



**Universidad
de La Laguna**

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA (EPSI)
SECCIÓN DE INGENIERÍA AGRARIA

Grado en Ingeniería Agrícola y del Medio Rural

ESTUDIO DE LAS RESPUESTAS
DE PLÁNTULAS DE *Carica papaya*
FRENTE A CONDICIONES DE
SALINIDAD

José Daniel García Garcés
La Laguna, septiembre 2021



**AUTORIZACIÓN DEL TRABAJO FIN DE
GRADO POR SUS DIRECTORES
CURSO 2020/2021**

DIRECTOR – COORDINADOR: Jalel Mahouachi Mahouachi.

DIRECTOR: Sergio Joaquín Álvarez Méndez.

como directores del alumno D. José Daniel García Garcés en el TFG titulado: 'Estudio de las respuestas de plántulas de *Carica papaya* frente a condiciones de salinidad', n.º de Ref. 3, damos nuestra autorización para la presentación y defensa de dicho TFG, a la vez que confirmamos que el alumno ha cumplido con los objetivos generales y particulares que lleva consigo la elaboración del mismo y las normas del Reglamento de Trabajo Fin de Grado de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería.

La Laguna, a 06 de septiembre de 2021.

Fdo. Dr. Jalel Mahouachi Mahouachi

Fdo. Sergio Joaquín Álvarez Méndez

SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE TRABAJO FIN DE GRADO



Agradecimientos

A mis directores Jalel Mahouachi y Sergio Álvarez por su dedicación, implicación y apoyo para que este trabajo saliera adelante.

A Miguel Corbella, Aníbal Medina y Eduardo Chinaea, del Departamento de Química de la Escuela. Buenos instructores y personas, que han compartido generosamente conmigo medios, conocimientos y tiempo.

A Alexandre Marcelino y Antonio Urbano, con los que compartí tantas horas de trabajo y buenos momentos. Sin su compañerismo y colaboración el desarrollo del ensayo no hubiera sido el mismo.

A los profesores entusiastas y apasionados, que me han revelado tanto e inculcado su afecto por sus materias. No pierdan nunca esa pasión de enseñar.

A mis compañeros y amigos, con los que compartí tantos momentos: de nervios, de tensión, de trabajo, de risas. Sin ellos, nada hubiera sido igual.

A Drago y Gofio, por tantas horas de compañía y afecto, especialmente en el transcurso de redacción.

A todos, los que están y los que no, que me han apoyado y se han interesado por mi desarrollo académico.

A los más importantes, mis padres José y Elena, y mi hermana Nuria, que tanto me han impulsado y apoyado siempre, especialmente en esta etapa que se acaba. Sin ellos, llegar hasta aquí no hubiera sido igual.

Gracias de verdad.



Abreviaturas y símbolos

°Bx	Grados Brix
°C	Grados Celsius
%	Porcentaje
ANOVA	Análisis de la varianza (del inglés <i>Analysis of variance</i>)
B ³⁺	Boro
<i>C. papaya</i>	<i>Carica papaya</i>
C	Carbono
Ca ²⁺	Calcio
CE	Conductividad eléctrica
Cl ⁻	Cloro
cm	Centímetro/s
CMV	Del inglés <i>Cucumber mosaic virus</i>
DDT	Días después del tratamiento
dS	Decisiemen/s
EE. UU.	Estados Unidos de América
<i>et al.</i>	Y otros
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (del inglés <i>Food and Agriculture Organization</i>)
FAOSTAT	Base de datos estadísticos corporativos de la FAO (del inglés <i>Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database</i>)
FEN	Fundación Española de la Nutrición
g	Gramo/s
g _s	Conductancia estomática
h	Hora/s
H ⁺	Hidrógeno



ha	Hectárea/s
HR	Humedad relativa
IBM®	<i>International Business Machines Corporation</i>
ISTAC	Instituto Canario de Estadística
K ⁺	Potasio
kcal	Kilocaloría/s
km	Kilómetro/s
L	Litro/s
Lat	Latitud
Lon	Longitud
M. O.	Materia orgánica
m	Metro/s
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (España)
mg	Miligramo/s
Mg ²⁺	Magnesio
min	Minuto/s
ml	Mililitro/s
mm	Milímetro/s
mM	Milimolar (10^{-3} mol/l)
mmol	Milimol/es
m s. n. m.	Metro/s sobre el nivel del mar
n	Número de muestras
Na ⁺	Sodio
NPK	Relación entre nitrógeno, fósforo y potasio



O ²⁻	Oxígeno
P ⁵⁺	Fósforo
P/V	Relación entre peso y volumen
pH	Potencial de hidrógeno (índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución)
ppm	Partes por millón
PRSV	Del inglés <i>Papaya ringspot virus</i>
T1	Tratamiento control
T2	Tratamiento salino
t	Tonelada/s
TSWV	Del inglés <i>Tomato spotted wilt virus</i>
S. A.	Sociedad Anónima
S. A. U.	Sociedad Anónima Unipersonal
s. f.	Sin fecha
s	Segundo/s
SC	Suspensión concentrada
SEGAI	Servicio General de Apoyo a la Investigación
spp.	Varias especies
SPSS®	<i>Statistical Package for Social Sciences</i>
Sr ²⁺	Estroncio
ULL	Universidad de La Laguna
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (del inglés <i>United States Department of Agriculture</i>).
V/V	Relación entre volumen y volumen



Índice

1. Resumen.....	9
2. Abstract	10
3. Introducción	11
4. Objetivos	12
5. Revisión bibliográfica.....	13
5.1. Origen y distribución	13
5.2. Importancia.....	14
5.2.1. Situación del cultivo en el mundo.....	15
5.2.2. Situación del cultivo en España	17
5.2.3. Situación del cultivo en Canarias.....	18
5.3. Clasificación taxonómica	19
5.4. Descripción botánica	19
5.4.1. Raíces	20
5.4.2. Tallo	21
5.4.3. Hojas.....	23
5.4.4. Flores.....	24
5.4.5. Frutos	27
5.4.6. Semillas	30
5.5. Material vegetal: tipos y cultivares	31
5.6. Requerimientos edafoclimáticos	33
5.6.1. Requerimientos climáticos	33
5.6.2. Requerimientos edáficos	34
5.7. Técnicas de cultivo	35
5.8. Plagas y enfermedades	37
5.8.1. Plagas	37
5.8.2. Enfermedades	38
5.9. Estrés abiótico	39
5.9.1. Elevadas y bajas temperaturas	40
5.9.2. Estrés hídrico y encharcamiento	41
5.9.3. Alta y baja humedad relativa	43
5.9.4. Viento.....	43
5.9.5. Estrés salino	44
6. Material y métodos	47
6.1. Material vegetal	47



6.2. Descripción del ensayo	47
6.3. Parámetros morfológicos y conductancia estomática	50
6.4. Análisis de los minerales	52
6.4.1. Muestreo de las plantas y preparación de las muestras.....	52
6.4.2. Análisis químicos	55
6.5. Análisis estadísticos.....	59
7. Resultados y discusión.....	60
7.1. Crecimiento vegetativo.....	60
7.1.1. Número de hojas.....	60
7.1.2. Altura de las plantas.....	63
7.1.3. Diámetro de los tallos	65
7.2. Conductancia estomática.....	66
7.3. Análisis minerales.....	68
7.3.1. Minerales foliares	68
7.3.2. Minerales en tallo.....	69
7.3.3. Minerales en raíz.....	71
8. Conclusiones	73
9. Conclusions	74
10. Referencias bibliográficas	75
11. Anexos.....	85



Título: ESTUDIO DE LAS RESPUESTAS DE PLÁNTULAS DE *Carica papaya* FRENTE A CONDICIONES DE SALINIDAD.

Autores: José Daniel García Garcés, Jalel Mahouachi Mahouachi y Sergio Joaquín Álvarez Méndez.

Palabras clave: papaya; estrés salino; crecimiento vegetativo; conductancia estomática; nutrientes minerales.

1. Resumen

La papaya (*Carica papaya* L.) es uno de los frutales más importantes de las zonas tropicales y subtropicales, y en estos últimos años el interés de los consumidores ha sido creciente. Muchas zonas de cultivo presentan problemas por salinidad en suelos y/o aguas de riego, por lo que resulta interesante conocer los mecanismos y la respuesta de la papaya frente a estas condiciones.

En el presente trabajo, se determinó el efecto del estrés salino en el crecimiento vegetativo, la conductancia estomática y el contenido de elementos minerales en diferentes órganos de plántulas de papaya 'Sweet Mary'. Se estableció un tratamiento control (plantas regadas con agua de riego sin alterar) y otro salino (plantas regadas con agua de riego con una concentración 100 mM de NaCl).

El experimento se llevó a cabo bajo invernadero de cubierta de plástico, y consistió, por un lado, en tomar datos semanales de crecimiento vegetativo (número de hojas funcionales, diámetro del tallo y altura de la planta) y conductancia estomática y, por otro lado, analizar al final del periodo de ensayo el contenido de calcio, magnesio, potasio y sodio en hojas, tallos y raíces.

En general, los resultados obtenidos muestran que el tratamiento salino afectó negativamente a todos los parámetros evaluados del crecimiento vegetativo, y a la conductancia estomática. Asimismo, generó variaciones en la concentración de los diferentes minerales respecto al tratamiento control. Resalta el aumento de la concentración de sodio en hojas y tallos, así como de potasio en hojas de las plantas sometidas a estrés salino.



Title: STUDY OF THE RESPONSES OF SEEDLINGS OF *Carica papaya* SUBJECTED TO SALINITY CONDITIONS.

Authors: José Daniel García Garcés, Jalel Mahouachi Mahouachi y Sergio Joaquín Álvarez Méndez.

Key words: papaya; saline stress; vegetative growth; stomatal conductance; mineral nutrients.

2. Abstract

Papaya (*Carica papaya* L.) is one of the most important fruit crops of the tropics and subtropics, and in recent years the interest of consumers has been increasing. Many growing areas have problems due to salinity in soils and/or irrigation waters, so it is interesting to know the mechanisms and responses of papaya to these conditions.

In the present study, the effect of saline stress on vegetative growth, stomatal conductance and the content of mineral elements, were determined in different organs of papaya 'Sweet Mary'. A control treatment (plants watered with unaltered irrigation water) and a saline treatment (plants watered with a 100 mM solution of NaCl) were carried out.

The experiment was performed under a plastic greenhouse and consisted in gathering weekly data on vegetative growth (number of functional leaves, stem diameter and plant height) and stomatal conductance. Furthermore, the content of calcium, magnesium, potassium and sodium were analysed in leaves, stems and roots at the end of the test period.

Generally, the results obtained show that the saline treatment adversely affected all the parameters of vegetative growth, and stomatal conductance. Likewise, it generated variations in the concentration of the different minerals with regard to the control treatment. The high concentration of sodium in leaves and stems must be highlighted, as well as potassium content in leaves of plants exposed to saline stress.



3. Introducción

La papaya (*Carica papaya* L.), es un frutal tropical que se encuentra en expansión tanto en Canarias como en el sur peninsular, ya que presenta un ciclo corto de desarrollo, buen comportamiento en poscosecha y fácil comercialización. En estudios previos, se clasificó a la papaya como una especie relativamente tolerante al estrés hídrico moderado; sin embargo, la sequía prolongada reduce el crecimiento y aumenta considerablemente la abscisión foliar (Mahouachi et al., 2007; Mahouachi et al., 2012). Esta tolerancia parece estar regulada entre otros por la acumulación de solutos inorgánicos que contribuyen al ajuste osmótico y también por la implicación de las fitohormonas en los procesos fisiológicos. La investigación de las respuestas de este cultivo a las condiciones ambientales adversas y en concreto al estrés salino, cada vez más frecuente en las regiones con recursos hídricos limitados, se considera esencial para conocer los mecanismos de tolerancia de la papaya a estas condiciones. La clasificación de la papaya respecto a su tolerancia a la salinidad varía entre moderadamente tolerante y muy sensible, según los autores. En investigaciones anteriores, se determinó que la salinidad del agua reduce el crecimiento de la papaya, especialmente el crecimiento foliar (Sousa et al., 2019). También experimenta otras modificaciones morfológicas como la disminución del número de estomas en las hojas o el engrosamiento de los tejidos foliares (Parés et al., 2008). Asimismo, la salinidad influye negativamente en la germinación de las semillas de papaya (Meza et al., 2004).

En el presente trabajo, se utilizó 'Sweet Mary', un cultivar muy popular, caracterizado por un buen rendimiento y por producir frutos de buena calidad, para comprobar la respuesta frente a condiciones de salinidad. El trabajo experimental se llevó a cabo en un invernadero de las instalaciones de la Sección de Ingeniería Agraria de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de la Universidad de La Laguna, empleando plántulas en maceta.



4. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es conocer las respuestas morfológicas y fisiológicas de la papaya frente a condiciones de salinidad. Con motivo de llegar a tal fin, se propone determinar periódicamente tanto el crecimiento vegetativo, como la capacidad fotosintética en base a la conductancia estomática. También se plantea evaluar la dinámica de absorción de los nutrientes minerales bajo esta condición adversa.



5. Revisión bibliográfica

5.1. Origen y distribución

Es complejo determinar el origen de la papaya, debido a la gran distribución que llevaron a cabo los españoles tras el descubrimiento de América y a la elevada adaptabilidad a condiciones subtropicales y tropicales de todo el mundo (Fuentes y Santamaría, 2014). Vavilov (1992) determinó tres posibles regiones de origen de la mayoría de especies cultivadas: Mesopotamia, Mesoamérica y el norte de China. En el caso de la papaya, aunque se carece de pruebas arqueológicas, de forma general se sostiene que el origen está vinculado con el continente americano, al igual que un gran número de cultivos tropicales. Concretamente la papaya se asocia con las costas caribeñas de Centroamérica y el sur de México (Fuentes y Santamaría, 2014), resultado de la hibridación natural (Villegas, 1991).

