, dado que la capacidad fotosintética baja, en razón de los mecanismos afectados (conductancia estomática, transpiración, asimilación de CO₂). A ello agregar que las especies C₃, dado que tienen fotorrespiración, causa impacto en la fijación de CO₂, y, consecuentemente, en la biomasa de la planta (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Por último, la baja disponibilidad del agua causará en la planta una reducción en el crecimiento, dándose lugar a la expresión de mecanismos para la adaptación y tolerancia al déficit hídrico (acumulación de solutos), y aunque estos mecanismos permiten una mayor tolerancia, provocan una reducción en la capacidad de producción (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del lugar del experimento y condición ambiental

El presente trabajo se realizó en una casa sombra (malla antiafidos 20 % de sombra) en el vivero “Valerio Trujano” del Centro de Estudios Profesionales del Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero (CSAEGRO). El vivero está ubicado en el km 11 de la carretera Iguala-Huitzucó ($18^{\circ}17'00''$ Latitud Norte y $99^{\circ}28'00''$ Longitud Oeste, a una altitud de 849 msnm), en Tepecoacuilco de Trujano, Guerrero. Con presencia de lluvia en los meses de junio a septiembre (precipitación anual 700 a 1100 mm) (INEGI, 2022). Las condiciones ambientales dentro de la casa sombra oscilaron entre los 13 a 41 °C y la humedad relativa entre 32 a 83 % (Figura 4), mencionar que las temperaturas registradas en el exterior de la casa sombra fueron entre los 15 a 37.2.

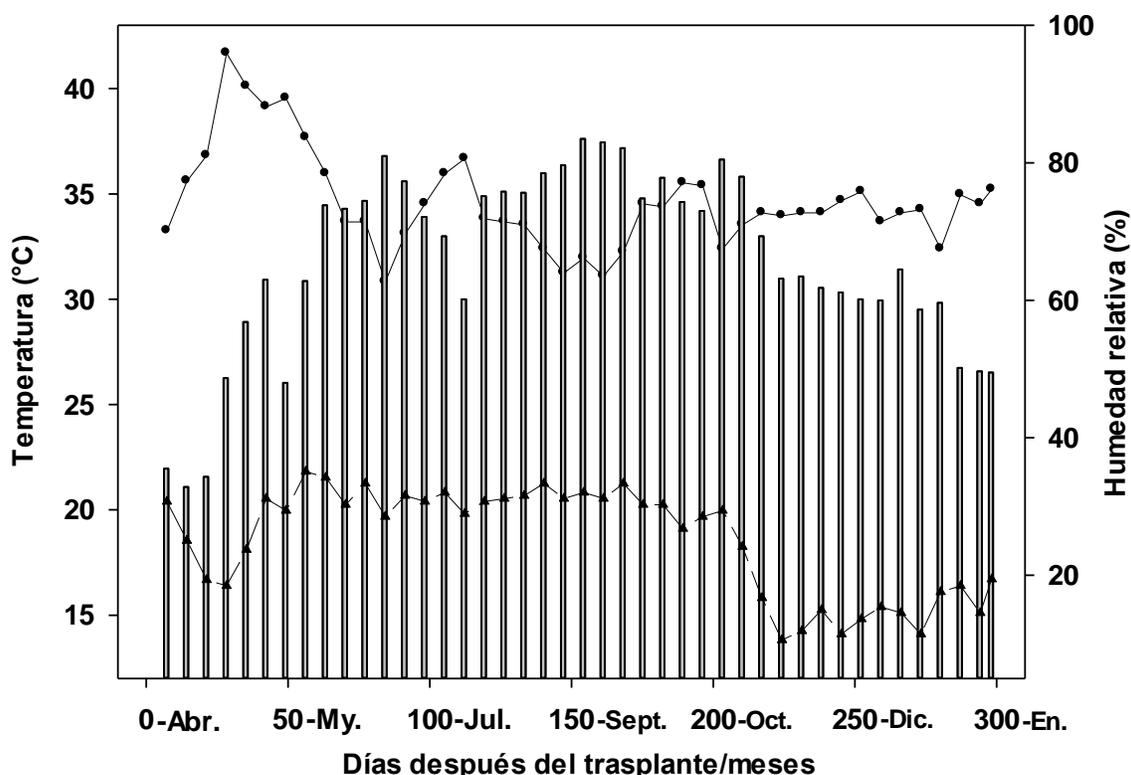


Figura 4. Temperaturas máximas (●), mínimas (▲) y humedad relativa (barras) registradas en el área experimental durante el desarrollo del experimento con *Carica papaya* L. Los datos fueron obtenidos con un registrador electrónico de datos HOBO® U12-012 (Valores promedio de una semana).

La radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) dentro del área experimental se determinó con un medidor de luz conectado a un sensor cuántico, el valor promedio de PAR durante las horas de mayor radiación del día (12:00 horas), fue de $760.18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, este valor se considera favorable para las función fotosintética del papayo de acuerdo con lo reportado por diversos autores (Clemente y Marler, 1996; Jeyakumar, 2007), mencionar que la fenología de *Carica papaya* L. no mostró cambio alguno con respecto a una producción a la intemperie.

4.2. Material vegetal

El material vegetal utilizado fue el híbrido MSXJ de papayo, tolerante a temperaturas mayores de $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante la etapa de floración. Los progenitores del híbrido son J, una papaya criolla de porte vigoroso que no presenta producción de frutos carpeloides y MST, una selección del cultivar Maradol de porte intermedio (Mirafuentes y Santamaria, 2014).

4.3. Casa sombra

Se utilizaron 243 m^2 de área experimental de un total de 628 m^2 correspondiente a la casa sombra. Cabe mencionar, que la casa sombra cuenta con soportes de hierro separados 4 m entre si. Previo al establecimiento de las macetas, se hizo una desinfestación con Anibac Plus (10 mL L^{-1}), en la superficie y en la malla, así como también se desmalezó con azadón.

4.4. Producción de plántulas

Las plántulas fueron producidas en el vivero “Valerio Trujano”; para ello se utilizó tierra lama (cieno compuesto de arcilla y humus), esterilizada con Anibac Plus (4 mL L^{-1}), con la que se llenó una charola germinadora de 200 cavidades.

Se realizó un pregerminado, que consistió en remojar las semillas en agua durante 48 h ; cada 8 h se cambió el agua para retirar los inhibidores; a las 40 h se aplicaron 5 g de Captan y 10 g de giberelina al 10% en 5 L de agua. Concluidas las 48 h se retiró el agua y las semillas, se secaron y se colocaron en una franela, colocándose en un contenedor térmico para una condición cálida y dar condiciones óptimas al proceso de pregerminado,

la cual ocurrió a los 4 días. Ya teniendo el pregerminado, se colocó en una charola, colocando una semilla pregerminada por cavidad a una profundidad de 0.5 cm. La emergencia de plántulas ocurrió 3 días después de la siembra.

4.5. Control de plagas y enfermedades

Para mantener a las plántulas libre de las plagas y enfermedades más frecuentes, como las mosquitas blancas (*Bemisia tabaci*), arañas rojas (*Tetranychus urticae*), Damping off (*Fusarium*, *Phythium*) y *Colletotrichum*, se realizaron aplicaciones preventivas de sulfocálcico a una concentración de 2 mL L⁻¹ de agua y PreVicur® Energy a una concentración de 1.5 mL L⁻¹ de agua. Se realizó una aplicación de Labrador® (*Trichoderma harzianum*), Collision® (*Glomus intraradices*), Atento® (*Beauveria bassiana*) de manera edáfica una semana antes del trasplante, a una concentración de 15 g L⁻¹ de agua).

4.6. Fertilización foliar y edáfica

Para el buen desarrollo de las plántulas se aplicaron, una vez por semana, Bayfolan-Forte 3 mL L⁻¹ de agua; 0.5 gramos de fertilizante Yara Mila Complex por plántula a los 20 y 70 días después de la siembra en charola; y, aplicaciones de enraizador (Rootex 2 g L⁻¹ de agua) cada 10 días.

4.7. Establecimiento del experimento en casa sombra

Inicialmente, para este propósito, se utilizaron macetas con capacidad de 20 kg llenas de arena, que se desinfectaron con Anibac plus a una concentración de 10 mL L⁻¹ de agua. De acuerdo con el diseño del experimento, se colocaron las macetas a 1.5 x 2.0 m (3,333 planta ha⁻¹). A los 10 días después, se realizó el trasplante (07 de abril de 2021), colocando una plántula por maceta, trasplantando un total de 60 plántulas.

El riego fue diario, con un sistema de riego provisional de goteo, aplicando 4 riegos al día con un total de 2 L de agua planta⁻¹ día⁻¹.

4.8. Instalación del sistema de riego y temporizador

El diseño e instalación del sistema de riego permanente (temporizador, tuberías y líneas regantes), se realizaron los días 21 y 22 de mayo de 2021. Se utilizó un sistema de riego por goteo, compuesto por un gotero auto compensante (8 L h^{-1}), un distribuidor a cuatro estacas colocadas en cuatro puntos dentro de la bolsa. El temporizador utilizado fue de la marca Raind Bird y 3 válvulas solenoides (Figura 5 y 6). El riego se mantuvo en las mismas cantidades de humedad para todas plantas previo a la aplicación de tratamientos.



Figura 5. Instalación del sistema de riego y temporizador.

Previo a la aplicación de los tratamientos (29 /05/22), se realizó el cambio de plantas a macetas de mayor tamaño con capacidad de 60 kg, instalándose a la par, el sistema de riego y temporizador (Figura 7).

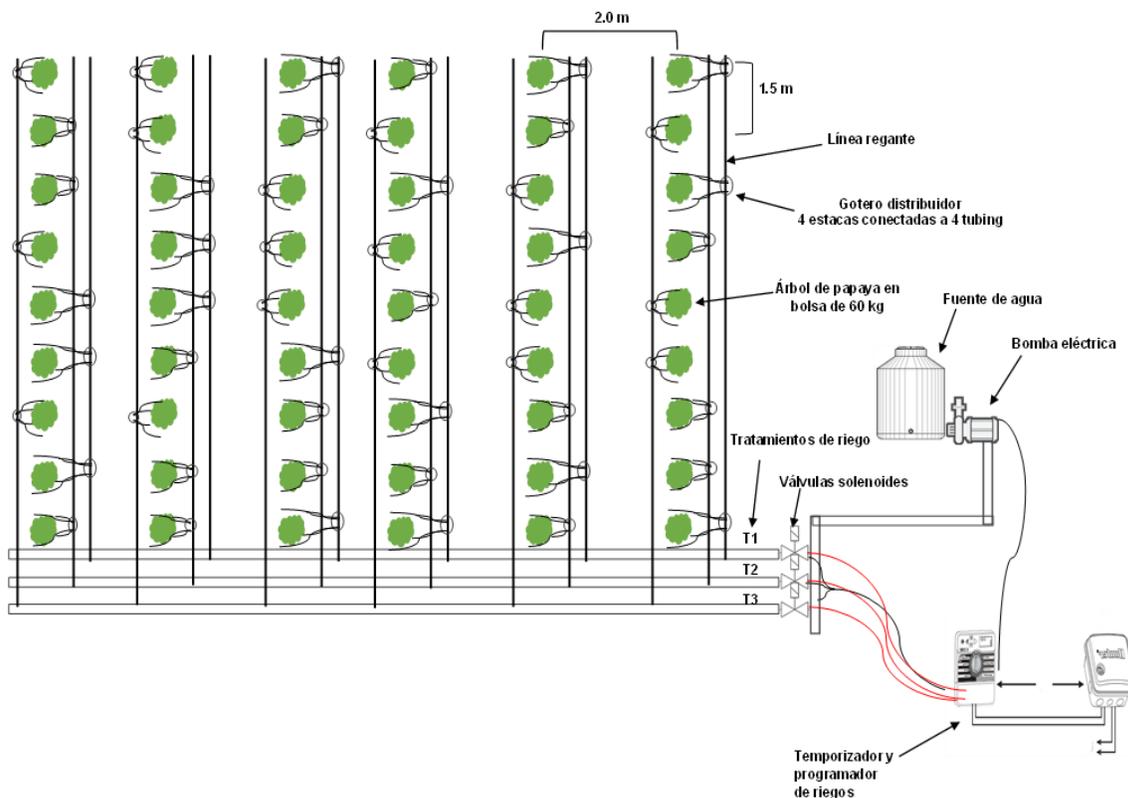


Figura 6. Diagrama esquemático del sistema de riego por goteo y temporizador.

4.9. Fertilización

El suministro de nutrientes se hizo a través de fertirriego, utilizando las fuente de fertilizante de Ultrasol inicial (N: 15 %, P: 30 %, K: 15 %, Mg: 1 %, S: 1 %, B: 0.02 %, Zn: 0.02 %, Cu: 0.01 %, Fe: 0.03 %, Mn: 0.01 %, Mo: 0.004 %), desde los 0 a los 30 días después de trasplante (ddt) (etapa vegetativa, cuatro aplicaciones); de Ultrasol desarrollo (N:18 %, P: 6 %, K: 18 %, Mg: 2 %, S: 8 %, B: 0.02 %, Zn: 0.02 %, Cu: 0.01 %, Fe: 0.03 %, Mn: 0.01 %, Mo: 0.005 %), desde los 38 a los 130 ddt (floración, cuajado y crecimiento de fruto, siete aplicaciones); y, Ultrasol crecimiento (N: 25 %, P: 10 %, K: 10 %, Mg: 1 %, S: 1 %, B: 0.02 %, Zn: 0.02 %, Cu: 0.01 %, Fe: 0.03 %, Mn: 0.01 %, Mo: 0.005 %), desde los 145 a los 295 (crecimiento de fruto y cosecha, 10 aplicaciones); en cada caso

se diluyeron 5 kg de cada uno de ellos en 5000 L de agua, aplicando previamente 180 mL de ácido fosfórico para regular el pH (5.5- 6.0) en las etapas antes indicadas.

Complementario a lo anterior, se aplicó Ca en fertirriego (Mainstay Calcio, 2 L en 5000 L de agua), se aplicó en 5 ocasiones, iniciando previo a la floración. Se hicieron aplicaciones de fertilizante foliar en 10 ocasiones, KELATEX[®] Ca+B en una cantidad de 4 g L⁻¹ de agua (tres aplicaciones previas al inicio de floración y 7 durante floración).



Figura 7. Cambio de maceta con capacidad de 60 kg de sustrato.

4.10. Prácticas culturales

4.10.1. Control de malezas

Se colocó plástico sobre la superficie de la maceta (45 ddt), con el fin de evitar el crecimiento de malezas, la evaporación del agua de riego y la entrada de agua de lluvia (Figura 8).

4.10.2. Control de plagas y enfermedades

El control de plagas y enfermedades se realizó con la aplicación semanal de productos orgánicos al follaje: Progranic Mega a una dosis de 4 mL L⁻¹ de agua (Extracto de *Larrea tridentata*), Sulfocálcico en una dosis de 10 mL L⁻¹ de agua, cada 7 días, alternando una a la vez, respectivamente.

Se realizaron aplicaciones al suelo para el control de hongos y bacterias con los productos siguientes: Propamocarb+Fosetilo (4 mL L⁻¹ de agua), Tiofanato de metilo (3 g L⁻¹ de agua), Benomilo 2 g L⁻¹ de agua, Kasugamicina 2 mL L⁻¹ de agua, y estreptomycin 3 g L⁻¹ de agua. Las aplicaciones se hicieron desde el día del trasplante, hasta la culminación de la investigación cada 7 días, alternando los productos de acuerdo con el orden antes mencionado; además, a cada solución se le adicionó un enraizador (Rootex) 5 g L⁻¹ de agua.



Figura 8. Plástico sobre la maceta para evitar el crecimiento de las arvenses, la evaporación o la entrada de agua.

4.10.3. Deshojado y deschuponado

El deschuponado consistió en quitar las yemas axilares para disminuir la competencia entre ellas, esta actividad se realizó a los 30 ddt.

El deshojado consistió en quitar las hojas amarillas o en su caso las excedentes, con el fin de aumentar la aireación y disminuir la humedad relativa en el dosel de la planta, para evitar el desarrollo de enfermedades. Esta práctica se realizó cada 15 días, en los cuatros primeros meses después del trasplante, posteriormente esta actividad se realizó cada 7 días, hasta la culminación del experimento.

4.11. Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos se diseñaron bajo las siguientes condiciones: Previo a la aplicación de tratamientos, tres macetas se regaron a saturación; después de 48 h, se pesaron para obtener el peso en húmedo, considerando que en ese tiempo ya había drenado en su totalidad el agua, quedando a capacidad de campo (CC). Posteriormente, el sustrato se secó al aire libre por cuatro días, y se pesó. Mediante la diferencia de peso húmedo y peso seco se calcularon los litros que retiene la maceta para estar a “capacidad de campo” (Cuadro 2).

Cuadro 2. Determinación de humedad volumétrica (volumen de agua retenida/Volumen de suelo) mediante diferencias de peso (kg).

Bolsa	Peso húmedo(PH)	Peso seco(PS)	PH-PS
1	59.5	50	9.5
2	59.5	52	7.5
3	61.3	53.75	7.55
Promedio	60.1	51.92	8.18

Ya con la referencia de la “CC” obtenida durante el periodo de los 55 a 84 ddt, se realizó una aplicación previa de pretratamientos, bajo el fundamento de observación del comportamiento de la evapotranspiración (CET) en un intervalo de las 8 a.m. a 6 p.m. a los 62 ddt; cabe mencionar que solo a tres plantas se le aplicaron los 8.18 L promedio obtenidos para alcanzar la “CC”, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 9.

Con referencia a lo anterior, se diseñaron pretratamientos con base en la dinámica de evapotranspiración observada a los 62 ddt; se dieron las aplicaciones de riego desde las 8 a.m. hasta las 4 p.m. de los 78 a 84 ddt, para observar el comportamiento de la evapotranspiración de la planta (Cuadro 3).

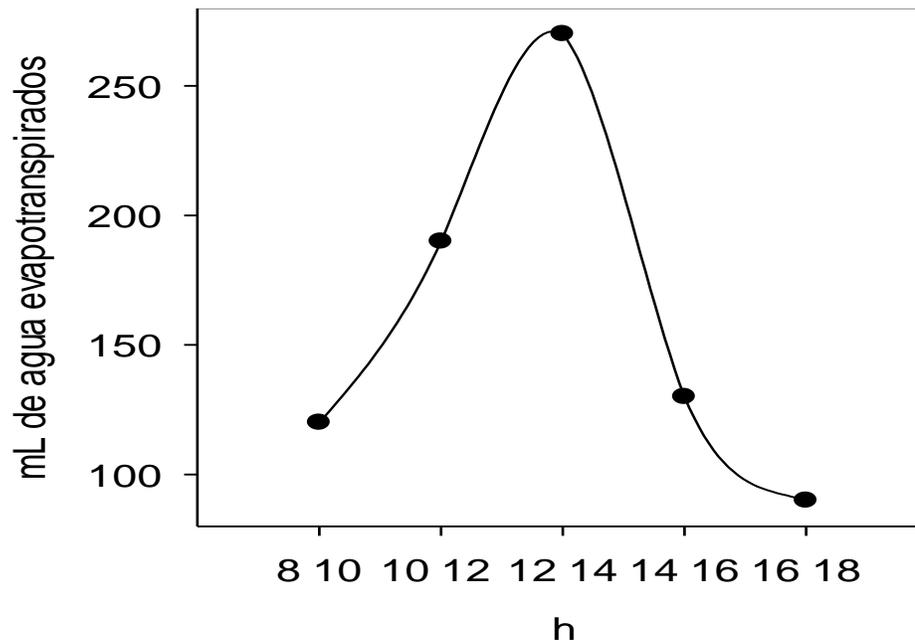


Figura 9. Comportamiento de la evapotranspiración estimada en mililitros (mL) por diferencias de peso cada 2 h, de 8 a 18 h.

Los síntomas visuales del estatus hídrico de las plantas no eran favorables, además mostraron una baja conductancia estomática, optándose suspender esos pretratamientos; del periodo de los 85 a 88 ddt se dio riego de recuperación ($T1= 8.18 \text{ L día}^{-1}$, $T2= 8.18 \text{ L día}^{-1}$, $T3= 8.18 \text{ L día}^{-1}$). Observando las plantas ya recuperadas con síntomas visuales favorables, se inició la aplicación de tratamientos, ya teniendo como referencia los efectos de los “pretratamientos”.

El fundamento de diseño de los tratamientos fue el trabajar con tiempos y los síntomas visuales de la planta, esto, sin dejar de lado la dinámica de evapotranspiración, la cual mostró que la mayor demanda de agua se daba en entre las 10 a.m. y 2 p.m. del día, con esta prueba se diseñaron los tratamientos.

Cuadro 3. Pretratamientos de riego aplicados de los 78 a 84 ddt.

Hora de riego	T1 (mL) (min.)⁻¹	T2 (mL) (min.)⁻¹	T3 (mL) (min.)⁻¹
8:00 a.m.	74.5 (2)	37.25 (1)	37.25 (1)
10:00 a.m.	74.5 (2)	37.25 (1)	37.25 (1)
12:00 p.m.	74.5 (2)	37.25 (1)	37.25 (1)
2:00 p.m.	74.5 (2)	37.25 (1)	37.25 (1)
4:00 p.m.	74.5 (2)	37.25 (1)	37.25 (1)
Total	372.5 mL día⁻¹	186.25 mL día⁻¹	186.25 mL día⁻¹
Volumen de agua aplicado durante el periodo: T1= 2.607 L; T2= 1.303 L; T3= 1.303 L			

A los 89 ddt, se inició con la aplicación de tratamientos de riego, se trabajó con estos tratamientos durante los 89 a 94 ddt (Cuadro 4).

Cuadro 4. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de 89 a 94 ddt.

Hora de riego	T1 (mL) (min.)⁻¹	T2 (mL) (min.)⁻¹	T3 (mL) (min.)⁻¹
8:00 a. m	149 (1)	149 (1)	149 (1)
10:00 a. m	596 (4)	447 (3)	298 (2)
12:00 p. m	596 (4)	447 (3)	298 (2)
2:00 p. m	149 (1)	149 (1)	149 (1)
4:00 p. m	149 (1)	149 (1)	149 (1)
Total	1,634 mL día⁻¹	1,341 mL día⁻¹	1,043 mL día⁻¹
Volumen de agua aplicado durante el periodo: T1= 9.834 L; T2= 8.046 L; T3= 6.258 L			

Bajo el fundamento de diseño de los tratamientos de trabajar con los síntomas visuales de la planta, se aumentó el tiempo en las horas de riego, quedando de la siguiente manera como se muestran en los Cuadros 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

Los tratamientos se condujeron en un diseño de bloques completamente al azar, con 6 bloques (repeticiones), cada unidad experimental consistió de una sola planta de papaya.

Cuadro 5. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 95 a 105 ddt.

Hora de riego	T1 (mL) (min.)⁻¹	T2 (mL) (min.)⁻¹	T3 (mL) (min.)⁻¹
8:00 a. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
10:00 a. m	1192 (8)	894 (6)	596 (4)
12:00 p. m	1192 (8)	894 (6)	596 (4)
2:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
4:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
Total	3,278 mL día⁻¹	2,682 mL día⁻¹	2,086 mL día⁻¹
Volumen de agua aplicado durante el periodo: T1= 34.27 L; T2=28.12 L; T3=21.75 L			

Cuadro 6. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 105 a 109 ddt.

Hora de riego	T1 (mL) (min.)⁻¹	T2 (mL) (min.)⁻¹	T3 (mL) (min.)⁻¹
8:00 a. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
10:00 a. m	1,639 (11)	894 (6)	596 (4)
12:00 p. m	1,639 (11)	894 (6)	596 (4)
2:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
4:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
Total	4,172 mL día⁻¹	2,682 mL día⁻¹	2,086 mL día⁻¹

Volumen de agua aplicado durante el periodo: T1=23.39 L; T2=15.198 L; T3=11.92 L
Nota: Solo se aumentó en tiempo al T1.

Cuadro 7. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 110 a 127 ddt.

Hora de riego	T1 (mL) (min.)⁻¹	T2 (mL) (min.)⁻¹	T3 (mL) (min.)⁻¹
8:00 a. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
10:00 a. m	3,129 (21)	894 (6)	596 (4)
12:00 p. m	3,129 (21)	894 (6)	596 (4)
2:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
4:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
Total	7,152 mL día⁻¹	2,682 mL día⁻¹	2,086 mL día⁻¹

Volumen de agua aplicado durante el periodo: T1= 128.736 L; T2= 48.276 L; T3= 37.548 L
Nota: Solo se aumentó en tiempo de riego al T1.

Cuadro 8. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 128 a 187 ddt.

Hora de riego	T1 (mL) (min.)⁻¹	T2 (mL) (min.)⁻¹	T3 (mL) (min.)⁻¹
8:00 a. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
10:00 a. m	3,129 (25)	894 (6)	596 (4)
12:00 p. m	3,129 (25)	894 (6)	596 (4)
2:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
4:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
Total	8,344 mL día⁻¹	2,682 mL día⁻¹	2,086 mL día⁻¹

Volumen de agua aplicado durante el periodo: T1= 241.98 L; T2= 77.778 L; T3= 60.49 L
Nota: Solo se aumentó en tiempo de riego al T1.

Cuadro 9. Tratamientos de riego aplicados en el periodo de los 188 a 295 ddt.

Hora de riego	T1 (mL) (min.)⁻¹	T2 (mL) (min.)⁻¹	T3 (mL) (min.)⁻¹
8:00 a. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
10:00 a. m	4,172 (28)	894 (6)	596 (4)
12:00 p. m	4,172(28)	894 (6)	596 (4)
2:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
4:00 p. m	298 (2)	298 (2)	298 (2)
Total	9,238 mL día⁻¹	2,682 mL día⁻¹	2,086 mL día⁻¹

Volumen de agua aplicado durante el periodo: T1= 1,476.12 L; T2= 477.79 L; T3= 371.59 L
Nota: Solo se aumentó en tiempo de riego al T1.

Cuadro 10. Volumen total de riego aplicado en el experimento por tratamiento de los 0 a 88 y 89 a 296 ddt (07 de abril al 04 de julio de 2021 y 05 de julio de 2021 al 28 de enero de 2022).

Tratamientos	L pl ⁻¹ previo a aplicación de tratamientos (0-88 ddt)	L pl ⁻¹ aplicados por tratamientos (89-296 ddt)	Total de volumen de agua de riego aplicada L pl ⁻¹
T1 (Testigo)	202	1,476.12	1,678.12
T2 (Riego deficitario regulado)	202	477.79	679.79
T3 Riego deficitario regulado)	202	371.59	573.6

T1= agua máxima retenida en el suelo; T2=41 % del agua máxima retenida en el suelo (RDI-41); T3=34 % del agua máxima retenida en el suelo (RDI-34), aplicados a los 89 ddt, en la etapa fenológica de amarre del fruto de *Carica papaya* L.

4.12. Cosecha

La cosecha se realizó cuando los frutos mostraban una franja amarilla definida (Santamaria *et al.*, 2009; se hicieron un total de cuatro cosechas a los 230, 254, 276 y 293 ddt, obteniendo el peso de cada fruto (báscula electrónica de presión/bapre 3 kg/0.2 Rhino compresi). Con los datos anteriores se estimó el rendimiento de fruto.

4.13. Variables respuesta

4.13.1. Intercambio de gases

El intercambio de gases se realizó con un analizador portátil de gases en el espectro infrarrojo (CIRAS-3, PPSsystems). Se determinó en el lóbulo central de una hoja joven completamente expandida entre las 12:00-13:00 h, cada 7 días en 6 plantas (repeticiones) por tratamiento se midieron las variables (desde los 89 hasta los 254 ddt) conductancia estomática (g_s , $\text{mmoles m}^{-2} \text{s}^{-1}$), asimilación de CO_2 (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiración (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y eficiencia en el uso del agua instantánea (A/E)transpirado). Se calculó la huella hídrica azul del cultivo dividiendo el volumen de agua aplicada por planta entre el rendimiento por planta ($\text{L H}_2\text{O kg}^{-1}$ fruta) y la productividad del agua, se obtuvo mediante la operación inversa utilizada en la huella hídrica ($\text{kg fruta L}^{-1} \text{H}_2\text{O}$).

4.13.2. Relaciones hídricas

Se realizaron muestreos a los 142, 169, 192, 220 y 248 ddt, determinándose potencial hídrico, prolina, potencial osmótico y potencial de turgencia. A continuación, se describe el proceso para la medición de cada variable en cuestión.

4.13.2.1. Potencial hídrico (Ψ_A MPa)

El potencial hídrico de la hoja se determinó en el lóbulo medio de una hoja joven completamente expandida de la parte media del dosel; esto se realizó en cinco hojas por tratamiento, teniendo un total de 15 hojas por muestreo. Esta variable se determinó utilizando una cámara de presión tipo Scholander (Soil Moisture model 3115). El peciolo completo se cortó de la lámina con una navaja; debido al tamaño de la hoja, solamente se cortó la parte final del lóbulo medio de la hoja, y, con la ayuda de la navaja, se procedió a hacer dos cortes al lado de la nervadura central de este lóbulo. Después de ello, se colocó dentro de la cámara de presión y se aplicó presión con gas nitrógeno y, en seguida, se fue observando el corte que quedaba expuesto fuera de la cámara con ayuda de una lupa. Cuando se observó la refracción de la luz en el corte, esto por la gota de agua, se procedió a cerrar las válvulas que permiten la entrada del gas nitrógeno y en ese momento se tomó el valor indicado en la cámara, valor que nos mostraba la tensión (Tensión - =Presión +) que la hoja tenía en la planta antes de cortarla.

4.13.2.2. Prolina

De la hoja en donde se determinó el Ψ_A , se utilizó una porción del lóbulo izquierdo contiguo al lóbulo medio, para determinar la concentración de prolina; las muestras obtenidas fueron preservadas en nitrógeno líquido (-200 °C). Previo a la determinación de prolina (Bates *et al.*, 1973), las muestras de la lámina se liofilizaron por un periodo de 72 h (Labconco™ FreeZone™); posteriormente, se molieron en un mortero con pistilo, hasta obtener un polvo fino. Se pesaron 0.15 g de cada muestra y se maceraron en un mortero con 5.0 mL de ácido sulfosalicílico al 3 %. El macerado se filtró en un embudo con papel filtro; el filtrado se colectó en tubos de ensayo, se tomaron alícuotas de 2 mL y se depositaron en otros tubos de ensayo previamente etiquetados, a los cuales se les

adicionó 2 mL de solución de ninhidrina ácida y 2 mL de ácido acético glacial; también se preparó un blanco con 2 mL de ácido sulfosalicílico, 2 mL de ninhidrina ácida y 2 mL de ácido acético glacial para la calibración del espectrofotómetro. Después de agitar vigorosamente la mezcla en un vortex, los tubos tapados se incubaron en baño maría (100 °C) por una hora, mismos que, después se sumergieron en agua fría a 4 °C. Siguiendo con el proceso, a cada tubo se le agregaron 4 mL de tolueno y se agitaron vigorosamente en un vortex (Thomas Analog Vortex Mixer), hasta homogenización. El cromóforo obtenido, se colocó en una celda para ser leída en el espectrofotómetro a 520 nm (Milton Roy Spectronic 21 d); la concentración de prolina en el tejido se determinó utilizando una curva de calibración de prolina pura, previamente realizada.

4.13.2.3. Potencial osmótico (Ψ_o MPa)

En el campo, a las plantas de papaya, se les tomó parte del lóbulo derecho contiguo al lóbulo medio de la hoja, colocándolas en nitrógeno líquido. Ya en el laboratorio, se inició con la cuantificación de potencial osmótico con ayuda de un osmómetro de presión de vapor (Wescor Vapor 5520). Para ello se realizó la prueba de limpieza con una solución estándar de osmolalidad (100 mmol kg⁻¹), para poder realizar la calibración automática del equipo; los valores permitidos en este procedimiento son de 98±10 mmol kg⁻¹ y un nivel de contaminación de 9; en caso de no obtener estos valores, se realizó la limpieza del termopar con ayuda de acetona y agua destilada; realizado este proceso, se repitió la prueba de limpieza con el estándar de 100 mmol kg⁻¹, hasta obtener los valores mencionados anteriormente, para después seguir con el proceso de calibración; se hizo lectura con un estándar de 290 mmol kg⁻¹, para obtener valores aceptables de ±3, y repetir el mismo procedimiento con el estándar de 1000 y de 100 mmol kg⁻¹ y obtener valores dentro de ±3. Una vez calibrado el equipo, se procedió a estimar la concentración de las muestras. Para esto, las muestras de las láminas se introdujeron en jeringas, con la menor cantidad posible de nervaduras; se aplicó presión con émbolo para obtener la savia de la muestra, la cual se depositó en viales eppendorf. Posteriormente, se tomó una alícuota de 10 µL y se colocó en el portamuestras donde previamente se había colocado un disco de papel filtro, se cerró la cámara de muestra y se obtuvo el valor después de 70 segundos. Después de cada determinación se limpió el portamuestras, y

se realizó el mismo proceso antes mencionado para todas las muestras. Posteriormente se procedió a calcular la concentración, el potencial osmótico se estimó utilizando la ecuación de Van't Hoff: $\Psi_o = -CRT$, en donde, C es la concentración de la muestra, R la constante general de los gases y T la temperatura absoluta.

4.13.2.4. Potencial de turgencia (Ψ_t MPa)

Este variable se obtuvo despejándola de la ecuación general de potencial hídrico:

$$\Psi_A = \Psi_o + \Psi_t$$

Por tanto,

$$\Psi_t = \Psi_A - \Psi_o$$

Donde:

Ψ_A : Potencial hídrico

Ψ_o : Potencial osmótico

Ψ_t : Potencial de turgencia

4.14. Crecimiento y desarrollo de la planta y fruto

Se consideraron las variables: Crecimiento de la hoja (cm), diámetro del tallo (cm), diámetro del peciolo (mm), longitud del peciolo (cm) crecimiento del fruto (cm) y número de frutos.

Para el crecimiento de la hoja, se consideraron seis hojas por tratamiento, con las siguientes características: Hoja pequeña, aun con ausencia de color verde intenso. Se tomó la longitud de la nervadura central del lóbulo izquierdo y del lóbulo derecho, adyacentes al lóbulo medio de la hoja (Figura 10), con una cinta métrica flexible graduada en centímetros; estas mediciones se realizaron cada 7 días. En promedio se realizaron 5 mediciones; después de la 5ª medición, no se observó crecimiento. Teniendo los datos, se estimó el área foliar, con la siguiente ecuación estimada, considerando el valor de la

medición del lóbulo izquierdo contiguo al lóbulo medio de cada hoja (Cardona *et al.*, 2009):

$$y = -303.0742 + 31.2028 (x)$$

y= Área foliar

x= Nervadura central del lóbulo izquierdo contiguo al lóbulo medio

El diámetro del tallo se midió a 10 cm del cuello de la planta en seis plantas por tratamiento con un vernier manual, mediciones que se realizaron a los 110, 138, 171, 199, 227, 256 ddt.

El diámetro del peciolo se tomó a 10 cm de su base con un vernier digital.

La longitud del peciolo se midió de extremo a extremo del peciolo con una cinta métrica flexible graduada en centímetros. Se realizaron 5 mediciones (142, 169, 192, 220 y 248 ddt).

Para medir el crecimiento de fruto, de manera aleatoria se tomaron seis frutos por tratamiento (un fruto por planta), a los cuales se les midió el largo (desde la parte apical hasta la parte basal del fruto) y la circunferencia (en la parte media) con una cinta métrica flexible graduada en centímetros cada 15 días hasta la cosecha del fruto.

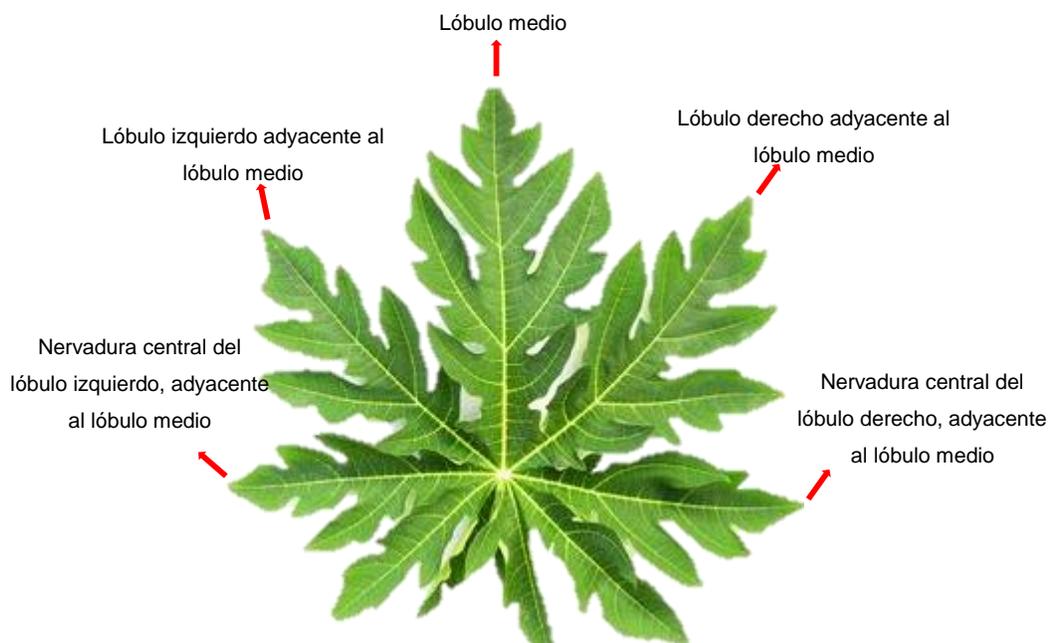


Figura 10. Representación esquemática de la hoja de papayo.

El número de frutos se cuantificó el total de frutos amarrados al final del experimento en seis plantas por tratamiento.

4.15. Calidad poscosecha

A los 293 ddt, cuando los frutos mostraron madurez de consumo, se determinaron las siguientes variables de calidad poscosecha del fruto: peso del fruto (kg), firmeza (N), sólidos solubles totales (°Brix), y acidez titulable (% de ácido málico):

El peso promedio del fruto, se consideraron 4 frutos por tratamientos, pesandolos en una báscula electrónica.

Posteriormente, se procedió a medir la firmeza de 4 frutos por tratamientos, en la zona central del fruto con un penetrómetro (MODEL FDV-30 30 LB X 0.01 LB), en dos ocasiones (ambos lados de la zona central) para obtener un valor único por fruto (repetición).

Los sólidos solubles totales se determinaron en 4 frutos por tratamientos, obteniendo la pulpa de cada fruto, para lo cual se retiró la epidermis para poder realizar la extracción del jugo con ayuda de una manta limpia; ya calibrado el refractómetro (Hanna-HI96801), se colocó una gota de jugo para obtener los valores; de igual manera, este proceso se repitió en todos los frutos de cada tratamiento.

Por último, se determinó la acidez titulable de 4 frutos por tratamientos, para lo cual se pesaron 2 g de pulpa, a los que se les adicionó 20 mL de agua destilada, para su posterior licuado en una batidora de mano Moulinex. Posteriormente, se colocó el total del extracto en un vaso de precipitados, al cual se le agregaron 2 gotas de fenolftaleína y con ayuda de un mezclador magnético y una placa de calefacción con barra magnética se agitó hasta obtener un cambio de color. Por último se procedió con la titulación con hidróxido de sodio 0.1 N; el dato del gasto de hidróxido de sodio en mL obtenido para cada muestra, se transformó en porcentaje mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ acidez} = \frac{(\text{mL NaoH gastado})(N)(\text{Meq}) (100)}{\text{mL de alicuota}}$$

Donde:

mL NaOH: Gasto en la titulación

N: Normalidad de la solución de NaOH (0.1)

Meq: 0.067 (Ac. Málico)

4.16. Rendimiento

Mediante la multiplicación del peso promedio del fruto, y el número de frutos pl^{-1} se obtuvo el rendimiento expresado en kg pl^{-1} .

4.17. Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza a través de RStudio versión 4.0.2, así como verificación de supuestos (Homogeneidad de varianzas, Bartlett 5%; Normalidad, Shapiro Wilk 5%), y pruebas de comparación de medias (Tukey 5%), para determinar diferencias entre tratamientos.

V. RESULTADOS

5.1. Relaciones hídricas

Los volúmenes de agua de riego que se aplicaron durante el desarrollo del experimento influyeron significativamente ($P < 0.05$) en el potencial hídrico de la hoja ($\Psi_{A \text{ hoja}}$) en la mayoría de los muestreos (Figura 11-A y Cuadro 1-A en el apéndice). El $\Psi_{A \text{ hoja}}$ fue mayor en las plantas del tratamiento testigo, comparado con los tratamientos de riegos deficitarios regulados (RDI-41 y -RDI-34). El valor del potencial hídrico de la hoja ($\Psi_{A \text{ hoja}}$) para las plantas del tratamiento testigo fue de -1.04 ± 0.084 Mpa; para el tratamiento RDI-41 fue de -1.13 ± 0.92 MPa; mientras que, para el tratamiento RDI-34 fue de -1.23 ± 0.18 Mpa. Los $\Psi_{A \text{ hoja}}$ en el tratamiento RDI-41 y RDI-34 fueron 8.6 y 18.3 %, más bajos que el T1, observándose diferencias estadísticas entre los tratamientos. (Figura 12-A).

Para el caso del potencial osmótico de la hoja ($\Psi_{o \text{ hoja}}$), en la mayoría de los muestreos no hubieron diferencias estadísticas entre tratamientos (Figura 11-B, Cuadro 1-A y Figura 12-B), aunque el testigo mostró un potencial osmótico de la hoja ligeramente mayor que los tratamientos RDI-41 y RDI-34. Durante el periodo de desarrollo del experimento, las plantas del tratamiento testigo tuvieron, en promedio, un $\Psi_{o \text{ hoja}}$ de -1.40 ± 0.11 MPa, en contraste con aquellas en el tratamiento RDI-41 donde se observaron -1.41 ± 0.10 MPa y las del tratamiento RDI-34, -1.45 ± 0.12 Mpa. La diferencia porcentual de 0.71 para el tratamiento RDI-41 y de 3.57 para el tratamiento RDI-34 (Figura 12-B).

En cuanto al potencial de turgencia de la hoja ($\Psi_{p \text{ hoja}}$) no hubo diferencias significativas entre los tratamientos en los diferentes muestreos realizados durante el periodo de investigación (Cuadro 1-A y Figura 11-C). El tratamiento testigo obtuvo mayor $\Psi_{p \text{ hoja}}$, comparado con los tratamientos de déficit de riego. En el testigo, el valor del $\Psi_{p \text{ hoja}}$ fue de 0.36 ± 0.19 Mpa; mientras que, en el tratamiento RDI-41 fue de 0.28 ± 0.23 MPa; y, en el tratamiento RDI-34 fue de 0.22 ± 0.18 MPa, con una diferencia porcentual respecto al testigo de 22.2 y 38.9, respectivamente (Figura 12-C).

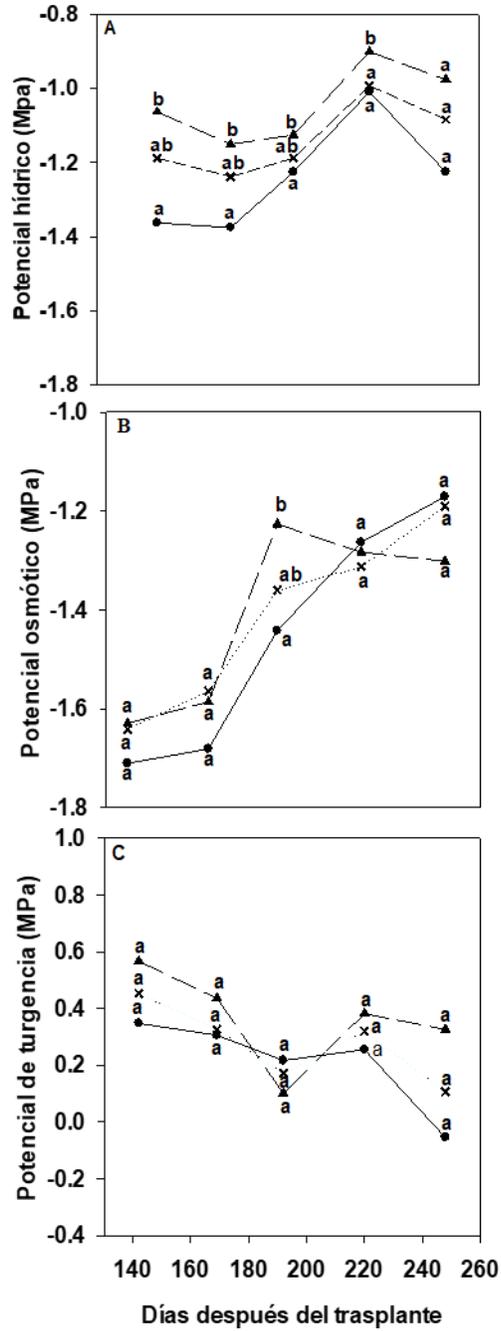


Figura 11. Dinámica del potencial hídrico (A), osmótico (B) y turgencia (C) de la hoja de *Carica papaya* L., por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41(X), RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 1-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 5$).

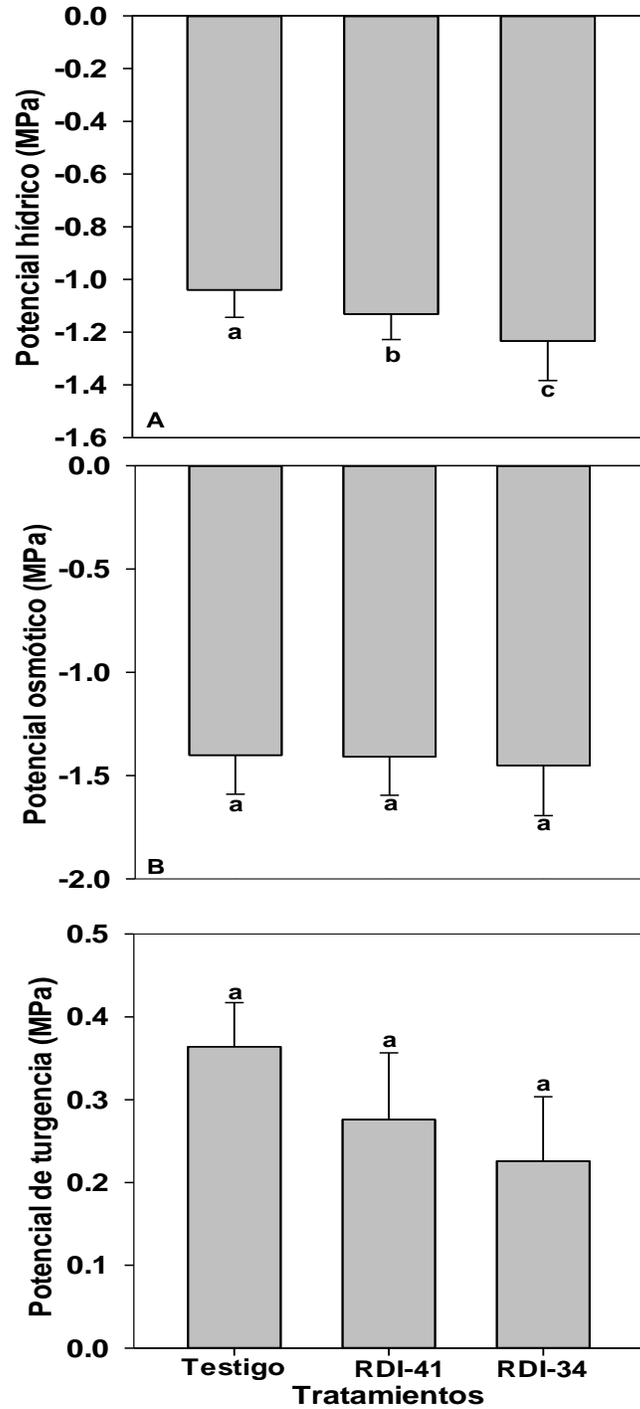


Figura 12. Promedio del potencial hídrico (A), osmótico (B) y turgencia (C) de la hoja de *Carica papaya* L. en diferentes niveles de humedad del sustrato. Las barras son el promedio \pm error estándar (n= 5) Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$).