Esta hipótesis se basa en los registros de especímenes de diversos herbarios de todo el mundo y en la existencia de poblaciones silvestres en zonas aisladas de estas regiones. No obstante, es necesario llevar a cabo estudios moleculares para corroborar dicha hipótesis (Fuentes y Santamaría, 2014).

El primer documento escrito haciendo referencia a la papaya data de 1526, producido por Oviedo en las zonas costeras de Panamá (Fuentes y Santamaría, 2014).

Como ya se ha hecho referencia, la papaya es un cultivo ampliamente distribuido en las regiones tropicales y subtropicales del planeta, como se observa en la **Figura 1**, llegando a ser uno de los frutales más importantes de estas regiones (Teixeira et al., 2007). Su distribución fue temprana, así lo demuestra la exuberante variabilidad de nombres vernáculos que recibe la papaya como pawpaw, papayo, melón papaya, lechosa o malako (Nakasone, 1987).

Se cree que la amplia distribución se debe a los españoles, que en sus expediciones del siglo XVI llevaron la fruta desde Centroamérica hacia Sudamérica y otros países. Sobre 1550 portaron semillas a Filipinas, algo más de medio siglo después, en 1611, la papaya se cultivaba en India, y en 1800 llega a varias islas localizadas en el sur del Océano Pacífico (Fuentes y Santamaría, 2014). Según Morton (1987), se transportaron semillas a República Dominicana antes de 1525. Tras ello, se comenzó a cultivar en zonas cálidas de Suramérica, Bahamas y Antillas, y luego a Bermudas en 1616.

Además, la distribución se vio favorecida en gran medida por la cantidad de semillas que porta cada fruto, así como por la larga viabilidad de estas (Nakasone, 1987; Agustí, 2014).

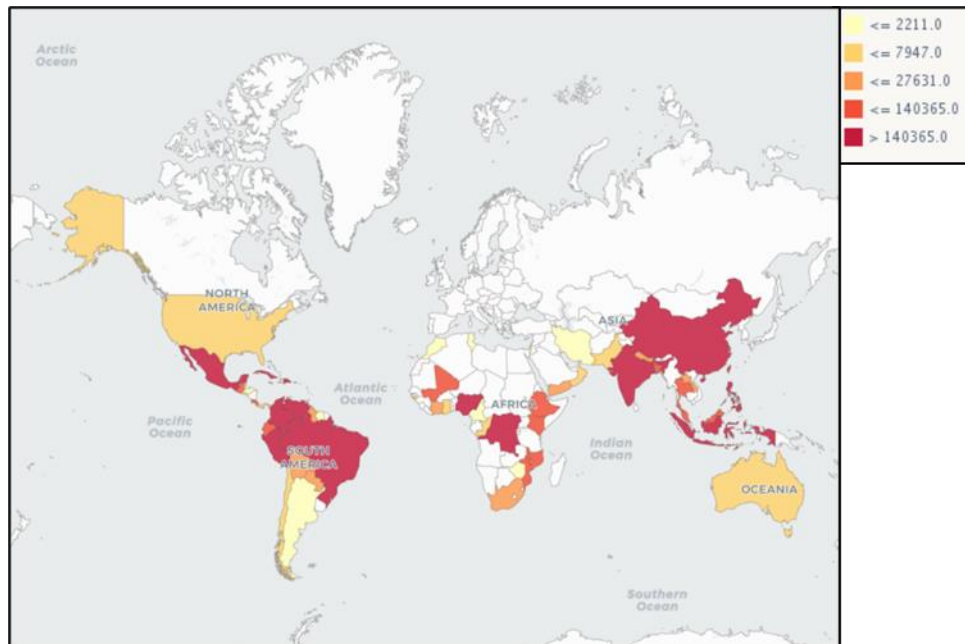


Figura 1: Mapa de producción (t) mundial de papaya por países en 2019. Adaptado de FAOSTAT (2021).

5.2. Importancia

La papaya es una de las frutas cultivadas más importante en zonas tropicales y subtropicales (Teixeira et al., 2007).

Principalmente se cultiva por el interés de su fruto, no obstante, en ciertas regiones se consumen otros órganos como las hojas jóvenes, con fines culinarios y medicinales, o las raíces y semillas en medicina popular (Aravind et al., 2013). El fruto maduro se consume como fruta fresca o platos preparados como ensaladas, también, el fruto sin madurar se emplea a modo de verdura. Como ocurre con muchas frutas, la papaya se procesa para elaborar postres, zumos o mermeladas (Villegas, 1991). También el látex es de interés, especialmente para la industria, tanto farmacéutica, como textil (para suavizar fibras) cervecera o de alimentación (para ablandar carne), entre otras (Toribio, 1969), ya que contiene enzimas proteolíticas, denominadas papaínas (Villegas, 1991).

La demanda de frutas tropicales se ha incrementado en las últimas décadas (Evans y Ballen, 2018). Aun así, la producción de papaya a nivel mundial es muy inferior a la producción de otras frutas tropicales como el plátano, el mango o la piña tropical, no llegando a alcanzar ni la mitad producida de esta última (**Figura 2**). La causa puede radicar en el carácter delicado y perecedero del fruto (Villegas, 1991), lo que provoca que pierda interés para los productores de zonas tropicales y subtropicales. Además, Nakasone (1987) y Villegas (1991) manifiestan que es probable que las estadísticas infravaloren la producción de papaya, ya que no se tiene presente las producciones de plantaciones secundarias y huertos familiares que no trascienden del mercado local.

No obstante, es un cultivo con grandes posibilidades en zonas tropicales y subtropicales, ya que en estas regiones vegeta adecuadamente y se caracteriza por un alto rendimiento productivo y bajos costes de explotación (Toribio, 1969).

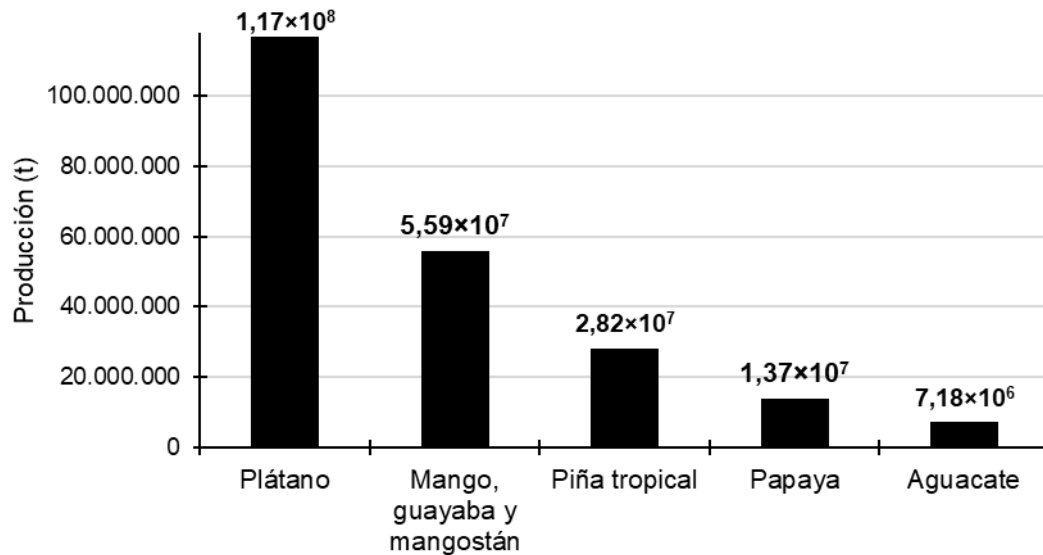


Figura 2: Producción mundial de frutas tropicales en 2019. Fuente: FAOSTAT, 2021.

5.2.1. Situación del cultivo en el mundo

Según la información recogida en la base de datos estadísticos de la FAO, la producción mundial en el año 2019 fue de más de 13,7 millones de toneladas, con una superficie cultivada de 460 000 ha aproximadamente. Como se observa en la **Figura 3** la producción mundial, de forma general, tiene un comportamiento claramente creciente a lo largo del tiempo, debido en gran parte a que cada vez más consumidores aprecian las propiedades nutritivas y medicinales del fruto, así como su sabor. Aparte de para suplir la demanda, la oferta está en constante aumento porque se trata de uno de los frutales más precoces del mercado (Alfonso, 2010), lo que lo hace muy interesante para los productores.

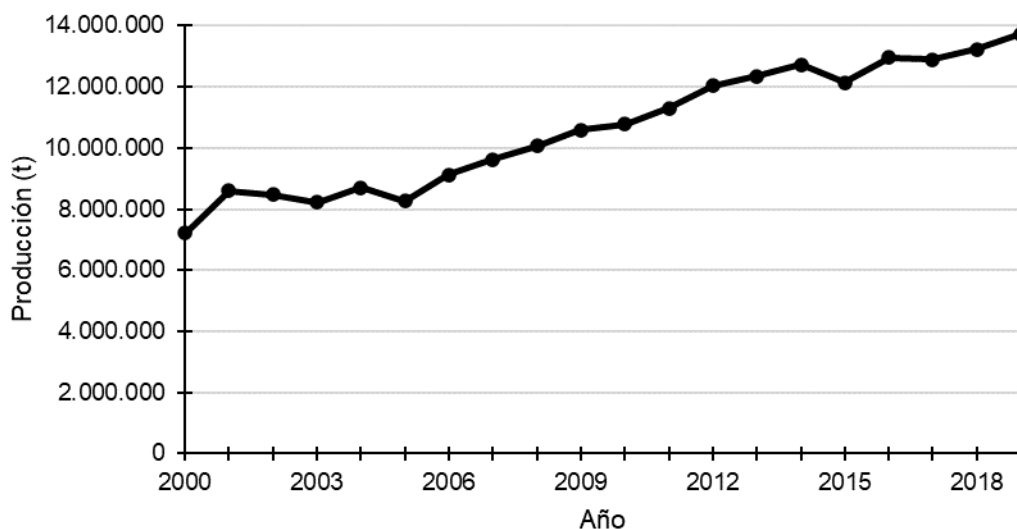


Figura 3: Producción mundial de papaya. Fuente: FAOSTAT, 2021.

La papaya se produce en más de 60 países, con la particularidad común de que la mayoría son naciones en vías de desarrollo (Evans y Ballen, 2018). El continente con más producción es Asia (**Figura 4**), constituyendo el 56,6 % del total mundial en 2019. Esto se debe en gran medida a India, que en el año 2019 produjo más de 6 millones de toneladas, superando notoriamente al segundo y tercer país en producción, República Dominicana y Brasil respectivamente, que produjeron algo más de 1,15 millones de toneladas cada uno en el mismo año (**Figura 5**). Que India produzca el 44 % de papaya mundial, se justifica por la ascendente demanda de una población en constante crecimiento y cuyos ingresos per cápita han aumentado. También, hay un incremento de interés por alimentos más saludables como es el caso de la papaya (The Hindu Business Line, 2018). Evans y Ballen (2018) complementan que la gran producción del país se debe al aumento del área sembrada, a las mejoras genéticas y a unas prácticas de manejo más desarrolladas. Sin embargo, a pesar de ser con diferencia el mayor productor, tan solo repercute en un 2,5 % de las exportaciones.

El país líder en exportación en 2019 fue México (44 %), destinándose prácticamente toda la producción a EE. UU. (FAO, 2020). De lejos le siguen Guatemala (17 %) y Brasil (12 %), según datos de la FAO (2021).

Por otro lado, EE. UU. acaparó más del 50 % de las exportaciones mundiales, seguido de El Salvador (6 %) y Singapur (6 %). EE. UU. se erige como el principal importador debido al elevado nivel de ingreso per cápita, así como por el considerable porcentaje de población asiática e hispana del país, que tradicionalmente son importantes consumidores de esta fruta (Evans y Ballen, 2018).

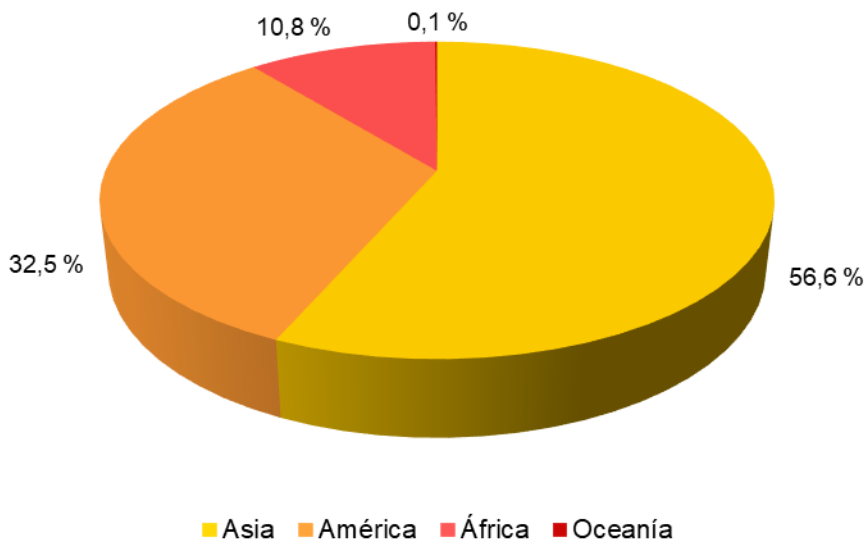


Figura 4: Porcentaje de producción de papaya por continentes en 2019. Fuente: FAOSTAT, 2021.