5.2. Intercambio de gases, transpiración y eficiencia en el uso del agua

La conductancia estomática (g_s , $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), en la mayoría de los muestreos, mostró diferencia significativa ($P < 0.05$) entre tratamientos por efecto de los tratamientos de riego (Figura 13 y Cuadro 2-A). La conductancia estomática fue mayor en las plantas testigos, comparado con las plantas del tratamiento RDI-41 y RDI-34. El valor promedio de la conductancia estomática en las plantas testigos fue de 394.5 ± 86.6 , en el tratamiento RDI-41 de 239 ± 65.6 y el tratamiento RDI-34 de 184.0 ± 48.33 . La diferencia porcentual comparada con el testigo fue de 39.3 y 53.4 más bajos, respectivamente, reportándose diferencias estadísticas entre los tratamientos (Figura 17-A).

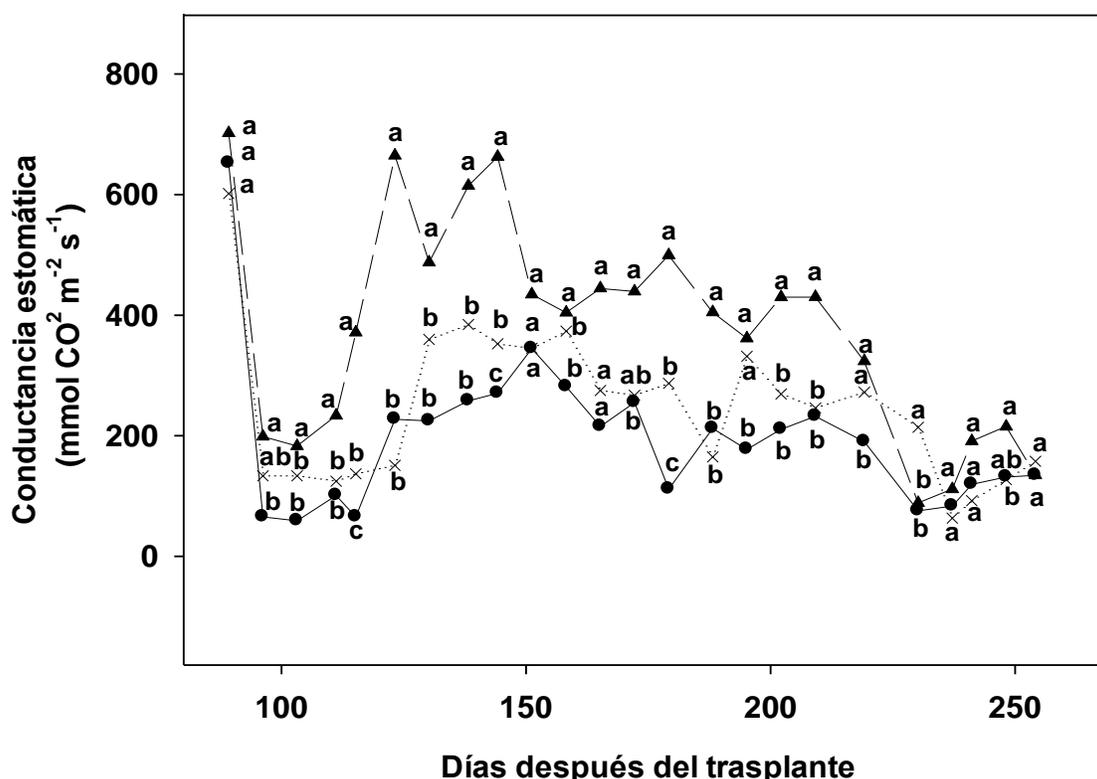


Figura 13. Dinámica de la conductancia estomática por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X), y RDI-34. Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 2-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$).

En el caso de la asimilación de CO₂ (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), los volúmenes de agua de riego aplicados en el transcurso del desarrollo del experimento, mostrando relevancia significativa ($P < 0.05$) en la mayoría de los muestreos (Figura 14 y Cuadro 3-A del apéndice). La asimilación de CO₂ fue mayor para las plantas testigos, comparado con los tratamientos déficit de riego. En promedio, las plantas testigos registraron un valor de $14.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mientras que el tratamiento RDI-41 fue de 10.2 y en el tratamiento RDI-34 fue de $7.85 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, observándose una diferencia porcentual de 29 y 45.5 comparados con las plantas testigo. Reportándose diferencias estadísticas entre todos los tratamientos (Figura 17-B).

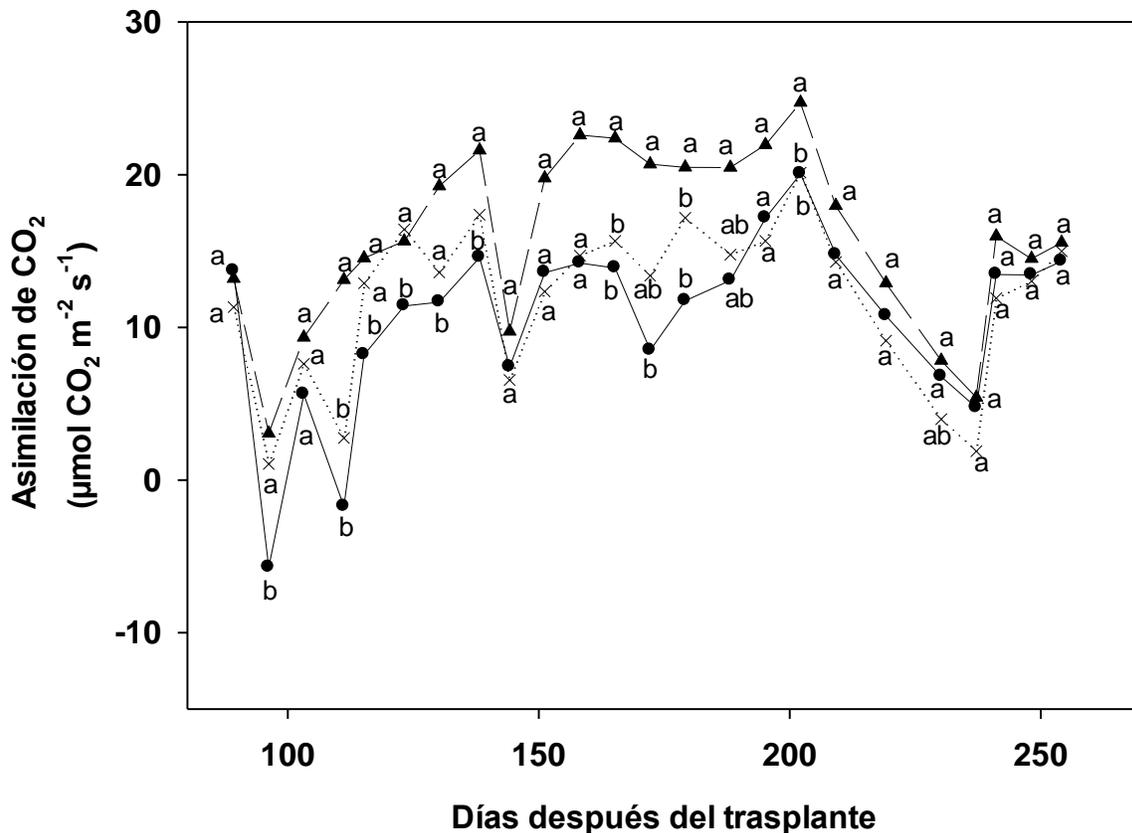


Figura 14. Dinámica de la asimilación de CO₂ por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X), y RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 3-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$).

La transpiración (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), mostró diferencias estadísticas ($P < 0.05$) por efectos los tratamientos riego aplicados en el desarrollo del experimento (Figura 15 y Cuadro 4-A en el apéndice). La transpiración fue mayor en las plantas del tratamiento testigo comparado con los tratamientos RDI-41 y RDI-34. Los valores de la conductancia estomática (medida indirecta de la apertura estomática) fueron un factor relevante en la pérdida de agua por transpiración, presentando un mayor promedio en las plantas testigo ($5.95 \pm 0.98 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), comparado con el tratamiento RDI-41 ($4.86 \pm 0.81 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $< 18.32 \%$) y tratamiento RDI-34 ($4.20 \pm 0.78 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $< 29.41\%$) (Figura 17-C).

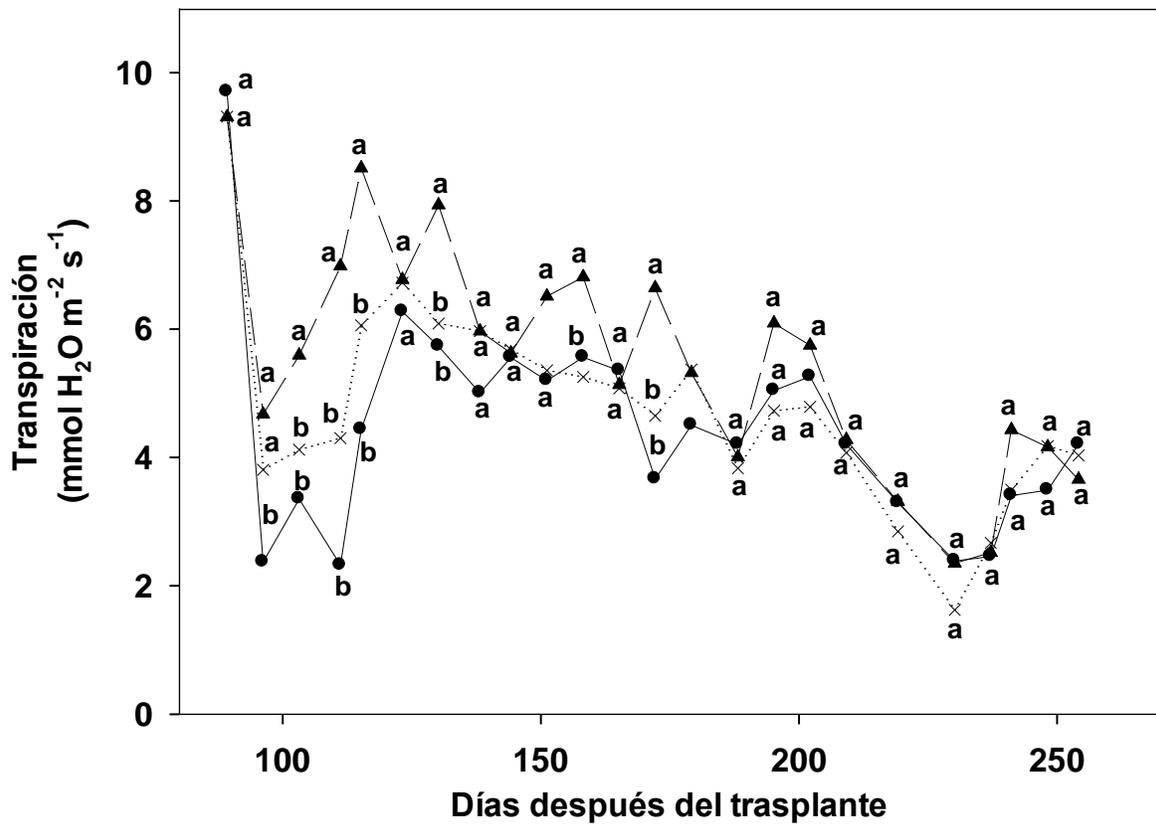


Figura 15. Dinámica de la transpiración por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X), y RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 4-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$).

Por último, la eficiencia en el uso del agua instantánea (A/E), presentó diferencias estadísticas entre tratamientos en algunos de los muestreos realizados durante el transcurso del experimento por efecto de los tratamientos de riego (Figura 16 y Cuadro 5-A). Las plantas testigo, presentaron los mayores valores con 0.003, seguidas del tratamiento RDI-41 con 0.0024 y por último el tratamiento RDI-34 0.0021 (Figura 17-D).

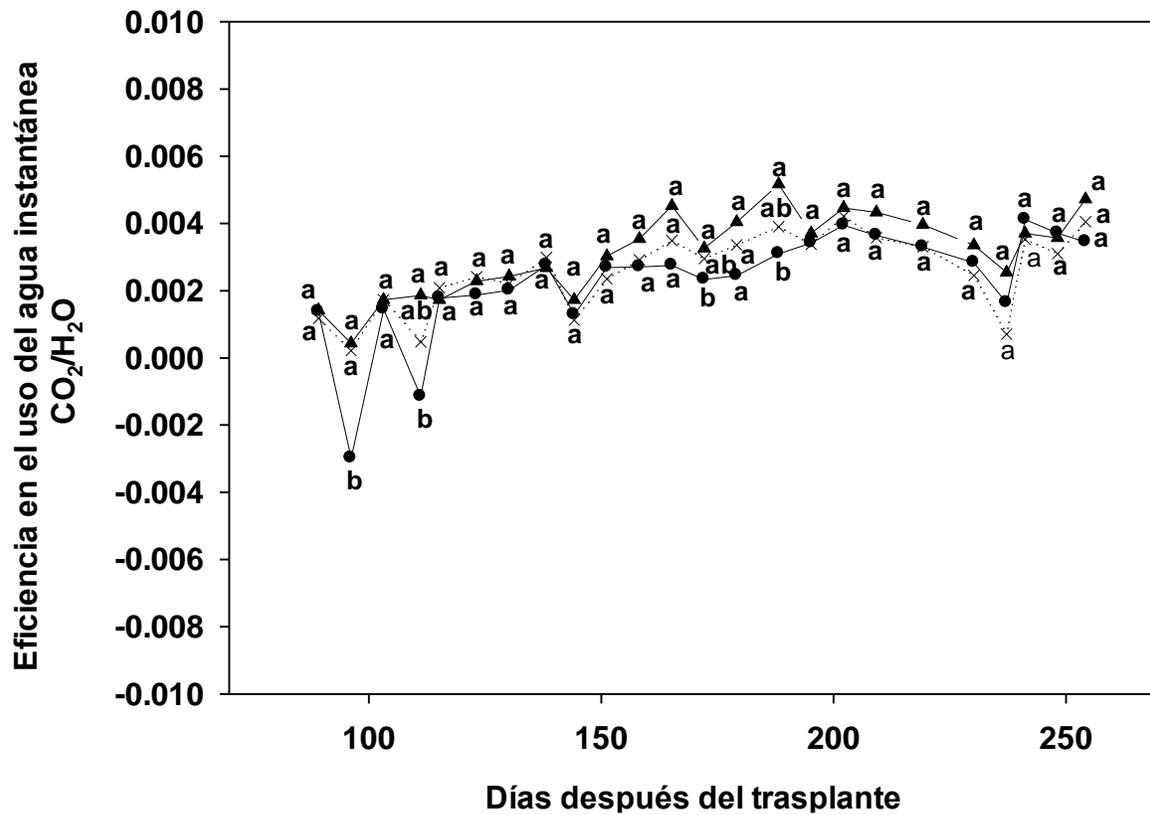


Figura 16. Dinámica de la eficiencia en el uso del agua por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X), y RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales Tukey ($P \leq 0.05$). El Cuadro 5-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$).

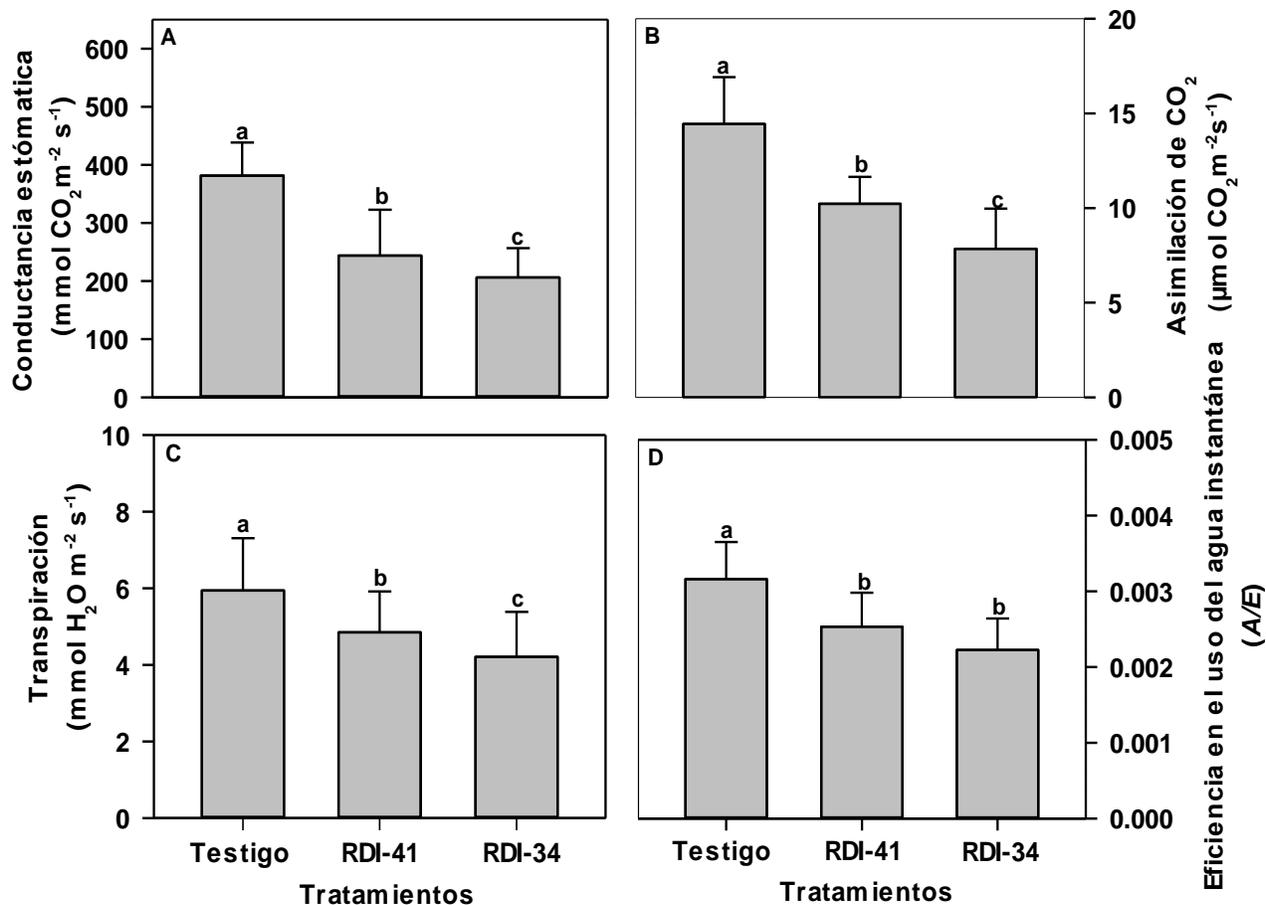


Figura 17. Promedio de la conductancia estomática (A), asimilación de CO₂ (B), transpiración (C) y eficiencia en el uso del agua instantánea (D) de *Carica papaya* L. en diferentes niveles de humedad del sustrato. Las barras son el promedio ± error estándar (n= 24). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery (P≤0.05).

5.3. Prolina en la hoja

La concentración de prolina en las hojas de *Carica papaya* L., mostró un incremento gradual a lo largo del experimento, sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 18-A y Cuadro 6-A del apéndice), esta tendencia favoreció en un aumento mayor para el tratamiento RDI-41, comparado con el tratamiento RDI-34 y testigo. En promedio, las plantas testigos presentaron un valor menor de 445.8 ± 68.1 nmoles de prolina g⁻¹ de peso seco, el tratamiento RDI-34 y RDI-

41 presentaron un aumento porcentual de 16.26 y 17.5, comparados con el tratamiento testigo (Figura 18-B).

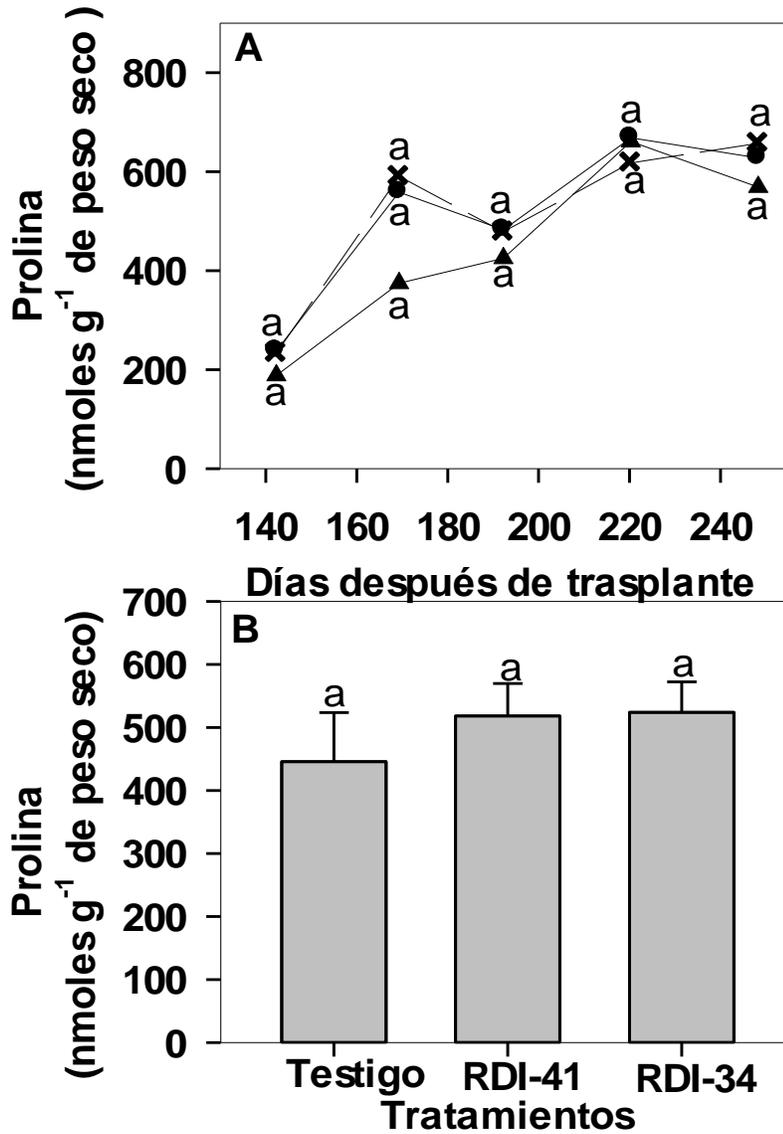


Figura 18. Dinámica de la concentración de prolina en hojas de *Carica papaya* L. (A), en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41 (X) y RDI-34 (●). Promedio de la concentración de prolina (B). Los puntos (A) y barras (B) son el promedio \pm error estándar (n = 5). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$).

5.4. Crecimiento vegetativo

El crecimiento del área foliar (cm^2) no fue significativo ($P < 0.05$) por efecto de los tratamientos (Figura 19 y Cuadro 7-A del apéndice) en los muestreos realizados. El crecimiento del área foliar, fue mayor para las plantas del tratamiento testigo, presentando un valor mayor de $269.7 \pm 44.0 \text{ cm}^2$, en el caso del tratamiento RDI-41 un valor de $246.2 \pm 38.9 \text{ cm}^2$ y el tratamiento RDI-34 $264.2 \pm 51.6 \text{ cm}^2$. No se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos (Figura 21-D).

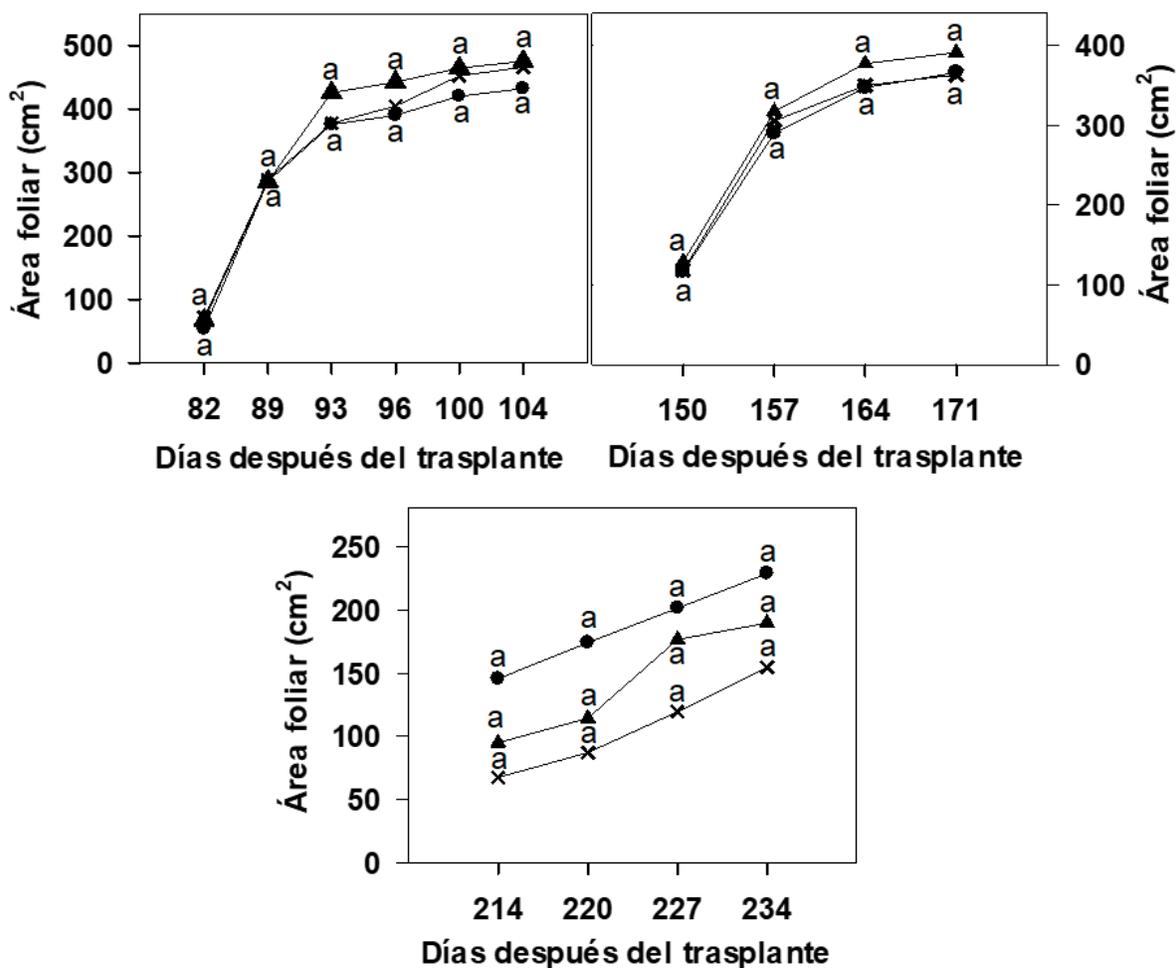


Figura 19. Dinámica del área foliar por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X) y RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$). El Cuadro 7-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$).

En el diámetro del tallo (cm), los tratamientos influyeron significativamente ($P < 0.05$) en la mayoría de los muestreos realizados (Figura 20-A y Cuadro 7-A). El diámetro del tallo fue mayor para las plantas testigos comparado con los tratamientos con déficit de riego. En general, el diámetro del tallo (cm), mostró un valor promedio mayor de 5.3 cm para el tratamiento testigo, comparado con los tratamientos RDI-41 y RDI-34, los cuales obtuvieron un valor promedio menor de 5.2 y 4.82 cm, observándose diferencias estadísticas entre los tratamientos (Figura 21-A).

Al igual el diámetro del peciolo mostró diferencias estadísticas ($P < 0.05$) en la mayoría de los muestreos realizado en el transcurso del desarrollo del experimento (Figura 20-B y Cuadro 7-A del apéndice). El diámetro del peciolo fue mayor en plantas del tratamiento testigo, siendo que presentarán un valor promedio de 1.17 cm, comparado con los tratamientos RDI-41 (1.03 cm) y RDI-34 (0.92 cm), mostrando diferencias estadísticas entre tratamientos en estudio (Figura 21-B) ($P < 0.05$).

Por último, la longitud del peciolo (cm) mostró diferencias significativa ($P < 0.05$) entre los tratamientos en la mayoría de los muestreos realizados (Figura 20-C y Cuadro 7-A en apéndice), siendo que las plantas del tratamiento testigo mostrarán una mayor longitud del peciolo, presentando un promedio de 47.69 cm, caso contrario para el tratamiento RDI-41 y RDI-34, los cuales mostraron valores menores de 44.31 y 40.71 cm, respectivamente, para ello se obtuvo diferencias estadísticas entre los tratamientos (Figura 21-C) ($P < 0.05$).

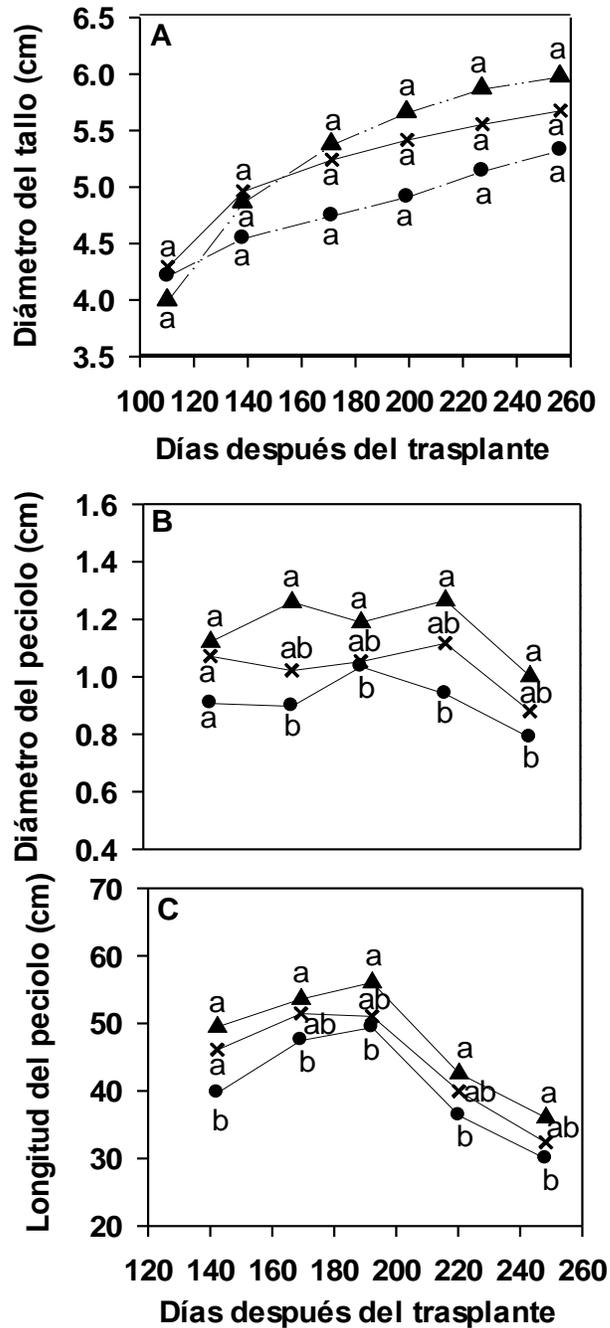


Figura 20. Dinámica del diámetro del tallo (A), peciolo (B), y longitud del peciolo (C), por efecto de diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo (▲), RDI-41 (X) y-RDI-34 (●). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$). El Cuadro 7-A contiene los parámetros del análisis de varianza; $Pr > F_c$, \bar{x} , coeficiente de variación (CV %), diferencia significativa mínima (DSM) ($n = 6$).

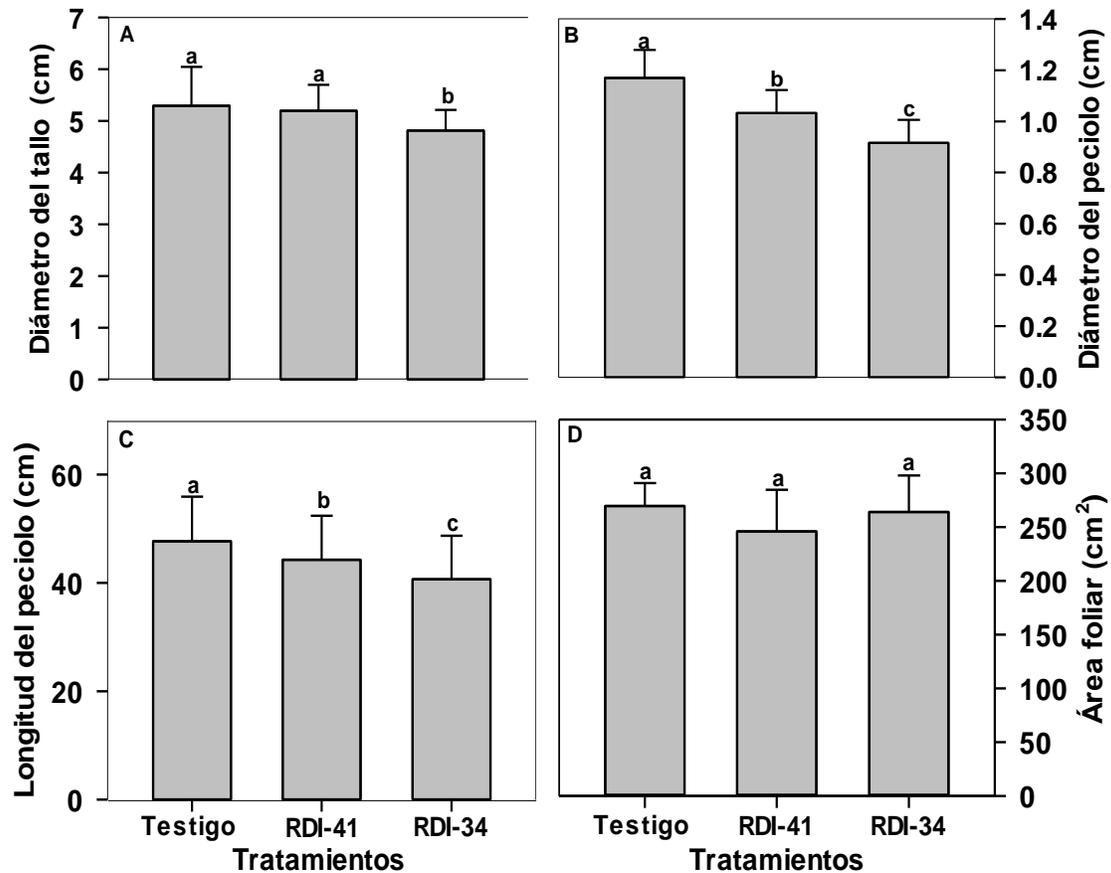


Figura 21. Promedio del diámetro del tallo (A), peciolo (B), longitud del peciolo (C), y área foliar (D) de *Carica papaya* L. en diferentes niveles de humedad del sustrato. Las barras son el promedio \pm error estándar (n= 6). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales (P<0. 05 Tukey).

5.5. Producción y calidad del fruto

Los tratamientos de riego aplicados durante el desarrollo del experimento influyeron significativamente (P<0. 05) en el peso del fruto (Figura 22 y Cuadro 8-A del apéndice). El peso de la fruta fue mayor en las plantas del tratamiento testigo, comparado con los tratamientos RDI-41 y RDI-34. El valor promedio del peso del fruto para el tratamiento testigo fue de 1.05 ± 0.28 kg, en el tratamiento RDI-41, 0.67 kg y en el tratamiento RDI-34 0.76 kg, con una disminución porcentual de 36.2 y 27.6 mas bajo que el testigo, respectivamente, observándose diferencias estadísticas entre los tratamientos.

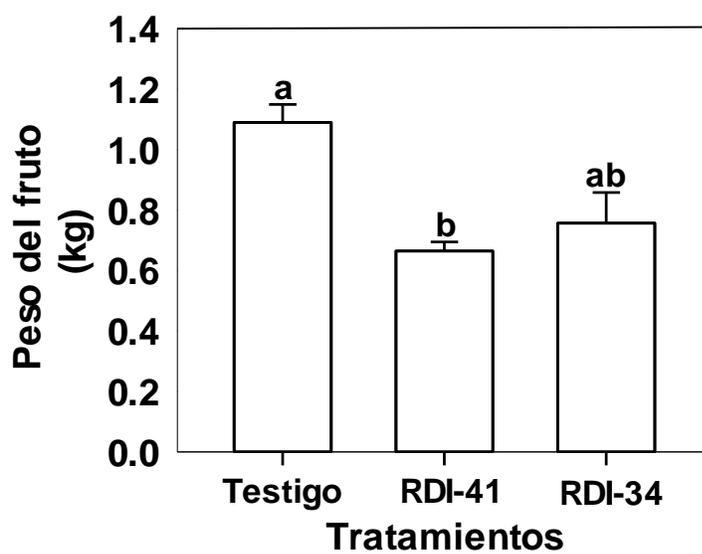


Figura 22. Peso del fruto del fruto de *Carica papaya* L. en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41, y RDI-34. Las barras representan el promedio \pm error estándar (n= 5). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$)

Al igual la longitud del fruto mostró diferencias estadísticas ($P < 0.05$) por efectos de los volúmenes de agua de riego aplicados (Cuadro 8-A del apéndice), los frutos de las plantas del tratamiento testigo fueron mayor comparados con los de los tratamientos RDI-41 y RDI-34, presentado un promedio de 23.40 cm (testigo), para el caso del tratamiento RDI-41 se obtuvieron frutos con longitud de 18.06 cm, y por último, el tratamiento RDI-34 mostró frutos con longitud de 17.60 cm (22 y 24.8 % < al testigo).

Para el caso del diámetro del fruto no se presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.05$) por efectos de los tratamientos (Cuadro 8-A del apéndice), los frutos del tratamiento testigo mostraron un mayor diámetro comparados con los tratamientos RDI-41 y RDI-34. Los frutos del tratamiento testigo mostraron un promedio de 10.75 cm, comparado con el tratamiento RDI-41 que presentaron un valor de 10.73 y para el caso del tratamiento RDI-34 frutos con diámetro de 10.30.

Los volúmenes de agua de riego que se aplicaron en el desarrollo de experimento no influyeron estadísticamente en el número de frutos ($P < 0.05$). De manera tendencial se observó que el tratamiento RDI-34 fue mayor en producción de frutos comparado con los

tratamientos RDI-34 y testigo. El valor promedio para el número de frutos en plantas del tratamiento RDI-34 fue de 37.5, para el tratamiento RDI-41 fue de 35.10; mientras que para el tratamiento testigo fue de 29.17 (Cuadro 8-A del apéndice).

Con respecto a calidad externa del fruto, no se reportaron diferencias estadísticas por efectos de los tratamientos en la firmeza del fruto ($P < 0.05$). Los frutos del tratamiento RDI-34 fueron mayor en firmeza al resto de los tratamientos, siendo superior a los frutos del tratamiento RDI-41 en un 24 % y en un 25 % a los frutos del tratamiento testigo, estos frutos presentaron un mayor ablandamiento (Figura 23 y Cuadro 8-A del apéndice).

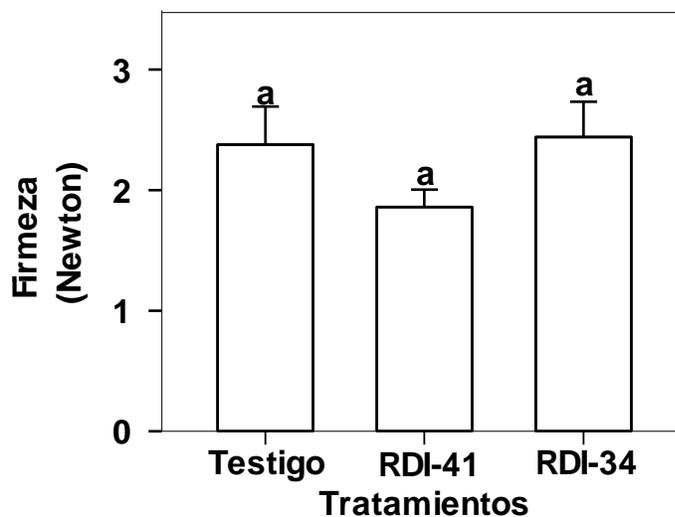


Figura 23. Firmeza del fruto de *Carica papaya* L. en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41, y RDI-34. Las barras representan el promedio \pm error estándar ($n=5$). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$)

Por último, en la calidad interna, los tratamientos en estudio no mostraron efectos estadísticos en la acidez del fruto ($P < 0.05$). Los frutos del tratamiento RDI-34 fueron mayor, comparado con el tratamiento testigo y el RDI-41. El tratamiento RDI-34 fue superior en un 17.8 y 13.3 al tratamiento testigo y RDI-41 (Figura 24 y Cuadro 8-A del apéndice).

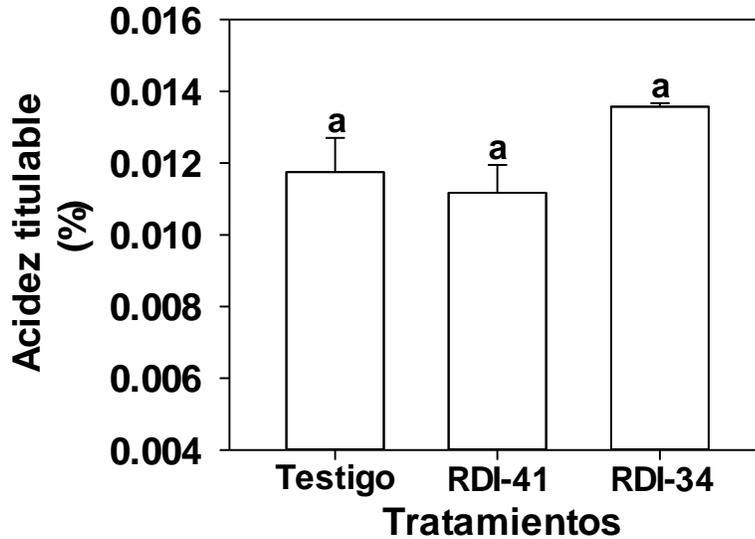


Figura 24. Acidez titulable del fruto de *Carica papaya* L. en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41 y RDI-34. Las barras representan el promedio \pm error estándar (n= 5). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$).

Los tratamientos en estudio no mostrarán diferencias estadísticas ($P < 0.05$) en los sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix). El tratamiento RDI-34 fue mayor en los sólidos solubles totales, comparado con el tratamiento testigo y RDI-41, reportándose una diferencia porcentual de 13.4 con el tratamiento testigo y 2.1 con el tratamiento RDI-34 (Figura 25 y Cuadro 8-A del apéndice).

Los tratamientos RDI-41 y RDI-34 son importantes de destacar por su mejora en la huella hídrica azul y productividad del agua, ya que mejoraron estos parámetros y los rendimientos (kg pl^{-1}) fueron similares al tratamiento testigo (Cuadro 11).

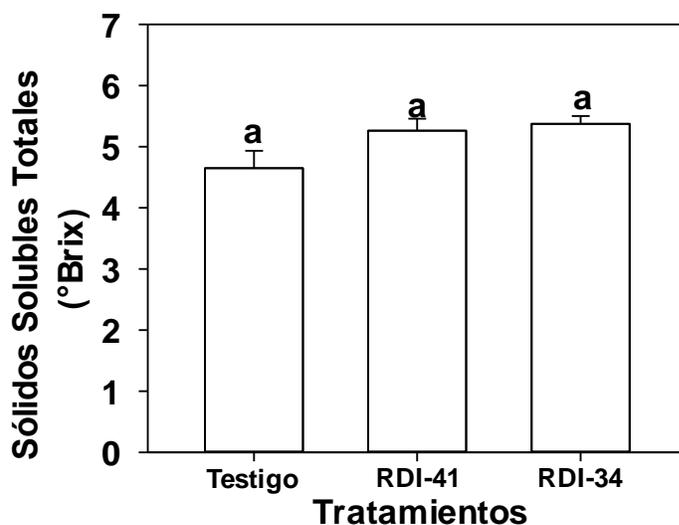


Figura 25. Sólidos solubles totales (°Brix) del fruto de *Carica papaya* L en diferentes niveles de humedad del sustrato; testigo, RDI-41 y RDI34. Las barras representan el promedio \pm error estándar (n= 5). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukery ($P \leq 0.05$).

Cuadro 11. Huella hídrica y eficiencia agronómica del uso del agua de la cantidad total de agua aplicada durante el desarrollo de *Carica papaya* L. en diferentes niveles de humedad del sustrato.

Tratamientos	kg pl ⁻¹	Huella hídrica azul (L H ₂ O kg fruta)	Productividad del agua (kg fruta L H ₂ O)
Testigo	30.62	54.80	0.0180
RDI-41	23.52	29.00	0.0346
RDI-34	28.50	20.13	0.0500

En el Cuadro 12 se muestran los volúmenes reportados por otros autores comparados con los obtenidos en el presente trabajo, mostrando la reducción del gasto de agua que se pudo obtener con la estrategia implementada en el desarrollo de la investigación (RDI-41 y RDI-34).

Cuadro 12. Volumen de agua aplicado en el desarrollo de *Carica papaya* L.

Volumen de agua L ha ⁻¹	Referencias	RDI-41	RDI-34
		679.79 L pl ⁻¹	573.6 L pl ⁻¹
		1,359,580 L ha ⁻¹	1147200 L ha ⁻¹
		% de ahorro de agua de tratamientos con déficit de riego	
8,160,000	Mellado-Vázquez <i>et al.</i> (2005)	>83.34	>86
12,490,000	Da Silva <i>et al.</i> (2001)	>89	>91
17,490,000	Almeida <i>et al.</i> (2003)	>92.23	>93.44
18,240,000	Santana <i>et al.</i> (2008)	>93.55	>94.00

El cálculo de volumen de agua se hizo en base a una densidad de población de 2000 pl ha⁻¹

VI. DISCUSIÓN

6.1. Situación de la escasez del agua y demanda de riego del cultivo de papayo

La escasez del agua en el mundo es dinámica y compleja, ésta pone en riesgo la supervivencia de los seres vivos, riesgo que se debe a las actividades antropogénicas que se llevan a cabo en los diferentes ecosistemas, las cuales alteran de manera directa e indirecta el ciclo del agua (Vörösmarty y Sahaguiano, 2000; Dolan *et al.*, 2021). Esta problemática es una realidad, debido a que actualmente, más del 40 % de la población mundial sufre de los estragos de la sequía y escasez de este líquido vital, creando conflictos violentos por el agua y convirtiéndose en un asunto de seguridad nacional para todos los países (Schmeier, 2022).

En particular, las actividades agrícolas ejercen una presión sobre la disponibilidad de agua dulce a nivel global (Gerten *et al.*, 2020), en consecuencia, el incremento de tierras para actividades agrícolas conlleva un incremento en el consumo de agua, de hecho, las actividades de riego constituyen el 84 % del uso consuntivo anual de los cultivos agrícolas (Brauman *et al.*, 2016). A lo anterior se agrega que la variación climática dificulta la disponibilidad del agua, Liu *et al.* (2022) estiman que, en 24 años, más del 80 % de las tierras cultivables experimentarán algún nivel de escasez de agua. Por lo que resulta muy criticable, la pérdida y desperdicio y mala distribución de alimentos que se estima en alrededor de 1300 millones de toneladas por año (Gustavsson *et al.*, 2011), tanto por lo que significa no aprovechar eficientemente los alimentos producidos, sino también por el desperdicio de agua virtual que ello representa.

La producción de papaya, al igual que otros cultivos perennes, tiene requerimientos hídricos mayores que los cultivos anuales, por ello, la productividad del agua de riego es menor (Vico y Brunsell, 2018). Carr (2013) mencionó que el cultivo de papaya es muy sensible a los cambios de humedad y la cantidad de agua adecuada para el riego se desconoce, por lo tanto, es necesario diseñar una estrategia para la programación de riego y ser precisos con las cantidades que realmente se requieren para maximizar la productividad del agua. Diversos autores han aplicado una lámina de riego total de 1749 mm ha⁻¹ (Almeida *et al.*, 2003), 1249 mm ha⁻¹ (Da Silva *et al.*, 2001), y 1583 mm ha⁻¹

(Santana *et al.*, 2008), con una productividad del agua de 28, 29.4 y 11 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente. Ello demuestra el alto consumo de agua de este cultivo, en parte debido a la dinámica de producción de hojas, flores y frutos.