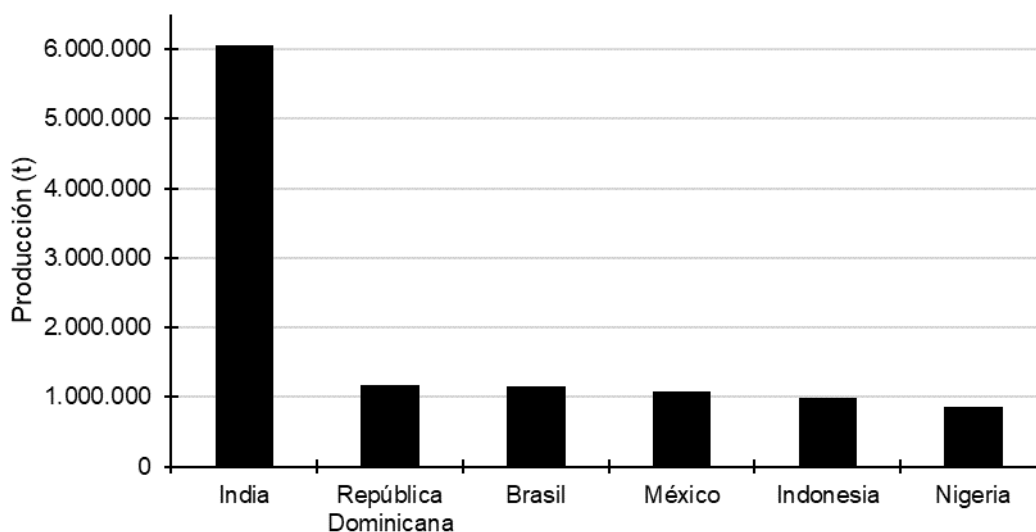


Figura 5: Producción de papaya en los principales países productores en 2019. Fuente: FAOSTAT, 2021.

5.2.2. Situación del cultivo en España

En España se ha dado un incremento de la superficie de papaya, debido a una creciente demanda del mercado europeo y por la posibilidad de ofrecer a dicho mercado un producto de calidad, con una adecuada madurez y a corta distancia con respecto a los grandes países exportadores (Salinas et al., 2017). De esta forma, España se ha convertido en el mayor productor de papaya en la Unión Europea (Cabrera et al., 2021), aunque Hueso (2014) asegura que es el único de esta región.

Según datos del MAPA (2020), España cuenta con una superficie cultivada de papaya de 388 ha, repartidas en tres comunidades autónomas, destacando Canarias con un 97 % del total del territorio español. El resto se localiza en la Comunidad Valenciana y Andalucía. La mayor parte de la superficie es bajo invernadero, ya que las condiciones climáticas son limitantes para un correcto desarrollo al aire libre (Salinas et al., 2017).

A pesar del interés que se está generando por la papaya en España, las producciones nacionales no cubren la demanda, por lo que se recurre a frutos de otras regiones (Salinas et al., 2017). Es por ello por lo que las importaciones han ido en aumento desde el año 2015 hasta el 2019, que se adquirió 9600 t, un aumento del 40,5 %.

En 2019, España exportó casi 3900 t, lo que supone aproximadamente un 1 % del total mundial.

5.2.3. Situación del cultivo en Canarias

La papaya es conocida en las Islas Canarias desde hace más de 200 años. De forma tradicional, ha sido cultivada en bordes de plantaciones de platanera y, con frecuencia, se hallan en muchos jardines particulares (Rodríguez et al., 1995). En la década de los 90, el cultivo de la papaya en las islas adquirió importancia, debido fundamentalmente a que hubo un incremento de la demanda interna, provocando una tecnificación del sector y un cambio varietal principalmente del grupo Solo, con posterior inclusión de plantas de tipo Formosa. Asimismo, el cultivo se vio favorecido por la crisis que se dio en el subsector hortícola y florícola, especialmente en el cultivo del tomate, que fue de gran importancia en las islas, por lo que las infraestructuras de estas explotaciones se aprovecharon, produciéndose así, un cambio en la orientación productiva hacia la papaya (Méndez, 2001; Hueso, 2014). Además, según García y Acosta (2015), la superficie ha seguido incrementándose por la aparición de nuevos cultivares con un alto potencial productivo, que ha favorecido el desarrollo de canales de comercialización entre las islas y el mercado peninsular, e incluso europeo.

Como se mencionó anteriormente, España es el mayor productor de papaya en la Unión Europea, siendo Canarias la región protagonista en producción, con un 97 % del total nacional. No obstante, la producción canaria no es capaz de mantener un volumen de producto estable durante todo el año para abastecer los mercados europeos (Hueso, 2014).

Según Cabrera et al. (2021), en los subtrópicos, es recomendable producir papaya bajo estructuras que permitan modificar las condiciones ambientales, como invernaderos, ajustándolas a los requerimientos del cultivo para obtener una producción óptima y de calidad. Esto se ve reflejado en los datos de 2019 del ISTAC, donde un 94 % del total de la superficie cultivada (298 ha) fue bajo invernadero. En ese mismo año, la producción de las islas fue de casi 15 500 t,

concentrándose mayoritariamente en dos islas, Tenerife (56 %) y Gran Canaria (38 %).

5.3. Clasificación taxonómica

La papaya es una planta herbácea perteneciente al filo Tracheophyta, clase Magnoliopsida y orden Brassicales (GBIF, 2021). Propia de la pequeña familia botánica Caricaceae, la cual engloba unas 35 especies de plantas herbáceas en seis géneros, *Carica*, *Jarilla*, *Horovitzia*, *Jacaratia*, *Vasconcellea* y *Cylicomorpha* (Badillo, 1993), originarios del continente americano a excepción de *Cylicomorpha*, propio de África ecuatorial (Badillo, 1993) o África occidental según Scheldeman et al. (2011). Concretamente, *Vasconcellea* y *Jacaratia* son géneros predominantemente de América del Sur, mientras que *Horovitzia* y *Jarilla* de Centroamérica (Badillo, 1993).

De estos géneros, destaca *Carica* que comprende una única especie, la más importante tanto agronómica como económicamente, *Carica papaya*. El género *Carica* ha estado integrado en otras familias erróneamente como Passifloraceae, Cucurbitaceae, Bixaceae o Papayaceae (Teixeira et al., 2007). Asimismo, se incluían en este género otras especies, hasta que se rehabilitó el género *Vasconcellea*, que estaba integrado dentro de *Carica* (Moore, 2014).

5.4. Descripción botánica

Los componentes de la familia Caricaceae se caracterizan por ser plantas de porte arbóreo escasamente ramificado (Ibar, 1986; Scheldeman et al., 2011), rara vez de porte herbáceo. Las hojas son alternas, normalmente dispuestas en espiral y reunidas en el extremo del tronco, palmatipartidas, pecioladas y sin estípulas, aunque en ciertos casos están presentes en forma de espina (Guzmán, 1998; Scheldeman et al., 2011). Las flores pueden ser solitarias o en inflorescencias cimosas, raramente son hermafroditas y predominan las especies dioicas (Scheldeman et al., 2011). La flor típica es actinomorfa, presenta cinco sépalos y pétalos; las pequeñas flores masculinas presentan una corola largamente tubular y diez estambres unidos a esta, mientras que las femeninas tienen una corola tubular corta, ovario súpero unilocular con entre tres y cinco carpelos y un estilo corto coronado por cinco estigmas (Ibar, 1986; Scheldeman et al., 2011).

Los frutos de las caricáceas son bayas y las semillas están cubiertas por una capa gelatinosa denominada sarcotesta, el embrión es plano y el endospermo graso (Scheldeman et al., 2011). Otra característica de la familia es que las plantas segregan látex (Ibar, 1986), que en el caso de *C. papaya* es de consistencia fluido y lechoso (FAO, 1987) y puede ser muy irritante al contactar con la piel.

La papaya se ha descrito con variedad de adjetivos. Algunos autores la clasifican como una especie arbórea (Ibar, 1986; FAO, 1987; Guzmán, 1998), otros como arbustiva (Toribio, 1969; Alfonso, 2010), e incluso como una hierba semileñosa

(Villegas, 1991; Teixeira et al., 2007). Lo que sí es evidente es su consistencia herbácea (Agustí, 2014; Kumari y Mishra, 2019), además de su rápido crecimiento (Ibar, 1986; FAO, 1987; Villegas, 1991; Guzmán, 1998; Teixeira et al., 2007, Salinas et al., 2017) que, según Paterson et al. (2008) tan solo requiere de tres a ocho meses entre germinación y floración, y de nueve a quince meses para completar una generación, es decir, para que de una semilla se obtenga otra.

Según Toribio (1969), la planta puede vivir entre siete y quince años. No obstante, en plantaciones comerciales solo permanece los primeros dos (Toribio, 1969) o tres años (Hueso et al., 2015), cuando su productividad es rentable desde el punto de vista económico.

5.4.1. Raíces

El sistema radicular es fibroso y presenta una raíz pivotante principal, que según Agustí (2014) puede profundizar entre 3 – 4 m, mientras que Jiménez et al. (2014) anotan que pueden ser hasta dos raíces principales que se desarrollan de 0,5 a 1 m en profundidad. La raíz principal proporciona a la planta una firme sujeción al sustrato (Guzmán, 1998).

De la parte superior de la raíz o raíces principales, se ramifican notablemente y de forma radial las raíces secundarias (**Figura 6**), que se desenvuelven a poca profundidad, encontrándose el mayor volumen en la franja superficial del sustrato (FAO, 1987; Jiménez et al., 2014), entre 30 y 50 cm de profundidad (Agustí, 2014). No obstante, Alfonso (2010) declara que la mayor concentración de raíces absorbentes se encuentra en los primeros 20 cm. A su vez, de estas raíces secundarias emergen gran cantidad de raicillas menores (Guzmán, 1998).

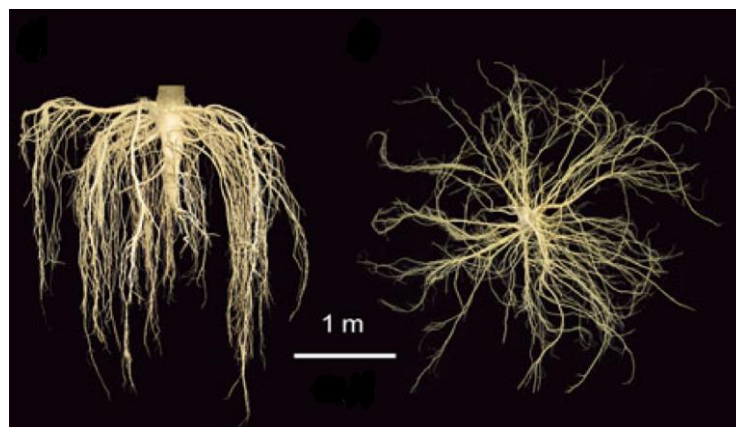


Figura 6: Vista lateral (izquierda) y en planta (derecha), donde se aprecia la disposición radial de una raíz de papaya de 5 meses de edad. Adaptado de Jiménez et al. (2014).

Son flexibles y exhiben un color blanco cremoso (FAO, 1987; Jiménez et al., 2014). Carneiro y Cruz (2009) señalan que las raíces son los únicos órganos de la planta que no presentan laticíferos, por lo que no segregan látex.

5.4.2. Tallo

El tallo de *Carica papaya* es recto, cilíndrico (Guzmán, 1998; Kumari y Mishra, 2019) y generalmente desnudo (FAO, 1978). Proporciona a la planta soporte estructural, capacidad competitiva con otras plantas y de almacenamiento de reservas, además de ser el medio de transporte de agua y nutrientes entre hojas y raíces (Jiménez et al., 2014).

Como se observa en la **Figura 7**, el tallo inicialmente es macizo debido a que presenta una médula bien desarrollada. Progresivamente se va formando una cavidad interna a causa de la disolución de la médula (Jiménez et al., 2014). Por lo tanto, los tallos acaban siendo huecos, con excepción de los nudos donde se mantiene parte de la médula (Alfonso, 2010), como se observa en la **Figura 8**.

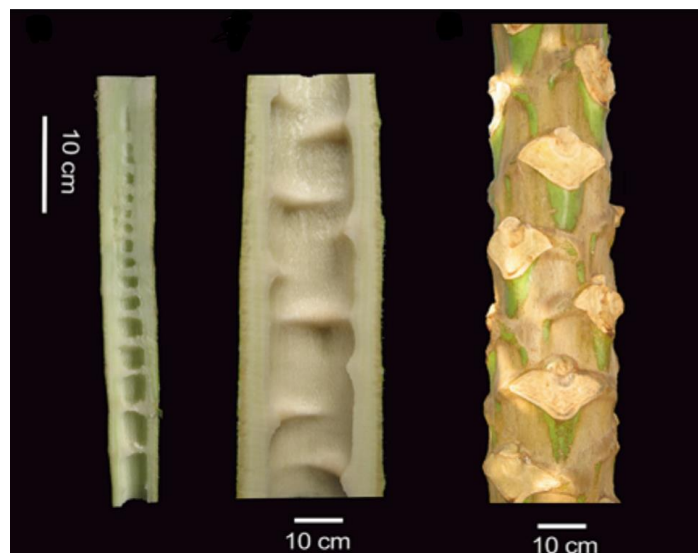


Figura 7: De izquierda a derecha: corte longitudinal de un tallo de 3 meses de edad; corte longitudinal y vista lateral de un tallo de 1 año. Adaptado de Jiménez et al. (2014).