6.2. Relaciones hídricas

Los resultados de la presente investigación en términos del $\Psi_{A \text{ hoja}}$ coinciden con lo reportando recientemente en el cultivo de nectarinas (*Prunus pérsica* L. var *Nucipersica*, Scalisi *et al.*, 2019), y cerezo (*Prunus avium* L., Blaya-Ros *et al.*, 2021), los resultados de estos autores muestran un comportamiento similar del $\Psi_{A \text{ hoja}}$, en donde, en las plantas con déficit de riego siempre fueron inferiores al tratamiento testigo. Los valores del $\Psi_{A \text{ hoja}}$ mostraron correlación significativa con las variables potencial de turgencia ($r= 0.59^*$) diámetro del tallo ($r= 0.74^*$), área foliar ($r= 0.55^*$) y diámetro del fruto ($r= 0.53^*$) (Cuadro 9-A), que resulta de esperarse, toda vez que con una cantidad mayor de agua, la respuesta de correlación positiva significativa, indica incrementos en variables hídricas o de crecimiento.

Los cambios en la turgencia de la hoja de papaya principalmente al inicio de los tratamientos, es probable que se deban a un ajuste osmótico, para hacer frente a los déficits de riego y por lo tanto mantener la turgencia (Figuras 12 B y C) (RDI-41 y RDI-34) (Höfler, 1920). Turner (2016) menciona que, este ajuste osmótico se debe a la acumulación de solutos compatibles en el citoplasma de las células, en respuesta al cambio del potencial hídrico, manteniendo así el potencial de turgencia en valores positivos.

El potencial de turgencia, en consecuencia, mostró una correlación significativa con las variables potencial osmótico ($r=0.71^*$), prolina ($r=0.70^{**}$), asimilación de CO₂ ($r=0.52^*$), eficiencia en el uso del agua instantánea ($r= 0.81^{**}$), diámetro del tallo ($r= 0.76^{**}$) y diámetro del fruto ($r= 0.30^*$) (Cuadro 9-A), haciendo notar los efectos del agua en fotosíntesis y acumulación de biomasa, así como también, los efectos de elevación del nivel de prolina bajo condiciones de déficit y sus efectos benéficos al inducir ajuste osmótico.

Durante los primeros meses de aplicación de estrés hídrico se pudo observar un comportamiento de disminución del potencial osmótico de la hoja (Figura 12 B), en cuyo caso, la correlación negativa que mostró con la concentración de prolina ($r = -0.55^*$), a menor potencial osmótico, mayor concentración de prolina y su consecuente beneficio de ajuste. Los resultados del potencial osmótico y de turgencia en esta investigación, son similares a lo reportando en el cultivo de pera Asiática (*Pyrus serotina* Rehd., Behboudian *et al.*, 1994), y maíz (*Zea mays* L., Trouverie *et al.*, 2003).

La respuesta observada en el cultivo de papaya es muy común observarla en diferentes especies como resultado de un estrés hídrico, lo cual, provoca alteraciones generales en los procesos fisiológicos del vástago de las plantas, limitando además la absorción de agua por las raíces, incrementado por una alta tasa de evaporación debido a baja humedad relativa, alta temperatura, y alta radiación solar (Giménez *et al.*, 2013).

Por último, es importante destacar que en el muestreo a los 220 ddt, se observó una ligera disminución en la dinámica del potencial osmótico, y un ligero aumento en el potencial hídrico de la hoja, de turgencia y prolina, que podría estar asociado a fase final de crecimiento de la fruta, en la cual se requiere de agua y nutrimentos para que se exprese al máximo potencial; a los 223 ddt se realizó la primera cosecha (Figura 11 A-C). En el cultivo de fresa (*Fragaria ananassa*, Jia *et al.*, 2020) se determinó que hay una disminución del potencial osmótico, debido al aumento de sólidos solubles totales, y la presencia de una familia de proteínas parecida a la osmotina, la cual se expresa en situaciones de diferentes tipos de estrés, creando osmotolerancia en las plantas (Bashir *et al.*, 2020).

6.3. Intercambio de gases

Las respuestas de las plantas ante diversos tipos de estrés, es preparar y modificar sus procesos fisiológicos y metabólicos (Raja *et al.*, 2020); una de las primeras respuestas al estrés por sequía, es el cierre parcial de estomas, lo cual, afecta en mayor grado la pérdida de vapor de agua por transpiración; si se mantiene este cierre parcial de los estomas, la eficiencia en el uso del agua por la planta se incrementa (Zenes *et al.*, 2020; Raja *et al.*, 2020). Existen muchos informes en la literatura, en donde, se

demuestra que este cierre inicial de estomas debido al déficit hídrico, afecta en menor proporción a la asimilación de CO₂, que a la transpiración (Zenes *et al.*, 2020). El cierre estomático como defensa de la planta ante el estrés hídrico, se debe a la síntesis y acumulación de ácido abscísico (ABA) en la raíz, el cual es transportado en el torrente de transpiración vía xilema hacia la parte aérea, además de liberarse ABA de compartimentos intercelulares, desencadenando una señalización hacia las hojas y subsecuente cierre estomático (Luo, *et al.*, 2021; Karanja *et al.*, 2021; Lehr *et al.*, 2021).

Las plantas de papaya de los tratamientos RDI-41 y RDI-34, mostraron de manera general, una reducción significativa de la conductancia estomática (Figura 13). El análisis de correlación detectó una asociación positiva de la conductancia estomática con la asimilación de CO₂ ($r= 0.60^*$), transpiración ($r= 0.91^{**}$), peso del fruto ($r= 0.64^*$) y, así como una asociación negativa con los °Brix en frutos ($r= -0.79^{**}$) (Cuadro 9-A), denotando la importancia del intercambio gaseoso en fotosíntesis y la acumulación de biomasa.

En trabajos realizados por diversos autores en el cultivo de papaya (Lima *et al.*, 2015; Lima *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2021a), se registró la misma tendencia en la conductancia estomática, al aplicar déficit de riego, con reducciones de 46.4, 32.6 y 33.3 % comparado con plantas con riego de acuerdo a su demanda de evapotranspiración; una situación similar se registró en el presente estudio observándose una reducción del 53.3 % en promedio de los tratamientos RDI-41 y RDI-34, comparados con el testigo.

Por otra parte, existe interacción entre el ABA con otras hormonas (como son, ácido salicílico y jasmonato de metilo), considerándose que la señalización del ABA es una respuesta rápida y de corto plazo. Otro aspecto a destacar de la señalización por efecto de ABA, son estos tres mensajeros secundarios: Especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), óxido nítrico (NO) y el ión calcio (Ca⁺² libre citosólico), que dan respuesta a la acumulación de osmolitos, la activación de genes adaptativos [respuesta hipersensible (HR) y muerte celular programada (PCD)], así como también la estimulación de otros componentes de señalización como la fosfolipasa C y D, ácido fosfatídico, inositol 1,4,5-trifosfato, además del aumento de pH citosólico (Bharath *et al.*,

2021). Es importante resaltar que la conductancia estomática tiene efectos directos e indirectos, en la transpiración, asimilación de CO₂ y eficiencia en el uso del agua, y, en consecuencia, en la productividad del cultivo (Li *et al.*, 2017; Liao *et al.*, 2022).

En el presente estudio, la disminución en la conductancia estomática (gs) provocó una reducción en la asimilación de CO₂ (A) (Figura 14) y transpiración (E) (Figura 15), lo cual, incrementó la eficiencia en el uso del agua por el cultivo (Figura 16). Estos resultados son similares a los reportados por Lima *et al.* (2016) y Santos *et al.* (2021a), que reportaron una disminución en la asimilación de CO₂ y en la transpiración, en tanto que causaron un incremento en la EUA instantánea por efectos del déficit de riego en el cultivo de papaya, coincidiendo con la misma dinámica del presente trabajo de investigación. Es por ello importante destacar las asociaciones que presentó la asimilación de CO₂ con la eficiencia en el uso del agua instantánea ($r= 0.74^{**}$), diámetro del tallo ($r= 0.62^*$), transpiración con los °Brix de frutos ($r= -0.76^{**}$) y peso del fruto ($r= 0.67^*$); por ende, la eficiencia del uso del agua instantánea con el diámetro del tallo ($r= 0.76^{**}$) y área foliar ($r= -0.60^*$) (Cuadro 9-A).

La reducción del suministro de agua utilizando riego deficitario causa la disminución de la gs, A y E, en algunas ocasiones con reducciones significativas, con la finalidad de conservar y aumentar la productividad del agua; con el fin de estimular las respuestas fisiológicas de las plantas a esta condición de estrés, pero a un nivel en donde el rendimiento no se vea afectado y se mejore la calidad de las frutas de los cultivos (Romero *et al.*, 2004; Zúñiga *et al.*, 2018; Ortega-Farías *et al.*, 2020).

Diversos autores han determinado que la estrategia de riego deficitario puede reducir el gasto de agua de los cultivos entre un 20 a 50 % (Carbonell-Barrachina *et al.*, 2014; Lima *et al.*, 2016). Anteriormente se indicó que la A tuvo una disminución significativa de manera general, pero es importante indicar que la dinámica de la A en el transcurso del trabajo de investigación, fluctuó entre los tratamientos, de tal manera que las plantas de los tratamientos RDI-41 y RDI-34 al final del experimento tuvieron una A superior a las plantas del testigo (Figura 14); esto, se puede explicar de la siguiente de manera: La gs y A muestran una correlación no lineal (Zúñiga *et al.*, 2018), de tal manera que mientras

que una reducción en la gs equivalente al 53.35 %, la A solo se afectó en un 41.67 %. Por último, se obtuvo una mejor productividad del agua, lo cual impacta en una disminución de la huella hídrica azul. En la presente investigación, se necesitaron 54.8 L de agua para producir un kg de fruto en el tratamiento testigo, mientras que para producir el mismo kg de fruto con el tratamiento RDI-34 se requirieron 20.13 L de agua (Cuadro 11). Resultados similares en donde se ha disminuido la huella hídrica azul por efecto de estrategias de déficit de riego han sido reportadas por Santos *et al.* (2021a) y Pardo *et al.* (2020).

6.4. Prolina

El déficit hídrico en las plantas provoca una reacción en sus mecanismos fisiológicos, morfológicos y expresión de genes, incluido el ajuste osmótico, la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y el sistema de defensa antioxidante para poder tener la capacidad de completar de alguna manera sus etapas ontogénicas (Sun *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2021; Carraro y Di Iorio, 2022).

De manera indirecta, el estrés hídrico induce señales que activan genes funcionales, para poder sobrellevar este tipo de estrés, acumulando osmoprotectores u osmolitos tales como, proteínas solubles, compuestos cuaternarios de amonio, azúcares solubles, glicina betaína, aminoácidos, acuaporinas y prolina (Per *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2021; Oztürk *et al.*, 2021). En suma, es fundamental el ajuste osmótico, debido a que permite regular la turgencia celular ante un déficit hídrico, con el fin de mantener un buen funcionamiento estomático (mantenimiento del intercambio de gases) y, de esta manera, evitar el impacto negativo en la expansión celular (Oztürk *et al.*, 2021).

La prolina (aminoácido) juega un papel fundamental en la reducción del estrés como un osmoprotector presente en el ajuste osmótico y en la eliminación de ROS. La síntesis de la prolina diverge entre condiciones de estrés y condiciones normales; en condiciones de estrés, la síntesis se da por la vía del glutamato que tiene lugar en el cloroplasto (Per *et al.*, 2017; Oztürk *et al.*, 2021; Ghaffari *et al.*, 2021). La acumulación de prolina en condiciones de estrés mejora la adaptación de las plantas (de Sousa *et al.*, 2020; Álvarez *et al.*, 2022), tal es el caso en cítricos, donde, en condiciones de aumento del estrés

(sequía y calor), el contenido de prolina fue en aumento (raíces y hojas), mejorando su adaptabilidad y reduciendo el daño oxidativo por las ROS (Zandalinas *et al.*, 2017).

En la presente investigación, la acumulación de prolina no fue significativa en todos los muestreos, pero, en la dinámica de concentración (Figura 18 A), se puede observar que en el muestreo de los 142 a los 169 ddt, el aumento en las hojas de las plantas de papaya, en caso de los tratamientos RDI-41 y RDI-34, fue de 16.26 y 17.5 %, respectivamente. Coincidentemente, Carvalho *et al.* (2020) reportaron que en plantas de pera y tres cultivares de naranja, la concentración de prolina aumentó en la medida que el estrés hídrico fue mayor.

La concentración de prolina se relacionó negativamente con las variables transpiración ($r = -0.65^{**}$) y área foliar ($r = -0.82^{**}$), en tanto que, positivamente, con eficiencia en el uso del agua instantánea ($r = 0.79^{**}$), diámetro del tallo ($r = 0.57^*$) y °Brix de frutos ($r = 0.61^*$) (Cuadro 9-A). Denotando, su efecto en el ajuste osmótico que causa, promoviendo una condición hídrica de la planta no restrictiva para logras acumulación de biomasa con mayor eficiencia.

Por otro lado, Álvarez-Méndez *et al.* (2022) concluyeron que la aplicación de prolina como soluto al cultivo de papaya bajo un estrés salino, podría ayudar en la adaptación de la planta a dicha condición.

6.5. Crecimiento vegetativo

Se ha determinado en varios trabajos de investigación que el riego deficitario tiene un impacto directo en la inhibición del crecimiento celular, crecimiento vegetativo, reproductivo y en general en todos los procesos fisiológicos de la planta (Hsiao, 1973; Shao *et al.*, 2008; Siakou *et al.*, 2021; Parkash *et al.*, 2021).

En el presente estudio, las variables correspondientes al, diámetro y longitud del peciolo, y área foliar, disminuyeron a medida que se reduce la disponibilidad de agua (RDI-41 y RDI-34), con una reducción en promedio de 17, 11, y 5 %, respectivamente, en comparación con las plantas del tratamiento testigo (Figuras 19 y 20).

El área foliar mostró correlación negativa con las variables diámetro del fruto ($r = -0.54^*$), y número de frutos ($r = -0.59^*$), notándose el efecto de menor tasa de transpiración que implica los tratamientos RDI-41 y RDI-34 y la restricción que se causa en disponibilidad de agua para crecimiento de frutos. Por el contrario, el diámetro del peciolo con la longitud del peciolo ($r = 0.65^{**}$), conductancia estomática ($r = 0.80^{**}$), asimilación de CO_2 ($r = 0.66^{**}$) y transpiración ($r = 0.61^*$) y, la longitud del peciolo con conductancia estomática ($r = 0.59^*$) y peso del fruto ($r = 0.67^*$), fueron correlaciones positivas, asociadas con los efectos de acumulación de biomasa (Cuadro 9-A).

Estos resultados coinciden con los reportados en los cultivos de papaya, pepino, vid y naranja (Santos *et al.*, 2021; Parkash *et al.*, 2021; Caruso *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2021). Por el contrario, Puglisi *et al.* (2019) consignaron un crecimiento del área foliar similar en el cultivo de naranja en todos los tratamientos de déficit de riego en estudio.

Como se ha planteado anteriormente, el déficit hídrico emite señal química, siendo esto una limitante para el crecimiento de la hoja y al mismo tiempo puede servir para regular el vigor vegetativo. Esta señalización se mueve en el flujo transpiratorio por el xilema hasta el follaje (Sobeih *et al.*, 2004); el ABA está considerada una fitohormona del estrés que inhibe el crecimiento de las plantas a través de una inducción transcripcional de genes de protección en todos los órganos que integra la planta (Planes *et al.*, 2014); además, regula el balance hídrico, reduciendo la pérdida total del agua intracelular (Tuteja, 2007).

La gran mayoría de investigaciones indican que el ABA es una señal química importante (raíz a brote), cuando las plantas se encuentran en condiciones limitantes o restringidas de humedad en el suelo (Davies *et al.*, 2005). Para ello, varios trabajos han reportado, que el ABA y el pH de la savia del xilema aumentan su concentración a medida que disminuye el contenido de humedad en el suelo (Wang *et al.*, 2012).

La salinidad también repercute en la formación de ABA en la raíz, movilizándose a través del xilema y traslocándose a la hoja, aunque no en todos los casos se acumula en las hojas (Davies *et al.*, 2005). Además del ABA producido en la raíz, una parte del ABA concentrado en el xilema, en realidad se origina en las hojas, se carga al floema,

movilizándose a las raíces, donde se deposita una parte y, el resto, se moviliza a través del xilema y se recircula a los brotes (Peuke *et al.*, 1994; Davies *et al.*, 2005). Stoll *et al.* (2000) en el cultivo de vid, con la técnica de secado parcial de la raíz (PRD), determinaron que el ABA aumentó en la hoja y en la savia del xilema, además, el pH del xilema aumentó con una reducción en la gs.

Por último, la conducción del agua es esencial para el buen desarrollo de las plantas, Rowland *et al.* (2015) reportaron que las condiciones de sequía extremas en árboles tropicales provocan un deterioro hidráulico en los conductos, teniendo como consecuencia la muerte de los árboles en la selva tropical. La conductividad hidráulica afecta de manera directa el potencial fotosintético de las plantas; el agua que se transporta por el xilema debe de satisfacer las necesidades de pérdida de agua por los estomas, para dar paso a la asimilación de CO₂ (Brodribb, 2009).

Las plantas adaptadas o en situación de sequía, son peculiares por tener un reducido suministro de agua a través de los tallos (< eficiencia hidráulica); estas plantas tienen una baja demanda de agua debido a un menor crecimiento vegetativo, presentando conductos estrechos (Xu *et al.*, 2021). En el presente trabajo de investigación, el diámetro del tallo de las plantas de los tratamientos RDI-41 y RDI-34, presentaron un menor crecimiento con una reducción del 1.9 y 9.1 %, respectivamente, en relación con el diámetro alcanzado en plantas del tratamiento testigo, por ello la variable diámetro del fruto mostró una asociación con diámetro del fruto ($r= 0.51^*$), así como las antes indicadas con las demás variables. Este comportamiento concuerda con lo presentado por Santos *et al.* (2021b), Marler y Clemente (2006) y Ulluah *et al.* (2021), en el cultivo de papaya y tomate, quienes reportaron en su trabajo de investigación una disminución del diámetro del tallo del 12, 31 y 29 %, respectivamente, comparado con sus plantas testigo, siendo este comportamiento coincidente con los resultados obtenidos en el presente estudio, menor diámetro de tallo en los tratamientos RDI-41 y RDI-34 (Figura 22 A).

6.6. Producción y calidad del fruto

En la presente investigación, la disminución de las relaciones hídricas, del intercambio de gases y del crecimiento vegetativo por efectos de los tratamientos RDI-41 y RDI-34 influyeron de manera significativa en el peso y tamaño del fruto; sin embargo, no en el número de frutos.

Los tratamientos RDI-41 y RDI-34 causaron la disminución del peso de fruto por planta en un 24 y 7, respectivamente, comparado con el alcanzado en las plantas testigo. Resultados reportados por Manjunath *et al.* (2017), Silveira *et al.* (2020) y Morianou *et al.* (2021) en los cultivos de papaya, naranja y pomelo, indicaron que el riego deficitario disminuyó el rendimiento de fruta en un 49, 6 y 13 %, respectivamente, comparados con tratamientos testigo; las diferencias de porcentajes reportados, se debe a los diferentes grados de déficit que se estudiaron en los trabajos antes indicados. Caso contrario, el rendimiento en vid no se vio afectado por el déficit de riego, esto se debe a su moderada resistencia a la sequía (Caruso *et al.*, 2022).

En el presente trabajo de investigación, como se mencionó anteriormente, las plantas de los tratamientos RDI-41 y RDI-34, disminuyeron los kg pl⁻¹ tan solo en un 7 % comparado con el testigo, no obstante que los frutos de este tratamiento presentaron un menor tamaño (longitud y diámetro), probablemente esto se deba a que el estrés hídrico aumentó la asimilación de CO₂, combinado con una mayor eficiencia de uso de agua que seguramente incrementó concentración de biomasa en la fruta (Rahmati *et al.*, 2015).

La aplicación del déficit hídrico en una etapa crítica como la del crecimiento rápido de la fruta, puede provocar un menor crecimiento, en cambio, si el déficit hídrico aplicado es moderado, en etapas como floración y cuajado del fruto, no tiene repercusiones en el rendimiento; sin embargo, el nivel de impacto en el rendimiento, siempre será determinado por la especie en estudio (Domingo *et al.*, 1996).

El efecto del déficit hídrico en el rendimiento, dependerá también de la etapa fenológica, duración y nivel del déficit hídrico, estrategia de riego, y, condición ambiental;

si esto se conoce, podemos obtener una gran cantidad de beneficios, ya sea en rendimiento o bien en la calidad de la fruta, y, caso contrario, el no conocerlos, nos puede perjudicar (Galindo *et al.*, 2018). Rahmati *et al.* (2015), señalaron lo antes indicado, y que el nivel del déficit hídrico tendrá un impacto en diferente proporción, reportan una reducción del peso fresco de la fruta en un 15 y 19 % para las estrategias de riego de un estrés moderado (60 L semana⁻¹) y un estrés severo (30 L semana⁻¹).

Por otra parte, la calidad poscosecha de la fruta en el presente trabajo de investigación, no presentó diferencias significativas entre tratamientos de riego, aunque hay una marcada tendencia de la mejora de la calidad del fruto con los tratamientos RDI-41 y RDI-34 (Figura 22-25).

Mirafuentes y Santamaría (2014) reportaron que, para el híbrido MSXJ de papaya, utilizado en el presente trabajo de investigación, en condiciones de riego convencional, tiene un peso promedio de fruto de 1.5 kg, el número de frutos por planta es de 36, el rendimiento por planta es de 56.5 kg, con una longitud de 27 cm y un diámetro de 11.5 cm. En cuanto a calidad poscosecha, la fruta tiene una firmeza de 10 N y un contenido de sólidos solubles totales de 10.5 °Brix. En el presente trabajo de investigación, los valores promedios obtenidos para las variables antes mencionadas fueron de 0.82 kg, 34.39, 27.5 kg, 19.75 cm, 10.59 cm, 2.25 N y 5.10, respectivamente. Estos valores difieren con lo obtenido por Mirafuentes y Santamaría, ya que la condición de disponibilidad de agua no fue limitada como en el presente trabajo, además que en esta investigación se realizó en condiciones de maceta (con arena) y bajo casa sombra.

Resultados presentados por Castricini *et al.* (2019) en papaya, difieren con los obtenidos en el presente trabajo, ya que estos autores reportan que a medida que la disponibilidad del agua en el suelo baja, la firmeza aumentó, al igual los SST, de manera significativa; del mismo modo, Durán-Zuazo *et al.* (2011) en el cultivo de mango, con una estrategia de déficit de riego sostenido, reportaron una mayor concentración de SST, comparada con árboles con buena disponibilidad de agua (sin estrés hídrico).

Galindo *et al.* (2018) indicaron que la estrategia de riego deficitario debe ser aceptada por los productores, considerando cultivar plantas de importancia económica y

agronómica, aunque al emplear esta estrategia de riego tendrán una reducción en su producción, pero obtendrán fruta con mayor concentración de compuestos bioactivos.

Por último, Horner (1990) reportó un modelo que predice el contenido de compuestos fenólicos en función a la disponibilidad del agua en el suelo, toda vez que, cuando el estrés hídrico es severo (hay cierre estomático, y la asimilación de carbono baja), el carbono se destina a la síntesis de metabolitos primarios, que no prevalecen en la solución utilizada para el crecimiento del frutos.

VII. CONCLUSIONES

Los tratamientos de déficit de riego modificaron las relaciones hídricas de las plantas de papaya; provocaron variaciones en el potencial hídrico de la hoja, osmótico, de turgencia y prolina, y redujeron parcialmente el intercambio de gases (asimilación de CO₂ y transpiración), dada la disminución de conductancia estomática, aunque, la eficiencia en el uso de agua aumentó.

Los déficits de riego aplicados (RDI-41 y RDI-34) a las plantas de papaya disminuyeron el crecimiento vegetativo, en particular, longitud y diámetro del peciolo, área foliar y diámetro del tallo; en tanto, no afectaron significativamente el rendimiento y el número de frutos por planta.

Con los tratamientos de riego deficitario regulado se logró maximizar la productividad del agua, lográndose la reducción de la huella hídrica azul de 54.80 L de agua kg de fruto⁻¹ (en el tratamiento testigo), a 29 L de agua kg de fruto⁻¹ (tratamiento RDI-41¹) y 20.13 L de agua kg de fruto⁻¹ (tratamiento RDI-34¹).

En poscosecha, no se observaron cambios significativos en las variables de sólidos solubles totales (°Brix), acidez titulable y firmeza de frutos.

VIII. LITERATURA CITADA

- Agriculture Victoria. 2019. Plant-based sensors for irrigation management. https://agriculture.vic.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/577022/Plant-based-sensors-for-irrigation.pdf. (Recuperado: septiembre 2021).
- Alghory A, Yazar A. 2018. Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. *Irrigation Science* 37: 61–77. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0603-y>
- Allan AC, Fricker MD, Ward JL, Beale MH, Trewavas AJ. 1994. Two Transduction Pathways Mediate Rapid Effects of Abscisic Acid in Commelina Guard Cells. *The Plant Cell* 6 (9): 1319–1328. <https://doi.org/10.1105/tpc.6.9.1319>
- Almeida FT, Bernardo S, Sousa EF, Marin SL, Grippa S. 2003. Growth and yield of papaya under irrigation. *Scientia Agricola* 60 (3): 419-424.
- Alvarez ME, Savouré A, Szabados L. 2022. Proline metabolism as regulatory hub. *Trends in Plant Science* 27 (1): 39–55. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.07.009>
- Álvarez-Méndez SJ, Urbano-Gálvez A, Mahouachi J. 2022. Mitigation of salt stress damages in *Carica papaya* L. seedlings through exogenous pretreatments of gibberellic acid and proline. *Chilean Journal of Agricultural Research* 82 (1): 167–176. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392022000100167>
- Amoozegar A, Martin KC, Hoover MT. 1989. Effect of access hole properties on soil water content determination by neutron thermalization. *Soil Science Society of America Journal* 53 (2): 330–335. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300020003x>
- Antunes-Carvalho F, Renner SS. 2012. A dated phylogeny of the papaya family (Caricaceae) reveals the crop's closest relatives and the family's biogeographic history. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 65 (1): 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2012.05.019>
- Atkinson C, Harrison-Murray R, Taylor J. 2008. Rapid flood-induced stomatal closure accompanies xylem sap transportation of root-derived acetaldehyde and ethanol in *Forsythia*. *Environmental and Experimental Botany* 64 (2): 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.02.001>
- Azcón-Bieto J., Talón M. 2008. *Fundamentos de fisiología vegetal*: McGraw-Hill Education. España. 651 p.
- Rodríguez EV. 2001. *Fisiología de la Producción de Los Cultivos Tropicales*. Alianza Editorial. Costa Rica

- Bashir MA, Silvestri C, Ahmad T, Hafiz IA, Abbasi NA, Manzoor A, Rugini E. 2020. Osmotin: A Cationic Protein Leads to Improve Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants. *Plants* 9 (8): 992. <https://doi.org/10.3390%2Fplants9080992>
- Basso B, Ritchie J. 2018. Evapotranspiration in High-Yielding maize and under increased vapor pressure deficit in the US midwest. *Agricultural Environmental Letters* 30 (1): 170039. <https://doi.org/10.2134/ael2017.11.0039>
- Bates LM, Hall AE. 1981. Stomatal closure with soil water depletion not associated with changes in Bulk leaf water status. *Oecologia* 50 (1): 62–65. <https://doi.org/10.1007/bf00378794>
- Bates LM, Hall AE. 1982. Diurnal and seasonal responses of stomatal conductance for cowpea plants subjected to different levels of environmental drought. *Oecologia* 54 (3): 304–308. <https://doi.org/10.1007/bf00379997>
- Bates LS, Waldren RP, Teare ID. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39 (1): 205–207. <https://doi.org/10.1007/bf00018060>
- Behboudian M, Lawes G, Griffiths K. 1994. The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (*Pyrus serotina* Rehd.). *Scientia Horticulturae* 60 (1–2): 89–99. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90064-7)
- Bharath P, Gahir S, Raghavendra AS. 2021. Abscisic Acid-Induced Stomatal Closure: An Important Component of Plant Defense Against Abiotic and Biotic Stress. *Frontiers in Plant Science* 12: 615114. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.615114>
- Blatt MR, Grabov A. 1997. Signalling gates in abscisic acid-mediated control of guard cell ion channels. *Physiologia Plantarum* 100 (3): 481–490. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb03052.x>
- Blaya-Ros PJ, Blanco V, Torres-Sánchez R, Domingo R. 2021. Drought-Adaptive Mechanisms of Young Sweet Cherry Trees in Response to Withholding and Resuming Irrigation Cycles. *Agronomy* 11 (9): 1812. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091812>
- Boland A, Jerie P, Mitchell P, Irvine J, Nardella N. 1996. The effect of a saline and non-saline water table on peach tree water use, growth, productivity and ion uptake. *Australian Journal of Agricultural Research* 47 (1): 121. <https://doi.org/10.1071/ar9960121>
- Boyer JS. 1968. Relationship of Water Potential to Growth of Leaves. *Plant Physiology* 43 (7): 1056–1062. <https://doi.org/10.1104/pp.43.7.1056>
- Brauman KA, Richter BD, Postel S, Malsy M, Flörke M. 2016. Water depletion: An improved metric for incorporating seasonal and dry-year water scarcity into water risk assessments. *Elementa: Science of the Anthropocene* 4: 000083. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000083>

- Brodribb TJ. 2009. Xylem hydraulic physiology: The functional backbone of terrestrial plant productivity. *Plant Science* 177 (4): 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.06.001>
- Campostrini E, Glenn DM. 2007. Ecophysiology of papaya: A review. *Brazilian Journal Plant Physiology* 19 (4): 413–424. <https://www.scielo.br/j/bjpp/a/c7H43PJ8t6p5fS8jZZgRmVC/?format=pdf&lang=en>
- Carbonell-Barrachina NA, Memmi H, Noguera-Artiaga L, Gijón-López MDC, Ciapa R, Pérez-López D. 2014. Quality attributes of pistachio nuts as affected by rootstock and deficit irrigation. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95 (14): 2866–2873. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7027>
- Cardona-Ayala C, Araméndiz Tatis H, Barrera-Causil C. 2009. Estimation of papaya (*Carica papaya* L.) leaf area based on non-destructive sampling. *Actualidad & Divulgación Científica* 12 (1): 131-139.
- Carr MKV. 2013. The water relations and irrigation requirements of papaya (*Carica papaya* L.): A review. *Experimental Agriculture* 50 (2): 270–283. <https://doi.org/10.1017/s0014479713000380>
- Clemente HS, Marler TE. 1996. Drought Stress Influences Gas-exchange Responses of Papaya Leaves to Rapid Changes in Irradiance. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(2):292-295. <https://doi.org/10.21273/jashs.121.2.292>
- Carraro E, Di Iorio A. 2022. Eligible strategies of drought response to improve drought resistance in woody crops: a mini-review. *Plant Biotechnology Reports* 16: 265-282. <https://doi.org/10.1007/s11816-021-00733-x>
- Caruso G, Palai G, Gucci R, D’Onofrio C. 2022. The effect of regulated deficit irrigation on growth, yield, and berry quality of grapevines (cv. Sangiovese) grafted on rootstocks with different resistance to water deficit. *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00773-3>
- Carvalho LMD, Araújo SBD, Carvalho HWLD, Girardi EA, Soares-Filho WDS. 2020. Leaf proline accumulation and fruit yield of ‘Pera’ sweet orange trees under natural water stress. *Bragantia* 80. e1121. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200349>
- Castel J, Buj A. 1990. Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. *Irrigation Science* 11 (2): <https://doi.org/10.1007/bf00188448>
- Castricini A, Oliveira PMD, Martineli M, Coelho E F, Rodrigues M G V. 2019. Quality of ‘Tainung 1’ papaya produced by partial root zone drying. *Revista Brasileira de Fruticultura* 41 (5). <https://doi.org/10.1590/0100-29452019092>
- Chai Q, Gan Y, Zhao C, Xu HL, Waskom RM, Niu, Siddique K H M. 2015. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36 (3). <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>

- Chávez-Pesqueira M, Núñez-Farfán J. 2017. Domestication and genetics of papaya: A review. *Frontiers in Ecology and evolution* 5:155. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00155>
- Colunga-GarcíaMarín P, Zizumbo-Villareal D. 2004. Domestication of plants in Maya lowlands. *Economic Botany* 58: S101-S110. [https://doi.org/10.1663/00130001\(2004\)058\[0005: USATEO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/00130001(2004)058[0005: USATEO]2.0.CO;2)
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). Estadísticas del agua en México. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf. (Recuperado marzo 2022).
- Costa JM, Ortuño MF, Chaves MM. 2007. Deficit irrigation as a strategy to save water: Physiology and potential application to horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology* 49 (10): 1421–1434. <https://doi.org/10.1111/j.1672-9072.2007.00556.x>
- Daszkowska-Golec A, Szarejko I. 2013. Open or close the gate – stomata action under the control of phytohormones in drought stress conditions. *Frontiers in Plant Science* 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00138>
- Davies WJ, Kudoyarova G, Hartung W. 2005. Long-distance ABA Signaling and Its Relation to Other Signaling Pathways in the Detection of Soil Drying and the Mediation of the Plant's Response to Drought. *Journal of Plant Growth Regulation* 24: 285-295. <https://doi.org/10.1007/s00344-005-0103-1>
- Davies WJ, Zhang J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 42 (1): 55–76. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.42.060191.000415>
- Davis JG, Quick JS. 1998. Nutrient management, cultivar development and selection strategies to optimize water use efficiency. *Journal of Crop Production* 1 (2): 221–240. https://doi.org/10.1300/j144v01n02_09
- De los Santos F, Becerra E, Mosqueda A, Vargas B. 1997. Manual de producción de papaya en el Estado de Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Centro de Investigación Regional Golfo Centro, Campo Experimental Cotaxtla 86 p.
- de Sousa A, AbdElgawad H, Fidalgo F, Teixeira J, Matos M, Hamed BA, Selim S, Hozzein WN, Beemster GTS, Asard H. 2020. AI exposure increases proline levels by different pathways in an AI-sensitive and an AI-tolerant rye genotype. *Scientific Reports* 10: 16401. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73358-9>
- Dodds P, Taylor J, Else M, Atkinson C, Davies W. 2007. Partial rootzone drying increases antioxidant activity in strawberries. *Acta Horticulturae*, 744(744), 295–302. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2007.744.30>

- Dolan F, Lamontagne J, Link R, Hejazi M, Reed P, Edmonds J. 2021. Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world. *Nature Communications* 12 (1): 1915. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22194-0>
- Domingo R, Ruiz-Sánchez MC, Sánchez-Blanco MJ, Torrecillas A. 1996. Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. *Irrigation Science* 16 (3): 115–123. <https://doi.org/10.1007/bf02215619>
- Durán-Zuazo V H, Pleguezuelo CRR, Tarifa DF. 2011. Impact of sustained-deficit irrigation on tree growth, mineral nutrition, fruit yield and quality of mango in Spain. *Fruits* 66 (4): 257–268. <https://doi.org/10.1051/fruits/2011038>
- Elder AN, Rasmussen TC. 1994. Neutron Probe Calibration in Unsaturated Tuff. *Soil Science Society of America Journal*, 58 (5): 1301–1307. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050004x>
- Else MA. 2006. Anti-transpirant activity in xylem sap from flooded tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants is not due to pH-mediated redistributions of root- or shoot-sourced ABA. *Journal of Experimental Botany*, 57 (12): 3349–3357. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl099>
- Eurostat Statistics Explained. (28 de septiembre de 2021). Estadísticas de agua. Unión Europea. Recuperado el 28 de septiembre de 2021. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Water_statistics
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2011. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. <https://www.fao.org/3/i1688s/i1688s.pdf>. (Recuperado enero 2022).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Valor de la producción agrícola. Roma. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> (Marzo 2022).
- Fereres E, Amry B, Faci J, Kamgar A, Henderson D, Resende M. 1978. A closer look at deficit high-frequency irrigation. *California Agriculture* 32 (8): 4-5.
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. 2021. Agua en el planeta. <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>. (Recuperado el 30 de septiembre de 2021)
- Galindo A, Collado-González J, Griñán I, Corell M, Centeno A, Martín-Palomo M, Girón I, Rodríguez P, Cruz Z, Memmi H, Carbonell-Barrachina A, Hernández F, Torrecillas A, Moriana A, Pérez-López D. 2018. Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. *Agricultural Water Management* 202:311–324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.015>

- Gelly M, Recasens, I, Girona J, Mata M, Arbones A, Rufat J, Marsal J. 2004. Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84(6): 561–568. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1686>
- Gerten D, Heck V, Jägermeyr J, Bodirsky BL, Fetzer I, Jalava M, Kummu M, Lucht W, Rockström J, Schaphoff S, Schellnhuber HJ. 2020. Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sustainability* 3 (3): 200–208. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0465-1>
- Ghaffari H, Tadayon MR, Bahador M, Razmjoo J. 2021. Investigation of the proline role in controlling traits related to sugar and root yield of sugar beet under water deficit conditions. *Agricultural Water Management* 243:106448. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106448>
- Ghobadi M, Bakhshandeh M, Fathi G, Gharineh M H, Alami-Said K, Naderi A, Ghobadi ME. 2006. Short and Long Periods of Water Stress During Different Growth Stages of Canola (*Brassica napus* L.): Effect on Yield, Yield Components, Seed Oil and Protein Contents. *Journal of Agronomy* 5 (2): 336–341. <https://doi.org/10.3923/ja.2006.336.341>
- Giménez C, Gallardo M, Thompson R. 2013. Plant–Water Relations. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.05257-x>
- Gollan T, Schurr U, Schulze E D. 1992. Stomatal response to drying soil in relation to changes in the xylem sap composition of *Helianthus annuus*. I. The concentration of cations, anions, amino acids in, and pH of, the xylem sap. *Plant, Cell and Environment* 15 (5): 551–559. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb01488.x>
- Goodwin I, Boland AM. 2002. Scheduling deficit irrigation of fruit trees for optimizing water use efficiency. In *Deficit irrigation practices*.
- González GA, Tellez LIT, Merino FCG. 2016. *Nutrición de cultivos*. Colegio de Posgraduados.
- Greb BW. 1966. Effect of Surface-Applied wheat straw on soil water losses by solar distillation. *Soil Science Society of America Journal* 30 (6): 786–788. <https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000060035x>
- Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, Van Otterdijk R, Meybeck A. 2011. Pérdidas y desperdicio de alimentos a nivel mundial. https://www.madr.ro/docs/ind-alimentara/risipa_alimentara/presentation_food_waste.pdf (Recuperado enero 2022).
- Hamdy A, Ragab R, Scarascia-Mugnozza, E. 2003. Coping with water scarcity: Water saving and increasing water productivity. *Irrigation and drainage*, 52, 3–20. <https://doi.org/10.1002/ird.73>

- Hamid-Ahmadi S, Andersen MN, Plauborg F, Poulsen RT, Jensen CR, Reza Sepaskhan A, Hansen S. 2010. Effects of irrigation strategies and soils on field-grown potatoes: Gas exchange and xylem [ABA]. *Agricultural Water Management*, 97:486–494. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.002>
- Hartung, W., & Radin, W. (1989). Abscisic acid in the mesophyll apoplast and in the root xylem sap of water-stressed plants: the significance of pH gradients. In *Current topics in plant biochemistry and physiology: Proceedings of the Plant Biochemistry and Physiology Symposium held at the University of Missouri, Columbia*.
- Hatfield JL, Dold C. 2019. Water-Use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science* 10:103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Hatfield JL. 2011. Soil Management for Increasing Water Use Efficiency in Field Crops under Changing Climates. *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture*, 161–173. <https://doi.org/10.2136/2011.soilmanagement.c10>
- Höfler K. 1920. Ein Schema für die osmotische Leistung der Pflanzenzelle. *Ber. d. d. Bot. Ges.*, 38: 288-298.
- Horner JD. 1990. Nonlinear effects of water deficits on foliar tannin concentration. *Biochemical Systematics and Ecology* 18 (4): 211–213. [https://doi.org/10.1016/0305-1978\(90\)90062-k](https://doi.org/10.1016/0305-1978(90)90062-k)
- Hsiao TC. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology* 24 (1): 519–570. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.002511>
- Hutton R, Loveys B. 2011. A partial root zone drying irrigation strategy for citrus—Effects on water use efficiency and fruit characteristics. *Agricultural Water Management* 98 (10): 1485–1496. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.04.010>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía.Geografía y Medio Ambiente. <https://www.inegi.org.mx/temas/>) (Recuperado Septiembre 2022).
- Jeyakumar P, Kavino M, Kumar N, Soorianathasundaram K. 2007. Physiological performance of papaya cultivars under abiotic stress conditions. *Acta Horticulturae* 740: 209–215. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2007.740.25>
- Jayawardane N, Meyer W, Barrs, H. 1984. Moisture measurement in a swelling clay soil using neutron moisture meters. *Soil Research* 22(2):109. <https://doi.org/10.1071/sr9840109>
- Jia K, Zhang Q, Xing Y, Yan J, Liu L, Nie K. 2020. A Development-Associated decrease in osmotic potential contributes to fruit ripening initiation in strawberry (*Fragaria ananassa*). *Frontiers in Plant Science*, 11:1035. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01035>
- Johnson WC, Davis RG. 1972. Research on stubble-mulch farming on winter wheat. *USDA-ARS Conserv. Res. Rep.* 16.

- Jones H G. 1980. Interaction and integration of adaptive responses to water stress: the implications of an unpredictable environment. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. Eds. NC. Turner and PJ. Kramer. Wiley, New York, 353-365.
- Jones H, Tardieu F. 1997. Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74 (1–2): 21–46. [https://doi.org/10.1016/s0304-4238\(98\)00081-8](https://doi.org/10.1016/s0304-4238(98)00081-8)
- Kaman H, Kirda C, Cetin M, Topcu S. 2006. Salt accumulation in the root zones of tomato and cotton irrigated with partial root-drying technique. *Irrigation and Drainage* 55 (5): 533–544. <https://doi.org/10.1002/ird.276>
- Kang S, Zhang J. 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Journal of Experimental Botany* 55 (407): 2437–2446. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh249>
- Karanja JK, Aslam MM, Qian Z, Yankey R, Dodd IC, Weifeng X. 2021. Abscisic Acid Mediates Drought-Enhanced Rhizosheath Formation in Tomato. *Frontiers in Plant Science*, 12: 658787. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.658787>
- Kirda C, Topcu S, Kaman H, Ulger A, Yazici, A, Cetin M, Derici M. 2005. Grain yield response and N-fertiliser recovery of maize under deficit irrigation. *Field Crops Research* 93 (2–3): 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.09.015>
- Kreuzwieser J, Gessler A. 2010. Global climate change and tree nutrition: influence of water availability. *Tree Physiology* 30 (9): 1221–1234. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq055>
- Kudoyarova GR, Dodd IC, Veselov DS, Rothwell SA, Yu-Veselov S. 2015. Common and specific responses to availability of mineral nutrients and water. *Journal of Experimental Botany* 66(8): 2133–2144. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv017>
- Kummu M, Guillaume JHA, de Moel H, Eisner S, Flörke M, Porkka M, Siebert S Veldkamp, T. I. E., & Ward, P. J. (2016). The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep38495>
- Lehr P, Hernández-Montes E, Ludwig-Müller J, Keller M, Zörb C. 2021. Abscisic acid and proline are not equivalent markers for heat, drought and combined stress in grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 28 (1): 119–130. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12523>
- Leung J, Giraudat J. 1998. Abscisic acid signal transduction. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 49 (1): 199–222. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.199>

- Li J, Smith DW, Fityus SG. 2003. The effect of a gap between the access tube and the soil during neutron probe measurements. *Soil Research* 41 (1): 151-164. <https://doi.org/10.1071/sr02054>
- Li Y, Li H, Li Y, Zhang S. 2017. Improving water-use efficiency by decreasing stomatal conductance and transpiration rate to maintain higher ear photosynthetic rate in drought-resistant wheat. *The Crop Journal* 5 (3): 231-239. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.01.001>
- Liao Q, Ding R, Du T, Kang S, Tong L, Li S. 2022. Stomatal conductance drives variations of yield and water use of maize under water and nitrogen stress. *Agricultural Water Management* 268:107651. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107651>
- Lima RSN, de Assis-Figueiredo FAM, Martins AO, da Silva-De Deus B. C, Ferraz TM, de Menezes-De Assis Gomes M, Fernandez-De Sousa E, Glenn DM, Campostrini E. 2015. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya. *Scientia Horticulturae* 183:13-22. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.005>
- Lima RSN, García-Tejero I, Lopes TS, Costa JM, Vaz M, Durán-Zuazo VH, Chaves M, Glenn DM, Campostrini E. 2016. Linking thermal imaging to physiological indicators in *Carica papaya* L. under different watering regimes. *Agricultural Water Management* 164: 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.017>
- Liu X, Liu W, Tang Q, Liu B, Wada Y, Yang H. 2022. Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. *Earth's Future* 10 (4): e2021EF002567. <https://doi.org/10.1029/2021ef002567>
- Loveys BR, Dry PR, Stoll M., & Mc Carthy, M. G. (2000). Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. *Acta Hort* 537: 187-197. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.537.19>
- Loveys BR, Stoll M, Davies WJ. 2004. Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting of plant signalling in novel irrigation practice. *Water use efficiency in plant biology*. 327 p.
- Luo Y, Li W, Huang C, Yang J, Jin M, Chen J, Pang D, Chang Y, Li Y, Wang Z. 2021. Exogenous abscisic acid coordinating leaf senescence and transport of assimilates into wheat grains under drought stress by regulating hormones homeostasis. *The Crop Journal* 9 (4): 901-914. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.08.012>
- Manjunath BL, Laxman RH, Upreti KK, Raghupathi HB. 2017. Partial root zone drying irrigation in papaya (*Carica papaya* L.) for enhanced water use efficiency under limited water situations. *Journal Horticultural Sci*, 12(2): 143-149. <https://krishi.icar.gov.in/jspui/bitstream/123456789/17601/1/DECEMBER%3d2017.pdf>

- Medrano H, Tomás M, Martorell S, Flexas J, Hernández E, Rosselló J, Pou A, Escalona JM, Bota J. 2015. From leaf to whole-plant water use efficiency (WUE) in complex canopies: Limitations of leaf WUE as a selection target. *The Crop Journal* 3 (3): 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.04.002>
- Medrano-Gil H, Bota-Salort J, Cifre-Llompart J, Flexas-Sans J, Ribas-Carbó M, Gulías-León J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas* 43 :63. <https://doi.org/10.14198/ingeo2007.43.04>
- Mellado-Vázquez A, Volke-Haller V, Tapia-Vargas M, Sánchez-García P. 2005. Response of papaya to irrigation and N-P-K fertilization in a vertisol. *TERRA Latinoamericana* 23: 137–144. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311093004.pdf>
- Minoletti ML, Boerner REJ. 1994. Drought and site fertility effects on foliar nitrogen and phosphorus dynamics and nutrient resorption by the forest understory shrub *Viburnum acerifolium* L. *American Midland Naturalist* 131(1): 109–119. <https://doi.org/10.2307/2426613>
- Mirafuentes HF, Santamaria BF. 2014. MSXJ, híbrido de papaya sin carpeloidía para el sureste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7:1297-1301.
- Morianou G, Ziogas V, Kourgialas NN, Karatzas G. P. 2021. Effect of irrigation practices upon yield and fruit quality of four grapefruit (*Citrus paradisi* Mac.) cultivars. *Water Supply* 21 (6): 2735–2747. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.113>
- Morton JF. 1987. *Fruits of warm climates*. Creative Resource Systems Inc. Miami, Florida.
- O’Leary JW. 1970. Can there be a positive water potential in plants? *BioScience* 20 (15): 858–859. <https://doi.org/10.2307/1295495>
- Orcutt DM, Nilsen ET. 2000. *Physiology of Plants Under Stress*. Wiley. Estados Unidos. 696 p.
- Ortega-Farias S, Villalobos-Soublett E, Riveros-Burgos C, Zúñiga M, Ahumada-Orellana LE. 2020. Effect of irrigation cut-off strategies on yield, water productivity and gas exchange in a drip-irrigated hazelnut (*Corylus avellana* L. cv. Tonda di Giffoni) orchard under semiarid conditions. *Agricultural Water Management* 238: 106173. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106173>
- Ozturk M, Turkyilmaz-Unal B, García-Caparrós P, Khursheed A, Gul A, Hasanuzzaman M. 2020. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiologia Plantarum* 172 (2): 1321–1335. <https://doi.org/10.1111/ppl.13297>
- Pardo J, Martínez-Romero A, Léllis B, Tarjuelo J, Domínguez A. 2020. Effect of the optimized regulated deficit irrigation methodology on water use in barley under semiarid conditions. *Agricultural Water Management* 228: 105925. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105925>