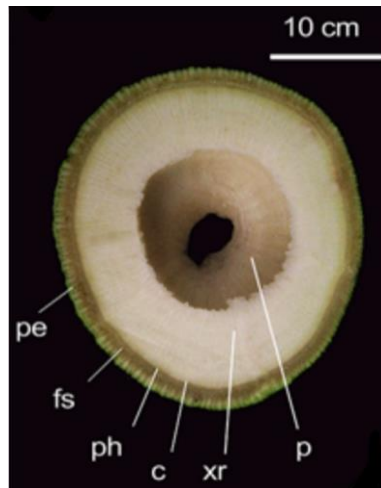


Figura 8: Corte transversal de un tallo de 1 año. Partes: peridermis (pe), revestimiento de fibras (fs), floema (ph), cambium (c), rayos del xilema (xr) médula (p). Adaptado de Jiménez et al. (2014).

Muchos autores exponen que las plantas adultas pueden alcanzar hasta 10 m de altura (FAO, 1978; Villegas, 1991; Guzmán, 1998; Alfonso, 2010; Jiménez et al., 2014; Kumari y Mishra, 2019), mientras que Agustí (2014) afirma que puede llegar hasta los 20 m, con diámetros en la base que varían de 10 a 30 cm (Villegas, 1991; Alfonso, 2010; Jiménez et al., 2014) y de 5 a 10 cm en la copa (Jiménez et al., 2014). Sin embargo, en los actuales cultivos las plantas no superan los 5 o 6 m (Jiménez et al., 2014).

Villegas (1991) define el tejido como fibroso – esponjoso, mientras que Ibar (1986) y Guzmán (1998) describen que tiene un carácter más carnosos que leñoso, que se endurece conforme a su crecimiento (Guzmán, 1998). La corteza es de un tono verde claro que se va tornando a verde grisáceo (Agustí, 2014).

De forma general, es un eje simple con una notable dominancia apical, sin ramificaciones, no obstante, si el meristemo apical se retira o sufre lesiones, se podrán producir ramificaciones (Villegas, 1991; Guzmán, 1998; Teixeira et al., 2007). También, de forma ocasional surgen pequeñas ramificaciones en la zona inferior del tallo tras un crecimiento vegetativo vigoroso, que puede inducir los brotes axilares (Jiménez et al., 2014). El tronco finaliza en una vistosa corona de hojas (Ibar, 1986; Guzmán, 1998; Agustí, 2014; Kumari y Mishra, 2019).

Una característica de esta planta es las cicatrices que van dejando los peciolos foliares y las flores al caer, dando un aspecto rugoso y particular al tallo, como se puede apreciar en la **Figura 7** (Kumari y Mishra, 2019). También hay que destacar que la conformación del tallo es muy inusual, pues la “madera”, es producto en gran parte del floema, otorgando así rigidez a la planta. Sin embargo, el desarrollo del xilema secundario es escaso, característica que comparte con el género *Vasconcellea* (Scheldeman et al., 2011).

5.4.3. Hojas

La papaya es una planta perennifolia (Agustí, 2014), que porta grandes hojas simples, dispuestas alternamente (FAO, 1987; Alfonso, 2010; Agustí, 2014), de entre 25 a 75 cm de diámetro (Villegas, 1991; Guzmán, 1998; Alfonso, 2010), con una superficie aproximada de 0,6 m² (Jiménez et al., 2014).

Los márgenes son característicamente palmatipartidos con 7 a 11 lóbulos también pinnados (Villegas, 1991; Guzmán, 1998), aunque otros autores mencionan de 5 a 9 lóbulos (Jiménez et al., 2014), o incluso, hasta 13 (FAO, 1987). En la **Figura 9** se aprecia la morfología de una hoja de papaya: presentan un color verde uniforme en el haz y verde blancuzco en el envés (FAO, 1987), nervaduras muy destacadas (Villegas, 1991; Guzmán, 1998; Agustí, 2014) y son glabras (Villegas, 1991).

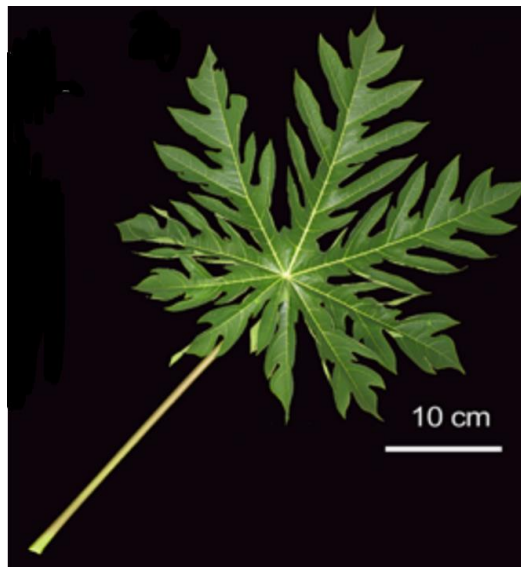


Figura 9: Lámina foliar típica y peciolo. Adaptado de Jiménez et al. (2014).

Las láminas foliares, están sostenidas por largos peciolo cilíndricos y huecos en su interior, que alcanzan hasta 100 cm de longitud (Villegas, 1991; Jiménez et al., 2014), o 125 según Alfonso (2010). Son rectos o ligeramente curvados de forma ascendente en la zona distal (Guzmán, 1998) y de color verde o verde violáceo (Villegas, 1991; Alfonso, 2010). Se emplazan siguiendo un patrón en espiral (Villegas, 1991; Teixeira et al., 2007; Jiménez et al., 2014) con una filotaxia 3/8 (Escamilla et al., 2003), como se puede apreciar en las cicatrices que dejan al desprenderse del tallo en la **Figura 7**.

Como se citó en el apartado anterior **Tallo**, las hojas se concentran en el ápice, formando una corona de unas 30 hojas funcionales en plantas adultas. Se considera que el número mínimo de hojas para que se desarrolle bien una planta es de 15 (Alfonso, 2010). Cada hoja emitida supondrá una flor en su axila y si las condiciones son favorables, un fruto.

5.4.4. Flores

Rodríguez et al. (1995) y Hueso et al. (2015) clasifican a *C. papaya* como una especie trioica, ya que presenta plantas con tres tipos sexuales diferenciados, habiendo pies con flores estrictamente femeninas (ginoicos), pies con flores predominantemente masculinas (androicos) y pies con flores bisexuales (hermafroditas). Por otro lado, Jiménez et al. (2014) concretan que la papaya tiene tres formas sexuales, pero que las plantas pueden ser dioicas o andromonoicas, es decir, pies con flores masculinas y femeninas, o pies con flores hermafroditas y masculinas, respectivamente. Finalmente, otros autores como Guzmán (1998) y Agustí (2014) catalogan esta especie como dioica, aunque haya plantas hermafroditas.

El sexo de las flores está controlado genéticamente por un sistema de cromosomas X/Y, siendo el Y el responsable del desarrollo de flores masculinas o bisexuales, según una pequeña región específica que posee (Jiménez et al., 2014; Hueso et al., 2015). Sin embargo, las condiciones medioambientales como la temperatura o la humedad del suelo pueden provocar variaciones en la expresión de los caracteres sexuales, traduciéndose en cambios temporales del sexo de las flores (Rodríguez et al., 2015).

En un principio, habría tres tipos florales:

- Tipo I, femeninas o pistiladas: se agrupan en inflorescencias cimosas (**Figura 10**), carecen de estambres y presentan un ovario formado a partir de cinco carpelos soldados, que dan lugar a una cavidad unilocular. Es súpero, ovoide y algo cónico, finalizando en un estigma pentalobulado. El cáliz es corto, con cinco sépalos, y la corola está formada por cinco pétalos separados en su parte superior y soldados en la base del ovario, de color blanco amarillento o crema. El pedúnculo es corto, entre 4 y 6 cm (FAO, 1987; Guzmán, 1998; Agustí, 2014; Jiménez et al., 2014; Hueso et al., 2015) (**Figura 11**).



Figura 10: Inflorescencias de papaya. De izquierda a derecha: inflorescencia masculina con docenas de flores estaminadas; inflorescencia cimosa con flor elongada dominante y cinco

estaminadas secundarias; e inflorescencia cimosa con tres flores pistilada, la central dominante. Adaptado de Jiménez et al. (2014).

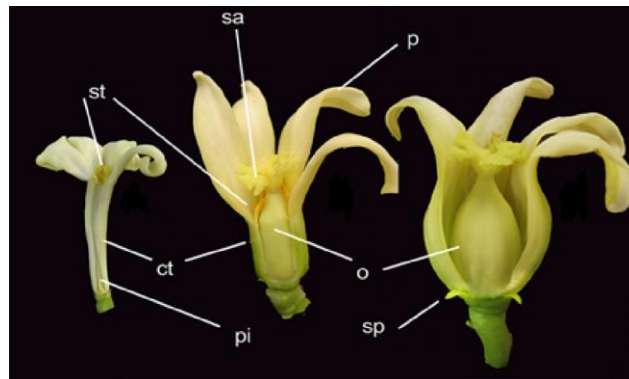


Figura 11: Flores de papaya con un pétalo retirado. De izquierda a derecha: flor estaminada; flor elongata; y flor pistilada. Partes: estambres (st), tubo de la corola (ct), pistiloidio (pi), estigmas (sa), pétalos (p), ovario (o) y sépalos (sp). Adaptado de Jiménez et al. (2014).

- Tipo II, masculinas o estaminadas: las flores se agrupan en gran cantidad, en inflorescencias de tipo racimo, indeterminadas con largos pedúnculos como se aprecia en la **Figura 10**. Son sésiles y presentan corola tubular, formada por cinco pétalos soldados de color blanco cremoso, amarillo o verdoso. Carecen de ovario, aunque presentan un pistilo rudimentario o pistiloidio y tienen diez estambres en dos series soldados en el interior de la corola (FAO, 1987; Guzmán, 1998; Agustí, 2014; Hueso et al., 2015) (**Figura 11**). En algunos casos, debido a causas genéticas o ambientales, normalmente debido a temperaturas bajas, algunas flores pueden presentar pistilos bien desarrollados, resultando en flores hermafroditas con fenotipo general masculino (Jiménez et al., 2014). Por lo tanto, esta característica, permite el desarrollo de unos pequeños frutos al final de las inflorescencias, alejados del tronco (Scheldeman et al., 2011).
- Tipo III, elongata o perfecta: se trata de flores dispuestas en inflorescencias cimosas cortas, en las que dominan una o dos de este tipo y otras secundarias estériles, aunque, como la proporción del tipo de flor depende de factores genéticos y ambientales, las inflorescencias pueden estar compuestas desde flores elongatas en su totalidad a flores estériles en su totalidad (Guzmán, 1998) (**Figura 10**). Las flores son alargadas y cilíndricas. Tienen diez estambres dispuestos en dos series y fusionados en la base, cinco antesépalos y cinco antepétalos, y un ovario cilíndrico, alargado y, al igual que las de tipo I, súpero, compuesto por cinco carpelos. Tienen aspecto tubular, son de menor tamaño que las pistiladas y presentan un estrechamiento en la zona media. Los cinco pétalos se sueldan en más de un tercio de su longitud desde la base (Guzmán, 1998; Jiménez et al., 2014; Hueso et al., 2015) (**Figura 11**).

No obstante, y como se comentó anteriormente, pueden surgir otros tipos por efecto de diferentes condiciones medioambientales.

En el caso de pies hermafroditas, debido a la disminución de la temperatura durante la formación de la flor, normalmente por debajo de 20 °C, las flores bisexuales sufren una modificación (Rodríguez et al., 1995). Jiménez et al. (2014) añaden que factores genéticos, así como la elevada humedad del suelo y un exceso de nitrógeno, también pueden favorecer esta situación. El resultado es otro tipo floral:

- Tipo IV, carpeloides: inicialmente son flores bisexuales, pero por el efecto de las bajas temperaturas, presentan de 6 a 9 estambres funcionales y el ovario irregularmente rugoso por la fusión de los estambres restantes, dando lugar a flores deformes (Hueso et al., 2015) (**Figura 12**).



Figura 12: Flores de papaya con algún pétalo retirado. De izquierda a derecha: flor carpeloide con un estambre soldado al ovario; flor carpeloide con dos estambres soldados al ovario; y flor pentándrica. Adaptado de Jiménez et al. (2014).

En casos más severos, con temperaturas aún más bajas, especialmente si son nocturnas, se puede dar el fenómeno de pentandría (Guzmán, 1998), que da lugar a otro tipo floral:

- Tipo V, pentándricas: los cinco estambres antepétalos se transforman en carpelos, dando como resultado una flor similar a la de tipo I, con un ovario globoso con cinco surcos pronunciados y distribuidos de forma regular en este, debido a la fusión de los estambres. Los pétalos son libres casi en toda su longitud (Jiménez et al., 2014; Hueso et al., 2015) (**Figura 12**).

Por otro lado, con altas temperaturas, generalmente por encima de 35 °C, por situaciones de estrés hídrico, o por escasez de nitrógeno, las flores hermafroditas sufren un proceso de esterilidad femenina (Jiménez et al., 2014; Hueso et al., 2015):

- Tipo VI, pitillos: tras la transformación, la flor cuenta con diez estambres funcionales, pero con un pistilo rudimentario que carece de estigma, por lo que no producirá frutos dando lugar a huecos productivos (Hueso et al., 2015). Jiménez et al. (2014) subrayan que este proceso es progresivo por lo que hay diferentes grados de masculinización, empezando por reducción del ovario o del número de carpelos (**Figura 13**).



Figura 13: Flores de papaya con algún pétalo retirado. De izquierda a derecha: flor elongata con los cinco carpelos, reducción progresiva de los carpelos como resultado de esterilidad femenina parcial, flor con esterilidad femenina completa (última). Adaptado de Jiménez et al. (2014).