- Parkash V, Singh S, Deb SK, Ritchie GL, Wallace RW. 2021. Effect of deficit irrigation on physiology, plant growth, and fruit yield of cucumber cultivars. *Plant Stress* 1:100004. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100004>
- Passioura JB. 1980. The meaning of matric potential. *Journal of Experimental Botany* 31 (4): 1161–1169. <https://doi.org/10.1093/jxb/31.4.1161>
- Paull RE, Duarte O. 2011. Papaya. En *Tropical fruits* (2.^a ed., pp. 291–326). CABI. <http://www.frutvasf.univasf.edu.br/images/tropicalfruits.pdf>
- Per TS, Khan NA, Reddy PS, Masood A, Hasanuzzaman M, Khan MIR, Anjum NA. 2017. Approaches in modulating proline metabolism in plants for salt and drought stress tolerance: Phytohormones, mineral nutrients and transgenics. *Plant Physiology and Biochemistry* 115: 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.018>
- Peuke AD, Jeschke WD, Hartung W. 1994. The uptake and flow of C, N and ions between roots and shoots in *Ricinus communis*L. III. long-distance transport of abscisic acid depending on nitrogen nutrition and salt stress. *Journal of Experimental Botany* 45 (6): 741–747. <https://doi.org/10.1093/jxb/45.6.741>
- Pinheiro C, Chaves MM. 2011. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? *Journal of Experimental Botany* 62 (3): 869–882. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq340>
- Planes MD, Niños R, Rubio L, Bissoli G, Bueso E, García-Sánchez MJ, Alejandro S, Gonzalez-Guzmán M, Hedrich R, Rodriguez PL, Fernández JA, Serrano R. (2014). A mechanism of growth inhibition by abscisic acid in germinating seeds of *Arabidopsis thaliana* based on inhibition of plasma membrane H⁺-ATPase and decreased cytosolic pH, K⁺, and anions. *Journal of Experimental Botany* 66 (3): 813–825. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru442>
- Puglisi N, Vanella P, Stagno S, Roccuzzo C, Baglieri. 2019. Physiological and biochemical responses of orange trees to different deficit irrigation regimes. *Plants* 8 (10): 423. <https://doi.org/10.3390/plants8100423>
- Rahmati M, Davarynejad GH, Génard M, Bannayan M, Azizi M, Vercambre G. 2015. Peach Water Relations, Gas Exchange, Growth and Shoot Mortality under Water Deficit in Semi-Arid Weather Conditions. *PLOS ONE* 10 (4): e0120246. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120246>
- Raja, V, Qadir SU, Alyemeni MN. 2020. Impact of drought and heat stress individually and in combination on physio-biochemical parameters, antioxidant responses, and gene expression in *Solanum lycopersicum*. *3 Biotech* 10: 208. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02206-4>
- Raschke K. 1987. Action of abscisic acid on guard cells. *Stomatal function* 11: 253-279.

- Roelfsema MRG, Hedrich R. 2005. In the light of stomatal opening: New insights into 'The watergate'. *New Phytologist* 167(3): 665–691. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01460.x>
- Romero P, Gil-Muñoz R, del Amor FM, Valdés E, Fernández JI, Martínez-Cutillas, A. 2013. Regulated Deficit Irrigation based upon optimum water status improves phenolic composition in Monastrell grapes and wines. *Agricultural Water Management* 121: 85–101. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.01.007>
- Romero P, Navarro JM, Garcia F, Ordaz PB. 2004. Effects of regulated deficit irrigation during the pre-harvest period on gas exchange, leaf development and crop yield of mature almond trees. *Tree Physiology*, 24 (3): 303–312. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.3.303>
- Rowland L, da Costa ACL, Galbraith DR, Oliveira RS, Binks OJ, Oliveira AAR, Pullen AM, Doughty CE, Metcalfe DB, Vasconcelos SS, Ferreira LV, Malhi Y, Grace J, Mencuccini M, Meir P. 2015. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature* 528 (7580): 119–122. <https://doi.org/10.1038/nature15539>
- Samson J. 1986. *Tropical fruits*. Langman Scientific and Technical. New York.
- Santana J, Sousa M, Rodriguez M, Suarez C. 2008. Response of the papaya (*Carica papaya* L.) plant to deficit irrigation in the Canary Islands. *Acta Horticulturae*, 79:559–565. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2008.792.65>
- Santos DL, Coelho EF, Cunha FFD, Donato SLR, Bernado WDP, Rodrigues WP, Campostrini E. 2021a. Partial root-zone drying in field-grown papaya: Gas exchange, yield, and water use efficiency. *Agricultural Water Management* 243:106421. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106421>
- Santos DL, Ferreira Coelho E, de Oliveira RA, Filgueiras R, da Silva Alves M, Pereira-Rodrigues W, Campostrini E, Rodrigues-Sampaio AH, da Silva-Reis, JBR, da Cunha FF. 2021b. Impact of soil water regimes and partial root-zone drying in field-grown papaya in semi-arid conditions. *Scientific Reports* 11: 10638. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90078-w>
- Scalisi A, O'Connell MG, Stefanelli D, lo Bianco R. 2019. Fruit and Leaf Sensing for Continuous Detection of Nectarine Water Status. *Frontiers in Plant Science* 10:805. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00805>
- Schmeier S. (20 de marzo de 2022). [Entrevistado por N. M. Neil King]. <https://p.dw.com/p/492Hb>
- SEMARNAT. 2020. Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Diario Oficial de la Federación. Recuperado el 15 de marzo de 2022. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020.

- Shao HB, Chu LY, Jaleel CA, Zhao CX. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies* 331(3): 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.01.002>
- Siakou M, Bruggeman A, Eliades M, Zoumides C, Djuma H, Kyriacou M., Emmanouilidou M, Spyros A, Manolopoulou E, Moriana A. 2021. Effects of deficit irrigation on 'Koroneiki' olive tree growth, physiology and olive oil quality at different harvest dates. *Agricultural Water Management* 258: 107200. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107200>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la producción agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>). (Recuperado Septiembre 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. Geografía y Medio Ambiente. <https://www.inegi.org.mx/temas/>) (Recuperado Septiembre 2022).
- da Silva JGF da, Ferreira PA, Costa LC, Melendes RRV. 2001. Effects of different depths and frequencies of irrigation on the productivity of pawpaw (*Carica papaya*). *Brazilian Journal of Fruit Growing* 23 (3): 597-601 <https://eurekamag.com/research/003/740/003740724.php>
- Silva JRD, Boaretto RM, Lavorenti JAL, dos Santos BCF, Coletta-Filho HD, Mattos D. 2021. Effects of Deficit Irrigation and Huanglongbing on Sweet Orange Trees. *Frontiers in Plant Science* 12: 731314 <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.731314>
- Silveira LK, Pavão GC, dos Santos Dias CT, Quaggio JA, Pires RCDM. 2020. Deficit irrigation effect on fruit yield, quality and water use efficiency: A long-term study on Pêra-IAC sweet orange. *Agricultural Water Management* 231: 106019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106019>
- Sobeih WY. 2004. Long-distance signals regulating stomatal conductance and leaf growth in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants subjected to partial root-zone drying. *Journal of Experimental Botany* 55 (407): 2353–2363. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh204>
- Stoll M, Loveys B, Dry P. 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* 51 (350): 1627–1634. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1627>
- Sun Y, Wang C, Chen HYH, Ruan H. 2020. Response of Plants to Water Stress: A Meta-Analysis. *Frontiers in Plant Science*, 11: 978. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00978>
- Taiz L, Zeiger E. 2006. *Plant Physiology* Sinauer Associates Inc. Sunderland. 690 p.
- The World Bank. *Water in Agriculture*. The World Bank Group. 2015. <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture#1>. (Recuperado marzo 2022).

- Topp G, Zegelin S, White I. 2000. Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils. *Soil Science Society of American Journal* 64 (4): 1244–1252. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441244x>
- Trouverie J, Thévenot C, Rocher J, Sotta B, Prioul J. 2003. The role of abscisic acid in the response of a specific vacuolar invertase to water stress in the adult maize leaf. *Journal of Experimental Botany* 54 (390): 2177–2186. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg234>
- Turner NC. 2016. Turgor maintenance by osmotic adjustment, an adaptive mechanism for coping with plant water deficits. *Plant, Cell & Environment*, 40 (1): 1–3. <https://doi.org/10.1111/pce.12839>
- Tuteja N. 2007. Abscisic acid and abiotic stress signaling. *Plant Signaling & Behavior* 2 (3): 135–138. <https://doi.org/10.4161/psb.2.3.4156>
- Ullah I, Mao H, Rasool G, Gao H, Javed Q, Sarwar A, Khan MI. 2021. Effect of deficit irrigation and reduced N fertilization on plant growth, root morphology and water use efficiency of tomato grown in soilless culture. *Agronomy* 11 (2): 228. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020228>
- Ünlü M, Kanber R, Şenyigit U, Onaran H, Diker K. 2006. Trickle and sprinkler irrigation of potato (*solanum tuberosum* L.) in the middle anatolian region in turkey. *Agricultural Water Management* 79 (1): 43–71. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.02.004>
- Valladares F, Vilagrosa A., Peñuelas J, Ogaya R, Camarero JJ, Corcuera L, Gil-Pelegrín E. 2004. Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* 2:165-192.
- Van Schilfhaarde, J. 1994. Irrigation- a blessing or a curse. *Agriculture Water Management* 25: 203-219. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(94\)90061-2](https://doi.org/10.1016/0378-3774(94)90061-2)
- Vico G, Brunzell NA. 2018. Tradeoffs between water requirements and yield stability in annual vs. Perennial crops. *Advances in Water Resources* 112: 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.12.014>
- Viets FG. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. *Advances in Agronomy* 14: 223–264. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60439-3](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60439-3)
- Vilagrosa A, Bellot J, Vallejo VR, Gil-Pelegrín E. 2003. Cavitation, stomatal conductance, and leaf dieback in seedlings of two co-occurring Mediterranean shrubs during an intense drought. *Journal of Experimental Botany* 54 (390): 2015–2024. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg221>
- Vörösmarty CJ, Sahagian D. 2000. Perturbación antropogénica del ciclo hidrológico terrestre. *Biociencia* 50 (9): 753-765. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0753:ADOTTW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0753:ADOTTW]2.0.CO;2)

- Wang Y, Liu F, Andersen MN, Jensen CR. 2010. Improved plant nitrogen nutrition contributes to higher water use efficiency in tomatoes under alternate partial root-zone irrigation. *Functional Plant Biology* 37 (2): 175. <https://doi.org/10.1071/fp09181>
- Wang Y, Liu F, Jensen CR. 2012. Comparative effects of deficit irrigation and alternate partial root-zone irrigation on xylem pH, ABA and ionic concentrations in tomatoes. *Journal of Experimental Botany* 63 (5): 1907–1917. <https://doi.org/10.1093/jxb/err370>
- Wilkinson S, Hartung W. 2009. Food production: Reducing water consumption by manipulating long-distance chemical signalling in plants. *Journal of Experimental Botany* 60 (7): 1885–1891. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp121>
- Wilkinson S. 1999. pH as a stress signal. *Plant Growth Regulation* 29 (1/2): 87–99. <https://doi.org/10.1023/a:1006203715640>
- Wilkinson S. 2004. Water use efficiency and chemical signalling. Water use efficiency in plant biology. Blackwell Publishing. Oxford. p 75-112.
- Xu H, Wang H, Prentice IC, Harrison SP, Wright IJ. 2021. Coordination of plant hydraulic and photosynthetic traits: confronting optimality theory with field measurements. *New Phytologist* 232 (3): 1286–1296. <https://doi.org/10.1111/nph.17656>
- Yang X, Lu M, Wang Y, Wang Y, Liu Z, Chen S. 2021. Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae* 7 (3): 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>
- Zandalinas SI, Balfagón D, Arbona V, Gómez-Cadenas A. 2017. Modulation of antioxidant defense system is associated with combined drought and heat stress tolerance in citrus. *Frontiers in Plant Science* 8: 953. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00953>
- Zazueta SP, Xin J. 1994. Soil moisture sensors. Universidad of Florida. <https://p2infohouse.org/ref/08/07697.pdf>. (Recuperado marzo 2021).
- Zenes N, Kerr KL, Trugman AT, Anderegg WRL. 2020. Competition and drought alter optimal stomatal strategy in tree seedlings. *Frontiers in Plant Science* 11: 478. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00478>
- Zhang SQ, Outlaw WH. 2001. Abscisic acid introduced into the transpiration stream accumulates in the guard-cell apoplast and causes stomatal closure. *Plant, Cell & Environment* 24 (10): 1045–1054. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00755.x>
- Zhou H, Zhou G, Zhou L, Lv X, Ji Y, Zhou M. 2021). The Interrelationship Between Water Use Efficiency and Radiation Use Efficiency Under Progressive Soil Drying in Maize. *Frontiers in Plant Science* 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.794409>

Zúñiga M, Ortega-Farías S, Fuentes S, Riveros-Burgos C, Poblete-Echeverría C. 2018. Effects of three irrigation strategies on gas exchange relationships, plant water status, yield components and water productivity on grafted carménère grapevines. *Frontiers in Plant Science* 9: 992. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00992>

APENDICE

Cuadro 1-A. Resumen del análisis estadístico de las variables potencial hídrico, osmótico y de turgencia de la hoja de *C. papaya* L. bajo diferentes tratamientos de riego del sustrato.

Variables	DDT ¹	Tratamientos de riego			Pr>Fc	Media general	CV (%)	DSM
		Testigo	RDI-41	RDI-34				
Potencial hídrico (MPa)	142	-1.06±0.07b ²	-1.18±0.07ab	-1.36±0.18a	0.017 ^{*3}	-1.204	8.53	0.22
	169	-1.15±0.04b	-1.23±0.02ab	-1.37±0.15a	0.048 [*]	-1.244	7.88	0.21
	192	-1.12 ±0.17b	-1.18 ±0.15ab	-1.22 ±0.37a	0.012 [*]	-1.179	2.73	0.07
	220	-0.90 ± 0.05b	-0.99 ±0.05a	-1.00 ±0.08a	0.002 ^{**}	-0.966	4.32	0.06
	248	-0.97 ±0.09a	-1.08 ±0.17a	-1.22±0.13 a	0.141 ^{NS}	-1.094	18.15	0.31
Potencial osmótico (MPa)	142	-1.63±0.10 ^a	-1.64±0.12a	-1.71±0.15a	0.626 ^{NS}	-1.66	7.41	0.27
	169	-1.58±0.08 ^a	-1.56±0.04a	-1.68±0.15a	0.204 ^{NS}	-1.61	5.34	0.19
	192	-1.22± 0.05b	-1.35±0.09ab	-1.44±0.10a	0.028 [*]	-1.34	6.21	0.18
	220	-1.28±0.17 ^a	-1.31±0.05a	-1.26±0.10a	0.825 ^{NS}	-1.29	10.63	0.22
	248	-1.30±0.14 ^a	-1.19±0.18a	-1.17±0.12a	0.314 ^{NS}	-1.22	12.4	0.24
Potencial de turgencia (MPa)	142	0.57±0.17 ^a	0.45±0.16a	0.35±0.18a	0.2151 ^{NS}	0.46	33.89	0.34
	169	0.44±0.11 ^a	0.33±0.04a	0.31±0.25a	0.470 ^{NS}	0.36	42.42	0.33
	192	0.10± 0.17 ^a	0.17±0.22a	0.22±0.21a	0.269 ^{NS}	0.16	55.67	0.20
	220	0.38±0.19 ^a	0.32±0.55a	0.25±0.12a	0.400 ^{NS}	0.32	48.91	0.25
	248	0.33±0.21 ^a	0.11±0.20a	-0.05±0.18a	0.062 ^{NS}	0.13	192.44	0.39

¹ DDT: Días después del trasplante; Pr≥ Fc: valor p ; C.V.: Coeficiente de variación; DSM: Diferencia significativa mínima
² Medias con las mismas letras dentro de la fila son estadísticamente iguales (P<0.05, Tukey).
³*=Significativo **Altamente significativo NS= No significativo

Cuadro 2-A. Resumen del análisis estadístico de la variable conductancia estomática (g_s mmol CO₂ m⁻² s⁻¹) de *C. papaya* L. bajo diferentes tratamientos de riego del sustrato.

DDT ¹	Media general	CV (%)	DSM	Pr>Fc	Tratamientos de riego		
					Testigo	RDI-41	RDI-34
89	709.5	31.43	352.88	0.196 ^{NS}	703.2±82.35a ²	695.7±252.22a	729.7±226.23a
90	553.28	41.55	363.82	0.232 ^{NS}	610.5±181.91a	559.0±272.86a	490.3±127.26a
91	284.77	64.46	290.52	0.371 ^{NS}	420.8±230.57a	252.7±89.61a	180.8±89.86a
93	200.17	68.62	217.38	0.030 ^{*3}	329.00±161.86a	194.33±98.98ab	77.17±18.03b
94	117.89	44.42	82.88	0.003 ^{**}	190.00±48.12a	108.83±43.31ab	54.83±22.50b
95	85.67	35.93	56.88	0.015 [*]	117.33±37.46a	95.50±39.06ab	44.17±13.71b
96	133.83	39.38	83.42	0.004 ^{**}	200.00±68.37a	134.67±18.19ab	66.83±25.9b
97	123.5	42.92	83.88	0.007 ^{**}	184.17±38.74a	126.00±36.22ab	60.33±41.71b
103	158.28	43.22	68.4	0.001 ^{**}	234.67±53.41a	138.00±44.39b	102.17±26.15b
104	141.78	55.67	124.92	0.211 ^{NS}	184.33±78.3a	143.67±41.37a	97.33±60.98a
105	176.22	44.26	123.43	0.015 [*]	266.50±83.94a	153.17±43.84ab	109.00±30.29b
107	134.72	47.77	101.86	0.0018 ^{**}	234.17±91.6a	121.33±24.05b	48.67±19.65b
109	141.11	41.09	91.77	0.0001 ^{**}	283.17±80.56a	107.17±29.82b	33.00±7.02b
111	197.28	42.38	132.33	0.0002 ^{**}	372.83±70.11a	152.17±58.87b	66.83±40.84b
114	346.83	26.22	143.95	0.0005 ^{**}	524.17±142.64a	296.17±64.47b	220.17±26.87b
115	418.67	15.95	105.72	0.0001 ^{**}	666.00±46.92a	361.33±76.74b	228.67±32.72c
123	366.89	24.61	142.9	0.001 ^{**}	488.83±73.22a	386.00±77.47a	225.83±40.15b
126	320.17	23.91	121.14	0.0003 ^{**}	482.50±69.39a	258.50±94.24b	219.50±47.41b
128	339.22	31.48	169.02	0.0002 ^{**}	562.50±134.79a	313.33±75.23b	141.83±34.61c
130	409.72	19.63	127.32	0.0001 ^{**}	616.00±66.72a	354.00±63.55b	259.17±60.75b
132	438.05	15.31	106.15	0.0001 ^{**}	649.00±93.01a	359.17±53.9b	306.00±49.00b
134	358.61	28.37	161.04	0.0001 ^{**}	639.33±114.91a	297.50±65.06b	139.00±27.03b
136	392.39	22.07	137.05	0.0001 ^{**}	615.00±71.16a	282.50±76.70b	279.67±44.61b
138	427.39	22.59	152.8	0.0001 ^{**}	663.83±62.56a	346.67±60.99b	271.67±103.95b
140	311.67	28.06	138.42	0.0003 ^{**}	494.17±69.37a	264.17±69.32b	176.67±41.48b
142	307	12.3	59.79	0.0001 ^{**}	509.83±36.9a	282.83±32.37b	128.33±17.07c
151	321.5	28.45	144.78	0.058 ^{NS}	405.83±82.43a	282.50±98.26a	276.17±51.35a
158	310.39	18.28	89.78	0.0001 ^{**}	446.00±60.19a	268.33±73.07b	216.83±38.11b
165	328.44	38.11	198.13	0.061 ^{NS}	440.83±29.64a	288.17±142.13a	256.33±113.89a

DDT1	Media general	CV (%)	DSM	Pr>Fc	Tratamientos de riego		
					Testigo	RDI-41	RDI-34
179	317.67	25.23	126.85	0.006** ³	406.33±47.69a ²	333.17±78.27ab	213.50±68.32b
188	270.72	18.61	79.72	0.0003**	363.17±26.81a	20.50±33.2b	178.50±47.61c
202	312.83	15.17	75.15	0.0001**	431.50±9.51a	273.50±49.4b	233.50±32.31b
209	244.06	22.63	87.43	0.004**	325.33±35.85a	215.33±29.01b	191.50±55.87b
230	77.11	22.97	28.04	0.089 ^{NS}	90.00±22.68a	64.50±7.98a	76.93±10.72a
237	97.11	31.37	48.22	0.308 ^{NS}	112.83±22.84a	93.67±32.22a	84.83±15.65a
241	147.17	34.06	79.34	0.061 ^{NS}	192.33±61.34a	128.50±39.83a	120.67±26.53a
248	169.33	29.88	80.09	0.045*	216.33±47.93a	158.83±15.85ab	132.83±41.83b
254	130.78	25.58	52.94	0.673 ^{NS}	136.00±102.1a	120.67±59.55a	135.67±82.83 ^a

¹ DDT: Días después del trasplante; Pr≥ Fc: valor p ; C.V.: Coeficiente de variación; DSM: Diferencia significativa mínima
² Medias con las mismas letras dentro de la fila son estadísticamente iguales (P<0. 05, Tukey).
³*=Significativo **Altamente significativo NS= No significativo

Cuadro 3-A. Resumen del análisis estadístico de la variable asimilación de CO₂ (A μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) de *C. papaya* L bajo diferentes tratamientos de riego del sustrato.