En cuanto a la polinización hay que discernir entre flores femeninas o hermafroditas. Como las flores femeninas no producen polen, requieren de este ya sea de flores masculinas o hermafroditas, para ello precisan del viento o insectos polinizadores, principalmente mariposas nocturnas (Hueso et al., 2015). Jiménez et al. (2014) también mencionan la participación de abejas, dípteros, coleópteros e incluso colibrís. No obstante, los frutos tienen un elevado potencial partenocárpico, es decir que pueden desarrollarse sin polinización ni fecundación. Por otro lado, las flores hermafroditas presentan mayoritariamente autogamia, por lo que las anteras de una misma flor son dehiscentes y liberan el polen en su propio estigma, dándose la autopolinización, por tanto, no requieren de vectores de polinización (Hueso et al., 2015).

5.4.5. Frutos

Como ya se ha hecho referencia anteriormente, la papaya es uno de los frutales más precoces que hay, ofreciendo las primeras cosechas sin haber llegado al año de edad (Kumari y Mishra, 2019).

Al igual que hay una amplia tipología de flores, también la hay de frutos, presentando unas características morfológicas diferentes según el tipo de flor del que provengan (Rodríguez et al., 1995). Pueden tener forma de melón, esférica, piriforme, oval o alargada. Asimismo, el tamaño también varía, desde 250 g hasta 6 kg en algunos casos (Agustí, 2014).

Botánicamente se clasifica como baya y de forma general, está compuesto por cinco carpelos que al unirse forman una cavidad central donde, si se ha producido fecundación, se alojan las semillas (Agustí, 2014; Jiménez et al., 2014). La pulpa es aromática, jugosa y blanda (FAO, 1987), y su color varía desde amarillo hasta rojo, siendo el naranja – rojizo el preferido por los consumidores. Cuanta más temperatura y luminosidad reciba la planta, más rojiza será la pulpa.

Para una mejor comprensión, se describirán los tipos de frutos de forma independiente y su valor comercial:

- Tipo I, procedente de flor pistilada: generalmente son esféricos, globosos, oblongos o ligeramente ovoides y con una gran cavidad interna con pocas o ninguna semilla, que ocupa la mayor parte del volumen del fruto (Agustí, 2014; Hueso et al., 2015). Este último hecho, provoca que no sean muy apreciados comercialmente, sobre todo para exportación, ya que ocupan mucho espacio y pesan poco, lo que se traduce en una disminución del beneficio del productor respecto a otro tipo de frutos. En algunos países se comercializan como *papaya seedless*, aunque las ventajas de los frutos partenocárpicos son dudosas, ya que las semillas de la fruta son fáciles de retirar y los embriones que quedan adheridos en la fruta partenocárpica son amargos, siendo necesario retirarlos (Hueso et al., 2015). Normalmente, estos frutos se comercializan en el mercado local, donde suelen tener buena aceptación (**Figura 14**).



Figura 14: Vista en planta y corte transversal de frutos de papaya. De arriba abajo: fruto procedente de flor elongata; fruto procedente de flor pistilada; y fruto procedente de flor carpeloide con leve deformación. Adaptado de Jiménez et al. (2014).

- Tipo II, procedente de flor estaminada alterada a hermafrodita: como se mencionó en **Flores**, a veces en las plantas androicas o andromonoicas, debido a factores genéticos o ambientales, las flores masculinas se transforman en hermafroditas, pudiendo dar lugar a unos frutos deformados, similares a un pepino y que cuelgan de un largo pedúnculo (Scheldeman et al., 2011). Carecen de cualquier valor comercial.
- Tipo III, procedente de flor elongata: normalmente los frutos son piriformes, con una cavidad menor que las de tipo I y ocupada por gran cantidad de semillas (**Figura 14**). Hueso et al. (2015) destacan que estos frutos son los más demandados por el mercado.



- Tipo IV, procedente de flor carpeloide: el fruto presenta el mismo aspecto que el ovario de la flor. Hueso et al. (2015) lo describen como un tronco de cono en su tercio basal y el resto es una media esfera, o hueco con lóbulos, o surcos longitudinales, dando como resultado un aspecto característico. En definitiva, son frutos totalmente deformados que no son comerciales (**Figura 14**).
- Tipo V, procedente de flor pentándrica: los frutos se parecen a los de tipo I, grandes y globosos, salvo que presentan cinco surcos notablemente marcados y dispuestos de forma regular en el fruto. También son poco apreciados comercialmente (Hueso et al., 2015).

Muchos autores destacan las propiedades nutritivas del fruto. En el **Cuadro 1** se recogen valores típicos de la composición nutricional de la papaya.

Cuadro 1: Principales parámetros nutricionales de la papaya, según datos de la Fundación Española de la Nutrición (FEN) y del Departamento de Agricultura de EE. UU. (USDA) por cada 100 g de fruta.

Parámetro	Unidad	FEN	USDA
Agua	g	88,30	88,10
Energía	kcal	43,00	43,00
Proteínas	g	0,50	0,47
Grasas	g	0,10	0,26
Hidratos de carbono	g	8,80	10,8
Azúcares	g	8,80	7,82
Fibra	g	2,30	1,70
Calcio	mg	23,00	20,00
Potasio	mg	200,00	182,00
Fósforo	mg	13,00	10,00
Vitamina C	mg	60,00	60,90

Del **Cuadro 1** se extraen algunas conclusiones respecto a esta fruta:

- Considerando que el porcentaje de agua de las frutas oscila entre 80 y 91 % (Arroyo et al., 2018), se puede estimar que el contenido de agua de la papaya es elevado (88,1 – 88,3 %). No obstante, su poder energético es muy bajo (43 kcal) respecto a otras frutas.
- También, presenta un bajo contenido de hidratos de carbono (8,8 – 10,8 g), compuestos principalmente por glucosa y fructosa (USDA, 2019).
- De forma general, el contenido proteico de las frutas es bajo, entre 1 – 1,5 % (Arroyo et al., 2018), pero en el caso de la papaya lo es aún más con aproximadamente 0,5 g por cada 100.

- Asimismo, las frutas, salvo excepciones, no se caracterizan por su contenido graso, suelen tener valores entre 0,1 y 0,6 % (Arroyo et al., 2018). La papaya pertenece al límite inferior de este rango.
- Es medianamente rica en fibra (1,7 – 2,3 %), pues el contenido general de las frutas va desde 0,4 a 3 %.
- Los minerales más destacables de las frutas son el potasio y el fósforo (Arroyo et al., 2018). La papaya no predomina en ninguno de los dos casos respecto a otros frutos.
- Es muy rica en vitamina C, con hasta 60 mg por cada 100 g, estando por debajo de unas pocas que la superan como la guayaba o el lichi.

5.4.6. Semillas

Como se mencionó en el apartado **Frutos**, la pulpa del fruto rodea una cavidad grande donde se aloja un gran número de semillas (Ibar, 1986) adheridas formando largas hileras (Agustí, 2014) por un tejido fibroso y grueso, de color blanquecino a amarillo en las semillas más maduras, denominado funículo (Gil y Miranda, 2005; Teixeira et al., 2007). Según Jiménez et al. (2014) cada fruto puede albergar hasta 600 semillas o más, mientras que Alfonso (2010) especifica que entre 300 y 800. En la **Figura 14** se aprecia la gran cantidad de semillas que tienen los frutos.

El tamaño de las semillas viene dado por la posición que ocupan estas dentro del fruto, así como por los nutrientes que reciban durante su formación y desarrollo. Se consideran semillas pequeñas (**Figura 15**), con un diámetro que va de 4 a 6 mm (Gil y Miranda, 2005), aunque de forma general distintos autores aproximan un valor de 5 mm de diámetro (Villegas 1991; Guzmán, 1998; Teixeira et al., 2007). Tienen forma ovoide y lucen un color marrón oscuro en la madurez (Gil y Miranda 2005) o negro (Ibar, 1986; FAO, 1987; Agustí, 2014; Jiménez et al., 2014).

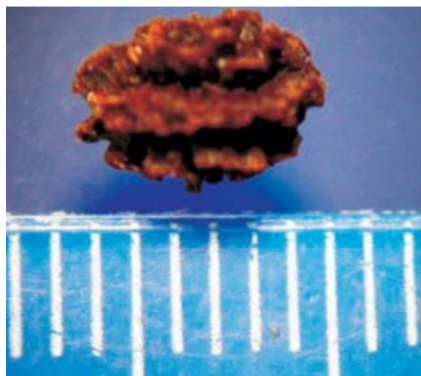


Figura 15: Semilla madura de papaya junto a cinta milimetrada. Obtenido de Gil y Miranda (2005).

Como en todas las angiospermas, las semillas de la papaya pueden dividirse en tres partes, diferenciadas por su origen genético: la cubierta seminal, el endospermo y el embrión (Ingram, 2010). De la cubierta seminal destaca un revestimiento de consistencia carnosa o gelatinosa, jugosa y de color anaranjado traslúcido, denominada sarcotesta (**Figura 16**) (Fisher, 1980; Gil y Miranda, 2005; Alfonso, 2010), que rodea a la mesotesta que es oscura, dura y consta de una serie de crestas longitudinales y esponjosas que proporcionan un aspecto rugoso a esta capa como se aprecia en la **Figura 15** (Fisher, 1980; Gil y Miranda, 2005). Bajo la cubierta seminal se halla el endospermo, que es entero, de superficie lisa y consistencia carnosa (Gil y Miranda, 2005), que a su vez rodea a un embrión (**Figura 17**) con forma de espátula, recto, con cotiledones ovoides y planos (Fisher, 1980; Gil y Miranda, 2005).

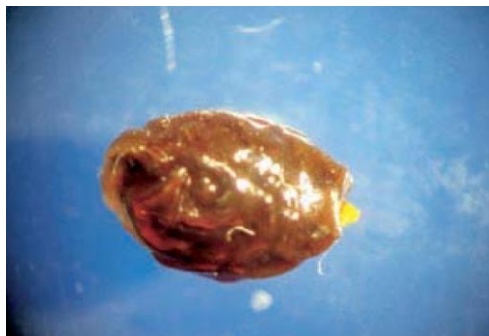


Figura 16: Semilla de papaya con sarcotesta. Obtenido de Gil y Miranda (2005).

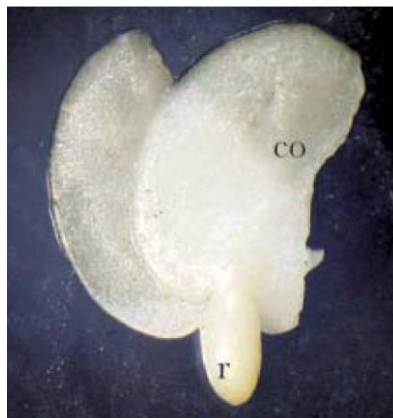


Figura 17: Embrión de una semilla de papaya. Partes: cotiledón (co) y radícula (r). Obtenido de Gil y Miranda (2005).

5.5. Material vegetal: tipos y cultivares

Existe una gran diversidad de variedades de papayas en el mundo, debido al carácter sexual de la propagación de esta especie y a la facilidad de cruzamiento. Por ello, cada zona de cultivo presenta un material genético adaptado a sus condiciones climatológicas. Sin embargo, estas variedades normalmente son muy inestables (Ibar, 1986), por lo que en las producciones comerciales es



preciso emplear material certificado del que se conozcan todas sus características y que tenga aceptación asegurada en el mercado. Teixeira et al. (2017) exponen que el éxito comercial de un producto depende notablemente de ajustarse y satisfacer las demandas de los consumidores. La predilección actual de estos en cuanto a papayas, se basa en frutos de pequeño tamaño y forma alargada, sin despreciar otros componentes importantes como la calidad o la presencia de carotenoides, que brindan a la pulpa color rojizo.

Las plantas comerciales de papaya pueden ser cultivares o híbridos, la diferencia entre ambas radica en que las primeras no tienen patente y las segundas sí. Asimismo, se pueden dividir en tres grandes grupos o tipos:

- Tipo Solo o Hawaiano: procedentes de Hawái, tras haber sido introducidas en 1911 desde las Islas Barbados (Agustí, 2014). Este grupo lo representan variedades de líneas puras, que se caracterizan por producir frutos de poco tamaño, con un peso entre 350 y 700 g (Salinas et al., 2017). Presentan forma aplanada y son muy aromáticos. Uno de sus principales defectos es la sensibilidad que poseen las plantas frente al oídio (*Oidium caricaceae*). Algunos de los cultivares más importantes son:
 - ‘Sunrise Solo’ (Salinas et al., 2017): la longitud de los entrenudos de las plantas es mayor que en otros cultivares del mismo tipo, favoreciendo así que haya 2 – 3 frutos por pedúnculo y que no se produzcan daños por rozamiento. Las primeras flores se desarrollan a 80 cm del suelo, lo cual facilita la recolección. El fruto presenta un peso adecuado para la exportación, entre 400 y 500 g y un alto porcentaje de sólidos solubles totales (Rodríguez et al., 1995).
 - ‘Baixinho de Santa Amalia’ (García, 2013): originada por una mutación de ‘Sunrise’ en Brasil, se caracteriza por un porte bajo, entrenudos cortos y las flores aparecen a 50 – 70 cm del suelo. Los frutos son de unos 550 g, con pulpa rojo – anaranjada (Rodríguez et al., 2010).
 - ‘BH – 65’ (García, 2013): selección de origen sudafricano a partir del cultivar anterior. Presenta un porte bajo, entrenudos cortos y flores a partir de 40 – 60 cm del suelo. Produce frutos de unos 450 g (Rodríguez et al., 2010).
 - ‘Sunset’ (Alonso et al., 2008): frutos de 370 a 430 g, de pulpa con un color naranja pálido y de forma oblongo – alargado (Alonso et al., 2008).
 - ‘Golden’ (Salinas et al., 2017): los frutos pesan entre 440 y 550 g, la pulpa es naranja pálido y presenta forma piriforme – elongada. Destaca por su alto contenido en sólidos solubles totales (13,3 °Bx) (Alonso et al., 2008).
- Tipo Formosa o Cubano: las plantas de este grupo se caracterizan por producir frutos de gran tamaño, de entre 1 a 5 kg de peso. Son alargados y no presentan aroma. Las plantas son más rústicas, tolerantes a *Oidium caricaceae*, pero tienen un gran problema de poscosecha debido a la enfermedad antracnosis provocada por *Colletotrichum gloeosporioides*.



- La fruta de este tipo suele destinarse a los mercados locales (Salinas et al., 2017), y destaca el cultivar Maradol.
- ‘Maradol’: originario de Cuba (Nakasone, 1983), es de porte bajo y entrenudos cortos. Presenta frutos de 1,5 a 2,6 kg, de pulpa color salmón, firme y consistente (Rodríguez, s. f.).
 - Híbridos: son cruces que buscan combinar las mejores características de ambos tipos. En la actualidad existe una amplia variedad, algunos de ellos son:
 - ‘Red Lady’ (Mejía y Vides, 2018): porte alto y entrenudos cortos. La floración se produce a 60 – 80 cm del suelo y los frutos oscilan entre 1,5 y 2 kg (Rodríguez, s. f.).
 - ‘Intenza’ (García, 2013): porte alto y muy productiva, proporciona fruta de calidad, con un contenido de azúcar en torno 12 °Bx, pulpa roja y peso entre 1,2 y 1,7 kg (Rodríguez, s. f.).
 - ‘Sensation’ (García, 2013): porte alto, frutos de 400 a 1200 g, pulpa roja y elevado contenido en azúcar (13 °Bx) (Rodríguez, s. f.).
 - ‘Tainung 1’: híbrido entre ‘Sunrise Solo’ y una papaya costarricense. Produce frutas alargadas y de 900 g, con pulpa rojiza y muy firme (Rodríguez, s. f.). Es el híbrido que más se cultiva en el mundo, estando en el mercado desde hace más de 30 años.
 - ‘Sweet Mary’ (Cabrera et al., 2021): es un cultivar muy popular, con frutas de peso medio de 1,35 kg, pulpa anaranjada y contenido de azúcar entre 11 y 13 °Bx. El rendimiento es bueno, 90 t/ha durante su vida productiva (18 – 24 meses) (Cabrera et al., 2021).

5.6. Requerimientos edafoclimáticos

5.6.1. Requerimientos climáticos

La mayor parte de la producción de papaya se ubica entre los 23° de latitud norte y sur, no obstante, el cultivo se extiende hasta los 32° en ambas direcciones, en zonas a nivel del mar y protegidas (Hueso et al., 2015). Según Alfonso (2010), se desarrolla en áreas cálidas desde el nivel del mar hasta los 1000 m s. n. m. aunque los mejores rendimientos y calidad de frutos se dan hasta una cota máxima de 600 m s. n. m.

De todos los factores climáticos el más significativo y restrictivo para el desarrollo de un cultivo es la temperatura (Hueso et al., 2015). Rodríguez et al. (1995); Agustí (2014) y Hueso et al. (2015), coinciden en que la temperatura óptima para el buen desarrollo de la papaya es alrededor de los 25 °C, siendo los límites térmicos extremos 21 y 33 °C. Por debajo de 20 °C y por encima de 35 °C, las plantas son muy susceptibles a alteraciones florales (carpeloidía y esterilidad femenina respectivamente), afectando seriamente a la producción y calidad de los frutos. En el apartado **Elevadas y bajas temperaturas** se amplía la información referente al efecto de la temperatura sobre el cultivo.

En cuanto a la humedad relativa, se requiere entre 60 y 85 % para un adecuado desarrollo, dándose problemas de producción con valores superiores e inferiores



a este rango (Hueso et al., 2015) que se explican en **Alta y baja humedad relativa**.

Guzmán (1998) y Hueso et al. (2015) la califican como muy exigente en cuanto a luminosidad o radiación, llegando a soportar bien luminosidades elevadas (Agustí, 2014), mientras que Pérez (2016) indica que las necesidades de radiación solar son similares a las de los cultivos hortícolas de invernadero. No obstante, Alfonso (2010) señala que el exceso de radiación solar sobre los frutos es perjudicial, pues puede causar quemaduras en estos, mermando su valor e incluso aptitud para ser comercializados. La papaya es capaz de adaptarse al sombreado, aunque tiene repercusiones en el rendimiento, ya que se reduce el tamaño de las plantas, así como la superficie foliar y la densidad estomática, mientras que se aumenta la distancia entre los nudos, la longitud de los peciolo y el contenido de clorofila. Por su parte, el fotoperiodo no influye en el crecimiento, la expresión sexual o la producción (Agustí, 2014).

El viento es un factor limitante en este cultivo, como se discutirá posteriormente en la sección **Viento**.

Las necesidades hídricas varían según la localización del cultivo, el clima de la zona y el tipo de suelo. Asimismo, la edad de las plantas influye siendo mayores los requerimientos en plantas jóvenes, ya que las adultas presentan una menor tasa de crecimiento vegetativo y su sistema radicular explora más volumen de suelo, siendo capaz de absorber más agua. No obstante, para tener un buen cultivo, es necesario que las plantas tengan agua disponible siempre (Yee, 1970). Villegas (1991) y Agustí (2014) estiman que para el normal progreso del cultivo es necesario como mínimo 100 mm de agua mensuales, junto con prácticas de conservación de agua en el sustrato. Mientras que Guzmán (1998) y Alfonso (2010) proporcionan un intervalo de mayores necesidades, entre 1500 y 2000 mm anuales distribuidos de forma homogénea en el tiempo, ya que debido al elevado contenido de agua de los frutos y a la constante formación de estos, se debe proveer de agua durante todo el año para asegurar una cosecha sin interrupciones (Alfonso, 2010).

No hay ninguna región que pueda satisfacer completamente y de forma continua las necesidades hídricas y térmicas para el óptimo desarrollo del cultivo, por lo que es necesario el empleo de riego, al menos durante la estación seca (Agustí, 2014).

5.6.2. Requerimientos edáficos

El suelo actúa de sustento para las plantas y como reserva de agua y nutrientes, pero más allá de esta interpretación como medio físico, el suelo es un sistema vivo, vital para la producción agrícola y el mantenimiento de los ecosistemas. Los suelos afectan directa e indirectamente a la productividad agrícola, la calidad del agua, e incluso al clima a través de su función como medio para el crecimiento de la vegetación (Delgado y Gómez, 2017).



La papaya es capaz de desarrollarse en una gran variedad de tipos de suelo, desde el punto de vista de su estructura, siempre que estos tengan buen drenaje, y es que la permeabilidad del suelo es uno de los factores del suelo más importante de este cultivo (Toribio, 1969; Villegas, 1991; Arango y Román, 2000; Hueso et al., 2015). Ibar (1986) destaca la importancia de un buen drenaje dada la naturaleza esponjosa y blanda de los tallos y raíces de esta planta, que fácilmente se pudren por el encharcamiento y, conforme Hueso et al. (2015) la papaya es propensa a podredumbres provocadas por *Phytophthora* spp.

Varios autores (Rodríguez et al., 1995; Guzmán, 1998; Agustí, 2014; Hueso et al., 2015) coinciden en que se desarrolla bien en suelos de textura limosa o franco – arenosa, profundos y bien drenados, ricos en materia orgánica, con pH oscilando entre ligeramente ácido y neutro (5,5 – 7) y sin exceso de sales. No son recomendable suelos pesados, es decir, aquellos muy arcillosos, compactados o mal aireados (Hueso et al., 2015), que dificultan el correcto desarrollo de la planta porque el sistema radicular se ve reprimido, reduciéndose el volumen de exploración de las raíces (Delgado y Gómez, 2017). Hueso et al. (2015) proponen que, en suelos ácidos, con pH por debajo de 5 – 5,5, es recomendable llevar a cabo encalado para favorecer el desarrollo y rendimiento de las plantas. Además, en suelos predominantemente arenosos, se requerirá grandes aportes de materia orgánica.

5.7. Técnicas de cultivo

El cultivo de la papaya depende de una serie de labores que son habituales en otros cultivos, si bien atendiendo a los requerimientos específicos de esta especie. Asimismo, también presenta algunas tareas propias para el correcto desarrollo de las plantas. Las técnicas de cultivo de la papaya más destacables son las siguientes:

- Propagación y sexado: la multiplicación principalmente es por semillas. Como se ha mencionado con anterioridad, el mercado exige frutos piriformes de plantas hermafroditas, por lo que las plantaciones comerciales se llevan a cabo con ese tipo de plantas. Tradicionalmente, se sembraban de tres a cuatro semillas por golpe y había que esperar aproximadamente de dos a cuatro meses para que las plantas mostraran características sexuales, y posteriormente elegir si la hubiera una hermafrodita (Hueso et al., 2015). Este sistema es poco eficiente en el uso del tiempo, del material vegetal y la mano de obra, además, daba lugar a plantaciones muy irregulares (Barrantes et al., 2019). En la actualidad, la determinación del sexo está evolucionando a sexados tempranos mediante marcadores moleculares en los semilleros, disminuyendo los costes de plantación y facilitando el manejo. Del mismo modo, están en fase de investigación otros tipos de propagación como el cultivo de tejidos o el estaquillado (Salinas et al., 2017).
- Plantación: la densidad de plantación dependerá del tipo de planta. En el caso de híbridos es recomendable una densidad de plantación de 1700



- plantas/ha, mientras que las líneas puras admiten marcos más estrechos por lo que 2200 plantas/ha es apropiado (Salinas et al., 2017).
- Riego: la influencia del riego sobre la producción y calidad de los frutos está demostrada, especialmente en regiones con periodos de sequía, por lo que en producciones comerciales es preciso el uso de riego (Agustí, 2014). En el apartado **Requerimientos climáticos** se detallan las necesidades hídricas de este cultivo.
 - Fertilización: requiere elevadas dosis de fertilización, así como de frecuencias cortas de aplicación (Alfonso, 2010). La recomendación nutritiva debe estar sujeta a las condiciones ambientales, el tipo de suelo, la edad de las plantas y las prácticas de cultivo. Además, debe basarse en los análisis foliares y de suelo (Agustí, 2014). De forma general, en cuanto a macronutrientes, la papaya es más exigente en nitrógeno, potasio y calcio; y respecto a micronutrientes, en hierro, manganeso y azufre (Alfonso, 2010).
 - Eliminación de chupones: la papaya tiende a producir brotes laterales en las axilas de las hojas. Estos restan vigor a la planta, provocando una reducción general de los frutos (Alfonso, 2010).
 - Deshojes: las hojas más viejas deben eliminarse porque son hospedadoras de plagas e inóculo de muchas enfermedades. Es conveniente retirar solo las láminas foliares y dejar los peciolo hasta que estos se sequen y se desprendan por sí solos (Alfonso, 2010), para evitar dejar heridas abiertas en el tallo de la planta.
 - Desflores: en caso de anomalías florales (carpeloidía, esterilidad femenina, daños por plagas, etc.) se deben retirar las flores afectadas para evitar un innecesario gasto energético y nutricional de la planta. Además, otro aspecto interesante de esta práctica es que, al retirar la dominancia apical de las inflorescencias se promueve la fructificación de las flores laterales.
 - Aclareo de frutos: en caso de exceso de fructificación, se debe realizar un aclareo de frutos para evitar que estos se dañen y fomentar un buen desarrollo de los frutos más aptos.
 - Control de arvenses: los herbicidas suponen un grave riesgo para las plantas, especialmente en los estados más juveniles. Por ello, es conveniente el empleo de acolchados eficientes para evitar la emergencia de maleza.
 - Cosecha: es importante y recomendable usar protección a la hora de recolectar, especialmente en las manos, para evitar el contacto directo con el látex, ya que como se expuso anteriormente, puede ser muy irritante. La fruta se retira cortando el pedúnculo pegado a la planta y a continuación se corta el restante, de este modo, se evitan daños en la fruta al manipularla (Guzmán, 1998). El punto de cosecha es cuando la fruta torna de color verde oscuro a claro y aparece una tonalidad amarilla que posteriormente da lugar a franjas amarillas longitudinales desde el pedúnculo hasta la base del fruto. El grado de madurez de cosecha depende de las exigencias del mercado y de la distancia a los puntos de



venta. La fruta se suele cubrir con papel y se coloca en cajas para su transporte (Alfonso, 2010).

- Poscosecha: en el centro de empaquetado, la fruta es lavada y desinfectada. Posteriormente, se realiza una selección en base a calidad, punto de maduración y tamaño. La fruta puede someterse a tratamientos específicos para control del deterioro, plagas y/o enfermedades (tratamientos higrotérmicos, con vapor caliente, con aire caliente forzado, etc.) (Crescencio, 2016). La conservación óptima es con temperaturas entre 7 y 13 °C, y en torno al 90 – 95 % de humedad relativa, no obstante, dependerá de la fase de madurez en que se encuentre el fruto. Al ser un fruto climatérico, la aplicación de etileno permite adelantar y uniformizar la maduración (Interempresas Media, S. L.).

Para el transporte a los mercados, cada fruta se introduce en una red o manga de espuma, que les proporciona protección frente a daños mecánicos, y se colocan en cajas sin apilar (Crescencio, 2016), y con el extremo peduncular hacia abajo, ya que esta zona es la última en madurar y, por tanto, la más resistente (Alfonso, 2010). También, se suele incluir una almohadilla de espuma o similar en el fondo de la caja (Crescencio, 2016).