DDT ¹	Media general	CV (%)	DSM	Pr>Fc	Tratamientos de riego		
					Testigo	RDI-41	RDI-34
89	12.79	33.26	6.73	0.612 ^{NS3}	13.25±4.73a ²	11.38±3.08a	13.75±3.2 ^a
90	1.09	818.37	14.17	0.937 ^{NS}	2.17±6.87a	0.66±7.46a	0.45±8.81 ^a
91	0.877	504.74	7.01	0.052 ^{NS}	3.88±3.36a	1.90±6.76ab	-3.15±6.26b
93	6.59	107.96	11.27	0.182 ^{NS}	11.23±4.47a	5.25±7.72a	3.30±2.6 ^a
94	-0.90	-383.82	5.50	0.047* ³	1.47±4.06a	-0.03±2.09ab	-4.15±1.59b
95	-4.47	-91.25	6.47	0.023*	-2.07±1.89a	-2.33±4.78a	-9.03±1.99b
96	-0.48	-688.73	5.323	0.002**	3.10±4.04a	1.10±2.18a	-5.67±2.86b
97	4.7	116.62	8.68	0.060 ^{NS}	8.93±4.73a	4.92±4.93ab	0.25±4.73b
103	7.57	85.30	10.23	0.620 ^{NS}	9.40±6.02a	7.67±3.89a	5.67±5.91 ^a
104	11.12	66.17	11.65	0.253 ^{NS}	14.06±6.7a	12.43±6.53a	6.87±4.66 ^a
105	13.11	39.79	8.25	0.071 ^{NS}	17.48±4.3a	12.10±4.76a	9.73±2.7 ^a
107	8.69	45.00	6.19	0.015*	11.08±4.76a	11.00±4.09a	4.00±4.30b
109	7.24	39.55	4.53	0.0001**	15.92±7.89a	6.92±2.6b	-1.10±1.77c
111	4.77	128.29	9.68	0.005**	13.18±2.93a	2.80±6.15b	-1.68±3.46b

DDT ¹	Media general	CV (%)	DSM	Pr>Fc	Tratamientos de riego		
					Testigo	RDI-41	RDI-34
114	15.55	11.76	2.89	0.0002** ³	18.67±2.52a ²	16.32±1.6a	11.67±1.25b
123	14.54	9.68	2.22	0.0002**	15.70±1.95a	16.47±2.19a	11.47±2.46b
126	6.46	95.34	9.75	0.011*	14.12±2.11a	3.85±5.03b	1.42±5.95b
128	9.87	51.75	8.08	0.119	13.27±3.28a	9.87±7.03a	6.48±3.74 ^a
130	14.00	31.98	7.09	0.016*	19.32±1.57a	10.98±4.41b	11.72±2.71b
132	18.00	22.09	6.30	0.020*	22.27±1.29a	17.27±4.14ab	14.47±3.30b
134	13.91	31.71	6.98	0.002**	19.32±3.45a	15.30±1.99a	7.12±4.43b
136	14.26	42.65	9.62	0.034*	20.52±1.62a	10.58±6.21b	11.67±4.59ab
138	17.91	28.71	8.14	0.1051 ^{NS}	21.67±2.23a	17.43±2.47a	14.63±6.24 ^a
140	12.43	28.48	5.60	0.037*	16.00±2.20a	10.27±2.25b	11.01±2.84ab
142	9.72	18.39	2.83	0.0004**	12.90±2.84a	9.62±2.19b	6.63±1.91c
144	7.96	39.82	5.01	0.245 ^{NS}	9.80±0.93a	7.47±2.49a	6.62±3.55 ^a
151	15.29	32.56	7.88	0.058 ^{NS}	19.83±1.94a	13.65±5.31a	12.40±5.30a
158	17.22	21.55	5.88	0.001**	22.65±1.48a	14.75±3.88b	14.27±3.43b
165	17.37	29.33	8.06	0.037*	22.45±2.90a	15.17±2.80ab	13.95±4.49b
172	14.25	21.89	4.94	0.0002**	20.75±1.22a	13.35±3.21b	8.55±2.37b
179	16.53	24.34	6.37	0.011*	20.55±4.46a	17.23±6.77ab	11.80±7.66ab
188	16.16	30.41	7.77	0.061 ^{NS}	20.53±5.05a	14.82±2.77a	13.13±3.00a
195	18.32	10.94	3.17	0.0007**	22.01±2.28a	15.72±0.98b	17.22±2.20b
202	21.69	17.82	6.12	0.103 ^{NS}	24.78±3.52a	20.18±3.69a	20.12±2.64a
209	15.72	16.30	4.05	0.062 ^{NS}	18.03±1.75a	14.33±2.77a	14.80±1.00a
230	6.25	35.28	3.49	0.032*	7.90±1.37a	4.03±1.32b	6.83±2.36ab
237	4.06	75.16	4.83	0.154 ^{NS}	5.47±1.01a	1.93±2.37a	4.78±4.61a
241	13.84	21.47	4.70	0.103 ^{NS}	16.03±2.49a	11.97±3.29a	13.52±1.23a
248	13.72	25.08	5.44	0.749 ^{NS}	14.57±2.19a	13.08±2.47a	13.50±4.00a
254	15.02	33.31	7.92	0.913 ^{NS}	15.62±2.62a	15.05±3.61a	14.38±4.03a

¹ DDT: Días después del trasplante; Pr≥ Fc: valor p ; C.V.: Coeficiente de variación; DSM: Diferencia significativa mínima
² Medias con las mismas letras dentro de la fila son estadísticamente iguales (P<0. 05, Tukey).
³*=Significativo **Altamente significativo NS= No significativo

Cuadro 4-A. Resumen del análisis estadístico de la variable transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de *C. papaya* L. bajo diferentes tratamientos de riego del sustrato.

DDT ¹	Media general	CV (%)	DSM	Pr>Fc	Tratamientos de riego		
					Testigo	RDI-41	RDI-34
89	9.45	10.07	1.5	0.725 ^{NS3}	9.32±0.60a ²	9.32±0.92a	9.71±0.73 ^a
90	7.76	19.86	2.44	0.965 ^{NS}	7.90±1.44a	7.69±1.66a	7.69±0.97 ^a
91	4.87	28.95	2.23	0.115 ^{NS}	5.84±1.23a	4.82±0.95a	3.95±1.60 ^a
93	4.35	26.78	1.84	0.002 ^{**}	5.81±0.97a	4.64±1.28a	2.60±0.48b
94	2.97	35.54	1.67	0.008 ^{**}	4.24±0.61a	2.87±0.85ab	1.81±0.65b
95	2.87	27.17	1.23	0.004 ^{**}	3.69±0.88a	3.14±0.91a	1.75±0.49b
96	3.63	24.11	1.38	0.003 ^{**}	4.68±1.05a	3.82±0.41a	2.38±0.82b
97	3.67	32.9	1.91	0.007 ^{**}	5.00±0.64a	3.83±0.61ab	2.16±1.19b
103	4.36	16.24	1.12	0.0009 ^{**}	5.60±0.80a	4.14±0.54b	3.37±0.60b
104	4.05	44.31	2.84	0.361 ^{NS}	4.67±1.77a	4.30±0.79a	3.17±1.49 ^a
105	4.18	22.7	1.5	0.010 ^{**}	5.31±0.99a	4.01±0.79ab	3.21±0.71b
107	4.07	24.46	1.57	0.0002 ^{**}	6.03±1.41a	4.11±0.51b	2.05±0.73c
109	3.87	23.71	1.45	0.0001 ^{**}	6.45±1.12a	3.75±0.85b	1.40±0.23c
111	4.55	27.57	1.98	0.0003 ^{**}	6.70±0.59a	4.31±1.06b	2.33±1.02b
114	5.93	14.57	1.37	0.0015 ^{**}	7.37±1.42a	5.57±1.4b	4.87±0.48b
123	6.61	16.26	1.7	0.684 ^{NS}	6.79±0.90a	6.74±0.23a	6.28±1.49 ^a
126	5.87	12.76	1.18	0.055 ^{NS}	6.57±1.63a	5.58±1.34a	5.47±0.98 ^a
128	6.11	13.38	1.29	0.0001 ^{**}	7.90±0.62a	6.01±0.69b	4.43±0.76c
130	6.6	9.42	0.98	0.0002 ^{**}	7.95±0.75a	6.10±0.34b	5.75±0.58b
132	6.14	9.111	0.88	0.001 ^{**}	7.13±0.52a	5.74±0.58b	5.56±0.30b
134	6.13	13.31	1.29	0.0001 ^{**}	8.05±1.16a	6.02±0.60b	4.31±0.37c
136	5.82	14.14	1.3	0.270 ^{NS}	6.28±0.77a	5.51±0.a	5.66±0.35 ^a
138	6.37	21.09	2.12	0.007 ^{**}	8.12±0.77a	5.98±0.93b	5.02±1.35b
140	5.33	17.56	1.48	0.003 ^{**}	6.65±1.01a	5.07±0.82b	4.24±0.53b
142	5.63	19.32	1.72	0.0004 ^{**}	7.84±1.49a	4.97±0.7b	4.09±0.57b
144	5.63	2.32	0.207	0.306 ^{NS}	5.63±0.42a	5.69±0.33a	5.57±0.32 ^a
151	5.7	17.92	1.62	0.097 ^{NS}	6.53±0.30a	5.37±0.94a	5.22±0.97 ^a
158	5.89	18.19	1.69	0.067 ^{NS}	6.83±1.49a	5.27±1.28a	5.58±0.99 ^a

DDT ¹	Media general	CV (%)	DSM	Pr>Fc	Tratamientos de riego		
					Testigo	RDI-41	RDI-34
172	4.99	16.87	1.33	0.0004 ^{**3}	6.66±1.27a ²	4.66±0.91b	3.68±0.88b
179	5.07	17.96	1.44	0.229 ^{NS}	5.33±1.00a	5.38±1.17a	4.52±1.01 ^a
188	4.02	18.62	1.18	0.700 ^{NS}	4.01±0.68a	3.85±0.57a	4.22±0.53 ^a
195	5.3	12.13	1.01	0.0106 [*]	6.11±1.18a	4.74±0.73b	5.05±0.65b
202	5.27	12.64	1.05	0.089 ^{NS}	5.76±1.12a	4.80±0.97a	5.27±1.03 ^a
209	4.19	17.52	1.16	0.890 ^{NS}	4.29±0.64a	4.08±0.83a	4.22±0.82 ^a
237	2.56	34.62	1.4	0.913 ^{NS}	2.53±0.84a	2.68±0.83a	2.48±0.33 ^a
241	3.79	21.19	1.27	0.095 ^{NS}	4.44±1.03a	3.51±0.99a	3.42±0.75 ^a
248	3.96	20.21	1.27	0.280 ^{NS}	4.18±0.88a	4.19±0.26a	3.50±0.68 ^a
254	3.97	17.81	1.12	0.423 ^{NS}	3.67±1.35a	4.04±0.94a	4.22±1.22 ^a

¹ DDT: Días después del trasplante; Pr≥ Fc: valor p ; C.V.: Coeficiente de variación; DSM: Diferencia significativa mínima
² Medias con las mismas letras dentro de la fila son estadísticamente iguales (P<0. 05, Tukey).
³*=Significativo **Altamente significativo NS= No significativo

Cuadro 5-A. Resumen del análisis estadístico de la variable eficiencia en el uso del agua instantánea (A/E) de *Carica papaya* L. bajo diferentes tratamientos de riego del sustrato.

DDT ¹	Media general	CV (%)	DSM	Pr>Fc	Tratamientos de riego		
					Testigo	RDI-41	RDI-34
89	0.0013	32.1360	0.0007	0.6119NS	0.0014±0.0005a ²	0.0012±0.0002 ^a	0.0014±0.0002a
96	-0.0008	-207.7440	0.0025	0.0058 ^{**3}	0.0005±0.001a	0.0002±0.0005 ^a	-0.0030±0.002b
103	0.0017	88.1634	0.0023	0.9289NS	0.0018±0.001a	0.0018±0.0008 ^a	0.0015±0.001a
111	0.0004	365.838	0.0024	0.0216NS	0.0019±0.0003a	0.0005±0.001ab	-0.0011±0.001b
115	0.0019	20.1224	0.0006	0.2586NS	0.0021±0.0003a	0.0018±0.001 ^a	0.0018±0.001a
123	0.0022	17.0010	0.0006	0.0731NS	0.0023±0.0004a	0.0024±0.0003 ^a	0.0019±0.0004a
130	0.0022	19.8714	0.0007	0.3087NS	0.0025±0.00001a	0.0022±0.0002 ^a	0.0020±0.0003a
138	0.0028	40.5910	0.0018	0.8923NS	0.0027±0.0003a	0.0030±0.0003 ^a	0.0028±0.0004a
144	0.0014	40.1518	0.0009	0.2088NS	0.0018±0.0004a	0.0013±0.0006 ^a	0.0012±0.0006a
151	0.0027	32.9660	0.0014	0.4541NS	0.0031±0.0002a	0.0024±0.0004 ^a	0.0027±0.0006a
158	0.0031	20.3656	0.001	0.1027NS	0.0036±0.0003a	0.0029±0.001 ^a	0.00273±0.0008a
165	0.0036	22.8031	0.0013	0.0125 [*]	0.0045±0.0009a	0.0035±0.0009ab	0.0028±0.0009b
172	0.0029	24.3290	0.0011	0.1142NS	0.0033±0.0007a	0.0030±0.001 ^a	0.0024±0.0009a

DDT ¹	Media general	CV (%)	DSM	Pr>Fc	Tratamientos de riego		
					Testigo	RDI-41	RDI-34
188	0.0041	24.3241	0.0016	0.0146* ³	0.0052±0.001a ²	0.0039±0.001ab	0.0031±0.002b
195	0.0035	11.7291	0.0007	0.3684NS	0.0037±0.001a	0.0034±0.0008a	0.0034±0.0006a
202	0.0042	15.9016	0.0011	0.4389NS	0.0045±0.0006a	0.0042±0.0004a	0.0040±0.0004a
209	0.0039	23.8411	0.0015	0.3305NS	0.0044±0.0008a	0.0036±0.0004a	0.0037±0.0007a
219	0.0035	15.9649	0.0009	0.1116NS	0.0040±0.0008a	0.0033±0.0007a	0.0033±0.0007a
230	0.0029	30.3411	0.0014	0.2507NS	0.0034±0.0006a	0.0025±0.0006a	0.0029±0.0005a
237	0.0017	85.1929	0.0022	0.1288NS	0.0026±0.0002a	0.0007±0.0006a	0.0017±0.001a
248	0.00345	18.4556	0.001	0.2747NS	0.0036±0.0006a	0.0031±0.0008a	0.0037±0.0007a
254	0.0041	24.2539	0.0016	0.1371NS	0.0047±0.001a	0.0041±0.001 ^a	0.0035±0.0009a

¹ DDT: Días después del trasplante; Pr≥ Fc: valor p; C.V.: Coeficiente de variación; DSM: Diferencia significativa mínima

² Medias con las mismas letras dentro de la fila son estadísticamente iguales (P<0. 05, Tukey).

³*=Significativo **Altamente significativo NS= No significativo

Cuadro 6-A. Resumen del análisis estadístico de la variable prolina en la hoja de *Carica papaya* L. bajo diferentes tratamientos de riego del sustrato.

Tratamientos de riego	DDT ¹				
	142	169	192	220	248
Testigo	190.45±12.38a ²	376.8±107.71a	426.86±25.84a	663.44±147.60a	571.53±46.97 ^a
RDI-41	235.90±56.74a	593.3±163.67a	481.50±42.66a	620.89±42.03a	660.04±62.57a
Rdi-34	240.49±34.91a	561.7±69.54a	485.58±51.55a	670.93±92.220a	630.42±36.72a
FV	Pr>Fc				
Tratamiento	0.957NS ³	0.867NS	0.051NS	0.054NS	0.952NS
Media general	222.28	510.60	464.65	651.75	620.66
C.V. (%)	21.47	27.78	6.07	15.02	11.72
DSM	103.55	307.78	61.29	154.97	115.13

¹ DDT: Días después del trasplante; Pr≥ Fc: valor p; C.V.: Coeficiente de variación; DSM: Diferencia significativa mínima

² Medias con las mismas letras dentro de la fila son estadísticamente iguales (P<0. 05, Tukey).

³*=Significativo **Altamente significativo NS= No significativo

Cuadro 7–A. Resumen del análisis estadístico de la variable diámetro del tallo y peciolo, longitud del peciolo y área foliar de *Carica papaya* L. bajo diferentes tratamientos de riego del sustrato.

Variables de respuesta	DDT ¹	Tratamientos de riego			Pr>Fc	Media general	CV (%)	DSM
		Testigo	RDI-41	RDI-34				
Diámetro del tallo (cm)	110	4.00±0.31a ²	4.30±0.19a	4.22±0.22 ^a	0.284 ^{NS3}	4.17	7.6	0.5
	138	4.87±0.17a	4.97±0.32a	4.55±0.29 ^a	0.084 ^{NS}	4.79	6.21	0.47
	171	5.38± 0. 33a	5.25±0.38ab	4.75±0.29b	0.030 [*]	5.33	7.1	0.58
	199	5.66±0.33 ^a	5.42±0.44ab	4.92±0.32b	0.023 [*]	5.33	7.4	0.63
	227	5.88±0.38 ^a	5.56±0.5ab	5.14±0.35b	0.043 [*]	5.53	7.73	0.68
	256	5.98±0.38 ^a	5.68±0.58a	5.32±0.37 ^a	0.104 ^{NS}	5.66	8.32	0.75
Diámetro del peciolo (cm)	142	1.12±0.06 ^a	1.07±0.12a	0.910±0.21 ^a	0.076 ^{NS}	1.036	10.77	0.24
	169	1.26±0.10 ^a	1.03±0.15ab	0.90±0.07b	0.001 ^{**}	1.062	6.7	0.15
	192	1.19± 0. 13a	1.06±0.13ab	1.04±0.09b	0.130 ^{NS}	1.095	9.03	0.21
	220	1.27±0.09 ^a	1.12±0.08ab	0.94±0.04b	0.0005 ^{**}	1.11	8.44	0.15
	248	1.005±0.11a	0.882±0.03ab	0.791±0.04b	0.005 ^{**}	0.89	9.84	0.14
Longitud del peciolo (cm)	142	49.65±3.28a	46.22±3.87a	39.82±1.8 b	0.0082 ^{**}	45.23	6.39	6.27
	169	53.75±1.42 a	51.60±1.63ab	47.63±3.74 b	0.0227 [*]	50.99	4.42	4.89
	192	56.20± 5.31 a	51.20±1.91 ab	49.55±5.08 b	0.0481 [*]	52.32	5.78	6.56
	220	42.70±1.0a	40.03±3.48ab	36.45±2.57 b	0.0357 [*]	39.73	8.89	5.59
	248	36.17±3.2 ^a	32.50±3.52 ab	30.08±2.02b	0.0439 [*]	32.92	10.94	5.7
Área foliar (cm ²)	82	76.41±56.967a	94.35±63.285a	47.26±37.297a	0.812 ^{NS}	72.67	83.42	70.56
	89	286.14±47.51a	289.00±35.73a	286.14±41.98a	0.993 ^{NS}	287.09	17.34	78.78
	96	442.67±41.85a	404.97±41.20a	390.15±37.23a	0.256 ^{NS}	412.60	12.85	83.88
	104	475.44±40.58a	466.07±18.30a	432.27±40.86a	0.268 ^{NS}	457.93	9.91	71.78
Área foliar (cm ²)	150	128.56±33.19a	118.16±48.19a	116.86±48.09a	0.892 ^{NS}	121.20	38.29	73.45
	157	317.08±38.63a	305.38±38.88a	289.78±56.24a	0.753 ^{NS}	304.08	20.42	98.28
	171	390.93±36.16a	363.11±36.61a	365.97±50.58a	0.645 ^{NS}	373.33	14.85	87.74
Área foliar (cm ²)	214	94.76±47.54a	67.46±52.93a	145.47±64.35a	0.203 ^{NS}	102.5622	69.00	112.00
	227	176.67±53.51a	119.46±31.44a	201.37±67.18a	0.147 ^{NS}	165.8345	40.571	106.48
	234	189.67±55.89a	154.57±31.25a	228.67±59.40a	0.185 ^{NS}	190.9701	33.676	101.78

¹ DDT: Días después del trasplante; Pr≥ Fc: valor p ; C.V.: Coeficiente de variación; DSM: Diferencia significativa mínima

² Medias con las mismas letras dentro de la fila son estadísticamente iguales (P<0. 05, Tukey).

³*=Significativo **Altamente significativo NS= No significativo

Cuadro 8–A. Resumen del análisis estadístico de la variable producción y calidad del fruto de *Carica papaya* L. en diferentes niveles de humedad del sustrato.

Variables	Tratamientos de riego			Pr>Fc	Media general	CV (%)	DSM
	Testigo	RDI-41	RDI-34				
No. de frutos	29.17±a13.27a ¹	35.10±5.49a	37.50±5.79a	0.285 ^{NS}	34.39	27.17	14.78
Peso de fruto (kg) kg planta	1.05±0.28a	0.67±0.06b	0.76±0.20ab	0.042 ^{*2}	0.82	20.55	0.37
(No de frutos* peso de fruto)	30.62	23.52	28.5	---	---	---	----
Long. de fruto (cm)	23.40±3.86a	18.06±2.62ab	17.60±1.87b	0.050 [*]	19.75	17.58	6.27
Ø del fruto (cm)	10.75±1.29a	10.73±1.48a	10.30±1.11a	0.831 ^{NS}	10.59	12.51	7.53
Firmeza (N)	2.38±0.55a	1.86±0.25a	2.44±0.97a	0.578 ^{NS}	2.23	36.96	1.793
SST (°Brix)	4.65±0.50a	5.26±0.34a	5.37±0.23a	0.110 ^{NS}	5.10	8.50	0.94
Acidez titulable	0.0117±0.002a	0.0111±0.001a	0.0135±0.002a	0.373 ^{NS}	0.012	19.32	0.005

¹Medias con las mismas letras dentro de la fila son estadísticamente iguales (P<0. 05, Tukey).
²*=Significativo **Altamente significativo NS= No significativo

Cuadro 9–A. Análisis de correlación de Pearson, para las variables de relaciones hídricas, intercambio de gases, crecimiento vegetativo y calidad postcosecha de *C. papaya* L., en diferentes niveles de humedad del sustrato.

Variables (Coef corr Pr>r)	PT	PO	PRO	LP	CE	ACO	TRANS	EUA	DT	AF	SST	PFRUT	LOGF	DIAFR	NOFR
PH	0.59 *	0.14 NS	0.36 NS	-0.24 NS	0.37 NS	0.49 NS	0.13 NS	0.57 NS	0.74 **	-0.55 *	-0.007 NS	-0.18 NS	0.43 NS	0.53 *	0.001 NS
PT		-0.71 **	0.70 **	-0.46 NS	0.47 NS	0.52 *	-0.31 NS	0.81 **	0.76 **	-0.34 NS	0.13 NS	-0.15 NS	0.04 NS	0.30 *	-0.03 NS
PO			-0.55 *	0.37 NS	0.47 NS	- 0.20 NS	0.50 NS	-0.48 NS	-0.28 NS	0.12 NS	-0.22 NS	0.026 NS	0.33 NS	0.10 NS	0.04 NS
PRO				-0.47 NS	- 0.45 NS	0.23 NS	-0.65 **	0.79 **	0.57 *	-0.82 **	0.61 *	-0.49 NS	0.11 NS	0.42 NS	0.40 NS
DP				0.65 **	0.80 **	0.66 **	0.61 *	0.24 NS	0.35 NS	0.0003 NS	-0.48 NS	0.32 NS	0.36 NS	0.13 NS	-0.09 NS
LP					0.59 *	0.39 NS	0.66 NS	-0.13 NS	-0.19 NS	0.30 NS	-0.50 NS	0.67 *	-0.0005 NS	-0.31 NS	-0.33 NS
CE						0.60 *	0.91 **	0.03 NS	0.17 NS	0.28 NS	-0.79 **	0.64 *	0.32 NS	-0.10 NS	-0.43 NS
ACO							0.42 NS	0.74 **	0.62 *	-0.17 NS	-0.35 NS	0.30 NS	0.36 NS	0.12 NS	-0.16 NS
TRANS								-0.21 NS	-0.11 NS	0.45 NS	-0.76 **	0.67 *	0.19 NS	-0.27 NS	-0.49 NS
EUA									0.76 **	-0.60 *	0.14 NS	-0.15 NS	0.33 NS	0.45 NS	0.15 NS
DT										-0.10 NS	0.14 NS	-0.02 NS	0.41 NS	0.51 *	-0.006 NS
AF											-0.36 NS	0.37 NS	-0.44 NS	-0.54 *	-0.59 *
SST												-0.69 *	-0.40 NS	0.18 NS	0.35 NS

Variables (Coef corr Pr>r)	PT	PO	PRO	LP	CE	ACO	TRANS	EUA	DT	AF	SST	PFRUT	LOGF	DIAFR	NOFR
PFRUT													-0.10 NS	-0.55 NS	-0.69 *
LOGF														0.72 **	0.22 NS
DIAFR															0.23 NS

NS= No significativo; * Significativo; ** Altamente significativo; PH=Potencial hídrico; PT= Potencial de turgencia; PO= Potencial osmótico; PRO= Prolina; DP= Diámetro del peciolo; LP= Longitud del peciolo; CE= Conductancia estomática; ACO= Asimilación de CO₂; TRANS= Transpiración; EUA= Eficiencia en el uso del agua instantánea; DT= Diámetro del tallo; AF= Área foliar; SST= °Brix; ACID= Acidez titulable; FIRM= Firmeza; PFRUT= Peso del fruto; LOGF= Longitud del fruto; DIAFR= Diámetro del fruto; NOFR= Número de frutos.