5.8. Plagas y enfermedades

5.8.1. Plagas

Carica papaya es hospedadora de una gran cantidad de insectos plaga, pero tan solo unos pocos suponen un verdadero riesgo para el cultivo (Agustí, 2014). Según Yee et al. (1970), muchos insectos son poco frecuentes en este cultivo o su daño es poco relevante. Añaden que las plantas adultas toleran mejor la actividad de las plagas, mientras que las jóvenes requieren métodos de control inmediatos, tanto más, cuanto más jóvenes sean. En el **Cuadro 2** se recogen las principales plagas registradas en este cultivo.

Cuadro 2: Principales insectos plaga de *C. papaya*. (*) Categoría taxonómica correspondiente a Filo.

Orden	Nombre científico	Nombre común	Sintomatología	Referencia
Diptera	<i>Anastrepha fraterculus</i>	Mosca de la fruta de Sudamérica	Puesta en el fruto, posteriormente, las larvas se alimentan de este.	Agustí, 2014.
	<i>Anastrepha ludens</i>	Mosca mejicana de la fruta		Agustí, 2014.
	<i>Bactrocera dorsalis</i>	Mosca oriental de la fruta		Agustí, 2014.
	<i>Ceratitidis capitata</i>	Mosca de la fruta del Mediterráneo		Agustí, 2014.
	<i>Toxotrypana curvicauda</i>	Mosca de la papaya		Guzmán, 1998.
Hemiptera	<i>Aphis gossypii</i>	Pulgón del algodón	Secreción de melaza.	Yee et al., 1970;



			Vectores de virus.	Agustí, 2014.
	<i>Empoasca</i> spp.	Mosquitos verdes	Severos daños en hojas jóvenes. Amarilleamiento y distorsión de hojas. Vectores de virus.	Guzmán, 1998; Agustí, 2014.
	<i>Myzus persicae</i>	Pulgón verde del melocotonero	Secreción de melaza. Vectores de virus.	Yee et al., 1970; Agustí, 2014.
Lepidoptera	<i>Opogona sacchari</i>	Oruga taladradora	Galerías en el tallo.	Rodríguez et al., 1995.
Nematoda*	Nemátodos reniformes	<i>Rotylenchulus reniformis</i>	Pequeños granos como arena en las raíces. Disminución de crecimiento y rendimiento.	Yee et al., 1970.
Trombidiformes	<i>Brevipalpus</i> spp.	Ácaro plano	Depreciación de frutos por manchas de color grisáceo o café.	Bogantes et al., 2011.
	<i>Polyphagotarsonemus latus</i>	Ácaro blanco	Decoloración del ápice y una deformación de las hojas jóvenes.	Bogantes et al., 2011.
	<i>Panonychus citri</i>	Ácaro rojo de los cítricos	Atrofia, distorsión y/o abscisión foliar.	Agustí, 2014.
	<i>Poliphagotarsonemus latus</i>	Araña microscópica	Rugosidades y deformaciones en hojas tiernas.	Rodríguez et al., 1995.
	<i>Tetranychus urticae</i>	Araña roja común	Decoloraciones amarillas.	Bogantes et al., 2011.

5.8.2. Enfermedades

La papaya cultivada presenta una base genética estrecha que puede ser en parte responsable de la susceptibilidad de esta a una amplia gama de enfermedades (Persley y Ploetz, 2003). Agustí (2014) aclara que la trascendencia de las enfermedades depende del órgano que se ve afectado y varía con la zona de cultivo.



En el **Cuadro 3**, se recogen algunas de las principales enfermedades que afectan a la papaya, causadas por diferentes patógenos.

Cuadro 3: Principales enfermedades de *C. papaya*.

Categoría	Enfermedad	Patógeno	Sintomatología	Referencia
Bacteria	<i>Bacterial canker</i>	<i>Erwinia</i> sp.	Lesiones angulares acuosas en hojas y tallo. Marchitez de hojas más apicales y zonas necróticas.	Persley y Ploetz, 2003.
	<i>Papaya Bunchy Top (PBT)</i>	<i>Rickettsia</i> sp.	Clorosis en hojas jóvenes. Manchas acuosas en peciolo y tallos. Peciolo y entrenudos acortados y limbos engrosados.	Persley y Ploetz, 2003.
Fungi	Antracnosis	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	Grandes daños en la fruta cuando está próxima a la recolección o madura. Manchas acuosas que se van agrandando, formando lesiones circulares y deprimidas.	Yee et al., 1970; Rodríguez et al., 2015.
	Pudrición de la raíz	<i>Phytophthora palmivora</i>	Manchas acuosas en el tallo. Marchitez de fruta madura. <i>Damping – off</i> en plántulas. Muerte de la planta.	Yee et al., 1970; Rodríguez et al., 2015.
	Oídio o ceniza	<i>Oidium caricaceae</i>	Manchas amarillas en el haz y polvo blanquecino en el envés.	Yee et al., 1970.
Virus	Virosis	Virus de la mancha anular de la papaya (PRSV)	Mosaico y deformaciones en limbos de la parte apical. Manchas grasas en tallos y frutos. Exudación de látex.	Agustí, 2014; Rodríguez et al., 2015.
		Virus del bronceado del tomate (TSWV)	Clorosis y necrosis apical. Lesiones acuosas en tallo y peciolo. Frutos deformes y con manchas en forma de anillos verdes.	Persley y Ploetz 2003; Rodríguez et al., 2015.
		Virus del mosaico del pepino (CMV)	Mosaico en hojas apicales y manchas grasas en tallos.	Rodríguez et al., 2015.

5.9. Estrés abiótico

La naturaleza inmóvil de las plantas imposibilita que estas puedan trasladarse a ambientes más adecuados para su desarrollo en caso de situaciones de estrés

medioambiental. El concepto de estrés abiótico supone la presencia de un factor ambiental que ejerce una influencia negativa sobre el desarrollo adecuado de la planta. Por ambos hechos, las plantas han adquirido y mejorado diversos mecanismos de autodefensa para poder vivir en ambientes cambiantes (Tadeo y Gómez, 2013).

Sin embargo, la papaya es un cultivo especialmente sensible a su entorno y los cambios en los factores ambientales pueden afectar gravemente a la productividad de las plantas (Jeyakumar et al., 2007).

5.9.1. Elevadas y bajas temperaturas

La temperatura a la que se encuentra un cultivo afecta considerablemente a importantes procesos como la fotosíntesis, las tasas de crecimiento y desarrollo, o la transpiración (Villalobos et al., 2017a).

En el caso de la papaya, Jeyakumar et al. (2007) afirman que tanto la fotosíntesis como la respiración se inhiben con altas temperaturas, aunque la tasa fotosintética se reduce antes. Además, observaron que, cuando la temperatura asciende de 27 a 35 °C, la asimilación neta de CO₂ aumenta progresivamente. Sin embargo, al superar los 35 °C, se reduce de modo considerable. Chaves y Gutiérrez (2017) corroboran este último hecho, añadiendo que cuando la temperatura supera los 30 °C, la asimilación máxima de carbono decrece linealmente, por lo que a 41 °C el valor de este parámetro es apenas la mitad que a 30 °C. Asimismo, temperaturas excesivamente altas pueden modificar la composición y estructura de las membranas celulares, y con ello se producen fugas de iones (Jeyakumar et al., 2007).

Sadras et al. (2017a) exponen que el efecto principal de temperaturas excesivamente altas sobre los cultivos es una reducción del índice de cosecha (*harvest index*) debido a la reducción de la polinización o al aborto de las semillas. Allan (2002) y Hueso et al. (2015) ratifican esta afirmación para el cultivo de la papaya, pues por encima de 30 °C la polinización y fecundación de las flores se ven perjudicadas. En consecuencia, la producción disminuye.

Por último, cabe destacar que las flores, y por tanto los frutos que se forman en las plantas de papaya están considerablemente influenciados por la temperatura del ambiente (Jeyakumar et al., 2007). Temperaturas superiores a 35 °C motivan un proceso gradual de esterilidad femenina, dando lugar a frutos sin interés comercial en los casos más leves y a flores no productivas en los más severos.

Al otro extremo, Agustí (2014) sostiene que *C. papaya* es muy sensible a las bajas temperaturas, por lo que periodos breves a -4 °C, o prolongados con temperaturas en torno a los 0 °C provocan la muerte de las plantas.

Al igual que las temperaturas extremadamente altas, las bajas afectan a la producción y viabilidad del polen (Allan, 2002).

Como se manifestó en la sección **Flores**, las flores hermafroditas son propensas a presentar malformaciones debido a temperaturas inferiores a 20 °C, dando



lugar a las denominadas flores carpeloides con diferentes intensidades de deformación, o en caso de temperaturas aún más bajas, a flores pentándricas. En consecuencia, producirán frutos que reciben el mismo nombre que las flores y las mismas características morfológicas que las del ovario de la flor. Los frutos carpeloides son totalmente deformados, mientras que los pentándricos muestran cinco costillas prominentes dispuestas de forma regular. Estos frutos carecen o poseen muy bajo potencial comercial.

El cuajado es muy bajo o nulo, y los frutos ya cuajados debido al efecto del frío, pueden demorar la maduración durante un largo periodo de tiempo, por lo que las producciones se ven comprometidas (Hueso et al., 2015). Además, dado que la determinación del tamaño y de las propiedades organolépticas del fruto sucede entre las cuatro o seis primeras semanas de desarrollo, los frutos que comenzaron el crecimiento con periodos de bajas temperaturas muestran un menor tamaño y mala calidad organoléptica (Agustí, 2014; Hueso et al., 2015).

En áreas productoras con una temperatura media entre 18 y 21 °C el rendimiento es menor, así como la velocidad de maduración y el contenido de azúcar de los frutos. Esto da lugar a frutos insípidos y con falta de color en la pulpa. Con temperaturas nocturnas por debajo de 12 o 14 °C, la producción está expuesta a sufrir merma, por lo que no es aconsejable el cultivo al aire libre en dichas condiciones (Hueso et al., 2015).

5.9.2. Estrés hídrico y encharcamiento

El estrés hídrico en los cultivos es el resultado de un bajo potencial de agua en la planta, que a su vez se debe a tres posibles situaciones. Por un lado, a un bajo potencial de agua en el suelo, ya sea por un escaso contenido de agua en este y/o por una elevada concentración de sales. También, puede estar relacionado con una elevada demanda evaporativa. Por último, puede deberse a una resistencia al flujo de agua en suelo, causada por una baja conductividad hidráulica y/o porque esté seco, o bien por una resistencia al flujo en la misma planta, como consecuencia de enfermedades vasculares o poco desarrollo en longitud de las raíces, entre otras (Sadras et al., 2017b).

El déficit hídrico afecta a numerosos procesos de la planta, aunque la mayoría están relacionados con la reducción del crecimiento, justificado en la disminución de la expansión celular por la pérdida de turgencia, y el cierre estomático. Si la duración y severidad del estrés son suficientemente amplios, afectará a prácticamente todos los procesos morfológicos y fisiológicos. De forma general, las respuestas de las plantas se manifiestan como una reducción del tamaño, de su área foliar y del rendimiento cosechable (Sadras et al., 2017b).

La papaya se puede considerar como una especie relativamente tolerante a la sequía, sin embargo, en detrimento de un crecimiento y rendimiento óptimos (Mahouachi et al. 2006).

Mahouachi et al. (2006) tras llevar a cabo pruebas de estrés hídrico en plántulas de papaya, observaron que se produjo disminución del crecimiento, abscisión



foliar y descenso de la tasa fotosintética. Además, las plántulas sometidas a déficit hídrico mostraron una tendencia a acumular iones como K^+ , Na^+ y Cl^- . Lo mismo ocurrió en experiencias similares con otras especies como *Vicia faba* L. o *Atriplex halimus* L. El incremento de la concentración de iones específicos parece estar ligado a la mejora de la tolerancia frente al estrés hídrico, contribuyendo al ajuste osmótico. Los autores manifiestan también, que la tolerancia no depende de otros factores observados como la disminución del crecimiento, de la asimilación neta de CO_2 o de la abscisión foliar. Por otro lado, la rehidratación 34 DDT de las plántulas sometidas a estrés, indujo la recuperación morfológica y fisiológica de estas sin mostrar daños irreversibles por el déficit hídrico.

Jeyakumar et al. (2017) afirman que el estrés hídrico prolongado además de ralentizar el crecimiento general de las plantas fomenta el proceso de esterilidad femenina en flores hermafroditas, provocando un decaimiento productivo como ya se hizo referencia en **Flores**. Arango y Román (2000) y Agustí (2014) también recalcan que se produce abscisión de flores, el cuajado se reduce y los frutos desarrollados presentan mala calidad.

Nunes et al. (2015) emplearon diferentes tratamientos de riego a plantas de papaya y observaron que, con secado parcial de raíces y riego deficitario regulado aplicando en ambos tratamientos un 30 % menos de agua que en un riego completo, el crecimiento vegetativo y los componentes del rendimiento (número de frutos por planta, peso medio de los frutos, kg de fruta por ha y kg de fruta por planta) no presentaron diferencias significativas frente a las plantas con riego completo. Por ello, concluyen que la papaya puede tolerar déficits de agua moderados sin afectar gravemente al rendimiento del cultivo, lo que indica que se pueden emplear técnicas de riego que ahorren agua.

En cuanto al encharcamiento, Sadras et al. (2017a) exponen que supone un suministro limitado de oxígeno para la respiración radicular, derivando en una peor absorción de este y afectando al crecimiento y salud de la planta: en condiciones de suelo saturado, las raíces sufren un proceso de descomposición a partir de los meristemos, la planta cesa su crecimiento y finalmente muere.

En el apartado **Requerimientos edáficos** se expuso la transcendencia que diversos autores asignan a la problemática del encharcamiento del suelo en el cultivo de la papaya. Tan solo tras cinco días de condiciones de anegamiento, comienzan a presentarse los primeros síntomas a modo de clorosis en las hojas (Agustí, 2014). Posteriormente, sucede una defoliación prematura de las hojas más inferiores (Arango y Román, 2000). El rendimiento disminuye y las afecciones de patógenos del suelo se ven favorecidas, lo cual provocará el colapso de la planta (Arango y Román, 2000). Villegas (1991) sostiene que breves periodos de inundación son suficientes para acabar con las plantas de papaya, y Arango y Román (2000) especifican que pueden perecer en 48 horas, especialmente si hay ataques de patógenos.

Por tanto, dado la sensibilidad que presentan estas plantas a la asfixia radicular y a algunos patógenos que se ven favorecidos por los encharcamientos, es



necesario llevar a cabo medidas preventivas como aprovechar terrenos ligeramente inclinados en regiones de precipitaciones elevadas, instaurar un sistema de drenaje eficiente, sembrar o trasplantar las plantas sobre montículos de tierra de unos 30 cm de altura (Arango y Román, 2000) y/o emplear sistemas de riego localizado.

5.9.3. Alta y baja humedad relativa

Hueso et al. (2015) establecen que entre 60 y 85 % de humedad relativa (HR) es el intervalo apto para un buen desarrollo de la papaya. Los valores de HR por debajo de este intervalo provocará problemas de cuajado, así como la caída prematura de hojas. Además, si esta circunstancia se desarrolla junto con temperaturas elevadas, las poblaciones de ácaros fitófagos se verán favorecidas pudiendo suponer un serio problema para el rendimiento del cultivo.

Por otra parte, una HR muy superior a 85 % acompañada de precipitaciones, puede reducir la fecundación de las flores y también el cuajado de los frutos. Además, algunas enfermedades de tipo fúngico como antracnosis u oídio se ven beneficiadas por elevada HR (Hueso et al., 2015).

5.9.4. Viento

Villalobos et al. (2017b) recogen una serie de principales efectos en los cultivos debido al viento:

- Tigmomorfogénesis, es la respuesta de las plantas al movimiento que genera el viento sobre estas, que se traduce en una reducción de la tasa de crecimiento y un incremento de la resistencia mecánica, es decir, mayor engrosamiento de los tallos o mayor relación sistema radicular/parte aérea.
- Daños mecánicos por la fuerza directa del viento o por el transporte de partículas del suelo, dando lugar a desgarres y/o abrasión de hojas, con las concernientes consecuencias.
- Los fuertes vientos con el suelo mojado pueden provocar el encamado del cultivo, es decir, la postración de las plantas sobre el suelo.
- En los cultivos bien regados y con viento, la transpiración puede ser proporcional a la velocidad del viento, por lo que el cultivo consumirá más rápido el agua del suelo.
- Favorece la salinización en cultivos próximos a la costa por deriva de spray marino.

Toribio (1969) e Ibar (1986) enuncian que el viento no es un factor muy perjudicial para la papaya, ya que tanto el tallo como los peciolos presentan flexibilidad y los pedúnculos florales están fuertemente adheridos al tallo por lo que se dificulta su desprendimiento. Por tanto, concluyen que los vientos pueden dañar algunas hojas, pero no suelen afectar a flores o frutos. Por el contrario, Agustí (2014) considera que el viento provoca daños irreparables en cuanto a abscisión de flores y frutos. Además, este autor resalta la importancia del factor viento en este

cultivo debido a la cualidad superficial de su sistema radicular y es que, cuando la velocidad del viento supera los 65 km/h, las plantas caen dejando las raíces al aire, especialmente en suelos poco resistentes. Sin embargo, Yee et al. (1970) y Arango y Román (2000) afirman que, si las plantas presentan un buen sistema radical, pueden soportar vientos de hasta aproximadamente 80 km/h, si bien consideran a la papaya como un cultivo sensible frente al viento.

Para evitar estos efectos, Arango y Román (2000) y Agustí (2014) sostienen que es prácticamente imperativo el uso de cortavientos en este cultivo, con la intención de reducir la velocidad del viento. Asimismo, Rodríguez et al. (1995) definen el viento como un factor limitante para la papaya, siendo recomendable emplear algún método de protección como el uso de invernaderos.

5.9.5. Estrés salino

Wahome et al. (2001) y Delgado y Gómez (2017) definen la salinidad como la alta concentración de sales solubles en los suelos, siendo esta lo suficientemente alta como para afectar de forma negativa a los cultivos. Cruz et al. (2003) aportan que estas elevadas concentraciones de sales en el suelo han sido uno de los factores que más han contribuido a reducir el crecimiento y la productividad de las plantas cultivadas. Las sales solubles más comunes son los cloruros y sulfatos de sodio, calcio y magnesio, mientras que los iones dominantes son el Na^+ y el Cl^- (Villalobos et al., 2017c).

La conductividad eléctrica (CE) del extracto saturado del suelo, generalmente es el parámetro empleado para clasificar los suelos según su salinidad y para poder evaluar los efectos negativos causados por esta en los cultivos. Un suelo se considera salino cuando la CE es mayor de 4 dS/m (Delgado y Gómez, 2017), aunque la *Soil Society of America* determina esta condición del suelo a partir de 2 dS/m. También se puede emplear la concentración de sal (g/l), que aproximadamente es un 64 % de la CE en dS/m (Villalobos et al., 2017c).

Según Gárate y Bonilla (2013) y Villalobos et al. (2017c), los suelos salinos se encuentran principalmente en las zonas áridas y semiáridas de regadío. Villalobos et al. (2017c) estiman que un 20 % de las zonas de regadío de estas regiones están ocupada por suelos salinos. La problemática es mayor en las zonas áridas y semiáridas, ya que se producen elevadas tasas de evapotranspiración en los cultivos, y generalmente se carece de agua suficiente para lixiviar el exceso de sales fuera de la zona radical.

La salinización de los suelos agrícolas de regadío es consecuencia de un suministro externo de sales en forma de agua rica en sales y/o por la aplicación excesiva de fertilizantes. El mar también puede ser causa directa, ya sea porque el suelo se haya originado a partir de sedimentos marinos, o por intrusiones marinas subterráneas (Villalobos et al., 2017c).

La salinidad de aguas y suelos reduce tanto el crecimiento como la producción de la mayoría de los cultivos, especialmente de los frutales como la papaya (Sousa et al., 2019). Los efectos negativos de salinidad en las plantas se deben



a dos aspectos fundamentalmente. Por un lado, a efectos osmóticos, debido a que el potencial hídrico del suelo disminuye, principalmente por la reducción del potencial osmótico, por lo que el agua será más difícil de tomar por la planta, provocando estrés hídrico. Por otro lado, la salinidad de los suelos está íntimamente relacionada con elevadas concentraciones de iones Cl^- y Na^+ , y conforme a Villalobos et al. (2017c), también de B^{3+} . Ello puede provocar desequilibrios en la planta e incluso toxicidad iónica (Wahome et al., 2001; Gárate y Bonilla, 2013; Delgado y Gómez, 2017; Villalobos et al., 2017c). Los primeros síntomas por toxicidad suelen ser quemaduras marginales foliares y clorosis. La sensibilidad a la toxicidad de iones es muy variable en los cultivos, siendo los árboles frutales los más sensibles, apreciándose consecuencias con concentraciones iónicas muy leves. Un problema adicional y muy grave, es la acumulación de sodio en el suelo o “sodicidad” del suelo, cuyos efectos principales se reflejan en la estructura del suelo, que sufre una degradación (Villalobos et al., 2017c). Esta degradación se acentúa cuando el suelo es arcilloso, provocando una disminución de la permeabilidad y, en consecuencia, un menor desarrollo radicular, que a su vez complica la absorción de nutrientes, principalmente K^+ , Ca^{2+} y P^{5+} (Gárate y Bonilla, 2013).

Para combatir el efecto del estrés hídrico resultado de la salinidad, las plantas incrementan la producción intracelular de sustancias solubles, que disminuyen el potencial hídrico de las células favoreciendo la entrada de agua en estas; de lo contrario, por el mismo motivo, el agua saldría de las células radiculares hacia el medio exterior, provocando que la planta se seque. Para el caso de desequilibrios nutricionales, se sabe que el Na^+ puede desplazar el Ca^{2+} de las membranas celulares, implicando una modificación en la absorción de nutrientes como el K^+ . No obstante, se ha comprobado que la aportación de Ca^{2+} favorece la captación de K^+ , en detrimento del Na^+ . Por tanto, la fertilización con Ca^{2+} en suelos salinos aminora los efectos negativos de la salinidad al incrementar la absorción de K^+ (Gárate y Bonilla, 2013). Otra estrategia para resistir el estrés salino es la reducción o inhibición del crecimiento general de la planta, consecuencia de una inadecuada fotosíntesis debido al cierre de estomas que supone una menor entrada de CO_2 , aunque lo más significativo es que el estrés salino inhibe la división celular. También, se produce disminución del tamaño foliar para reducir la transpiración (Alcaraz, 2012).

Además, Parés et al. (2008) afirman que aparte de los ajustes fisiológicos que se producen para tolerar la salinidad, las plantas también sufren modificaciones morfológicas y anatómicas, como por ejemplo alteración de la densidad estomática o el engrosamiento de la cutícula para contrarrestar los efectos dañinos del exceso salino.

Existe una amplia variabilidad de sensibilidad a la salinidad de las especies cultivadas e incluso entre cultivares de una misma especie y estadios de desarrollo. Villalobos et al. (2017c) consideran que la papaya es un cultivo moderadamente tolerante a la salinidad, por lo que expresan que su rendimiento no se vería afectado si la CE del extracto saturado del suelo es inferior a 3,0 – 6,0 dS/m. Rhoades et al. (1992) igualmente consideran este cultivo como



moderadamente sensible, así como Mujeriego (1990) y Hueso et al. (2015). Rodríguez et al. (1995) destacan que la papaya parece ser más tolerante que la platanera (*Musa acuminata* Colla.), aunque se producen notables daños en zonas costeras por la “maresía” (aire cargado de humedad marina y, por tanto, de sales, en las zonas costeras). Por otro lado, Agustí (2014) define la papaya como muy sensible a la salinidad, especialmente en las etapas de germinación y desarrollo de plantas jóvenes.

Sousa et al. (2019) determinaron que la salinidad del agua reduce el crecimiento de *C. papaya*, especialmente en lo referido al desarrollo y crecimiento foliar. También, aseguran que las variables relacionadas con las hojas de la papaya son más sensibles a la salinidad, lo que permite determinar la afección por el exceso de sales. Asimismo, Parés et al. (2008) encontraron que la salinidad del agua de riego provoca la reducción del índice estomático, así como del número de estomas por unidad de área; por otro lado, se aumenta el espesor de los tejidos foliares, para contrarrestar las consecuencias perjudiciales de las sales.

Las semillas de papaya también se ven afectadas por el exceso de sales, como recogen Meza et al. (2004) en su artículo. Exponen que, de forma general, con valores superiores a 2 dS/m la germinación se ve afectada, aunque depende de la variedad y del manejo de la semilla.

6. Material y métodos

6.1. Material vegetal

Para el desarrollo del ensayo, se adquirió 30 plántulas de *Carica papaya* L. del cultivar híbrido Sweet Mary. Las plántulas se suministraron en una bandeja de siembra (“*multipot*”), poseían una altura promedio de $8,14 \pm 0,25$ cm y se encontraban en buen estado sanitario, como se aprecia en la **Figura 18**.



Figura 18: Plántulas de papaya en bandeja de siembra (“*multipot*”).

6.2. Descripción del ensayo

El experimento se estableció en un invernadero de cubierta de plástico (548 m s. n. m., Lat: 28° 28' 46,42" N Lon: 16° 19' 07,59" O) de las instalaciones de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Sección de Ingeniería Agraria, de la Universidad de La Laguna, en el municipio de San Cristóbal de La Laguna (Tenerife, Islas Canarias).

Tras recibir las plántulas, se trasplantaron en macetas de polipropileno de 5 L (**Figura 19**), previamente desinfectadas con lejía comercial al 10%, empleando el sustrato Substrato Universal Arco Iris (Productos Flower, S. A., Lleida, España) a base de una mezcla equilibrada de turba rubia, negra y compost vegetal [pH (H₂O) 6,5; M. O. 85 %; contenido en Cl⁻ 160 mg/l; humedad máxima 40 %; CE 0,13 ohmios/cm].



Figura 19: Trasplante de plántula de papaya en maceta con sustrato universal.

Teniendo las plántulas en macetas, se llevó a cabo un diseño experimental de bloques completos al azar, estableciendo dos tratamientos y tres repeticiones por tratamiento con 5 plantas por cada repetición ($n = 15$ plantas por cada tratamiento).

Tras el trasplante, a cada planta se añadió 20 g de fertilizante granulado (19-9-10 NPK + 2 MgO + elementos traza, Osmocote® Pro, Johannesburgo, Sudáfrica) y se regó con agua de riego sin alterar durante un periodo de adaptación de 8 días, tras lo cual comenzaron los diferentes tratamientos que se prolongaron durante 41 días:

- Tratamiento control o T1: 1 L de agua de riego sin alterar. Aproximadamente 3 riegos a la semana, según la demanda hídrica de las plantas en función de las condiciones climáticas (**Figura 20**).



Figura 20: Aplicación de 1 L de tratamiento.

- Tratamiento salino o T2: 1 L de agua de riego conteniendo sal común (NaCl) a una concentración de 100 mM, previamente preparada en el laboratorio (**Figura 21**). Aproximadamente 3 riegos a la semana, según la demanda hídrica de las plantas en función de las condiciones climáticas.

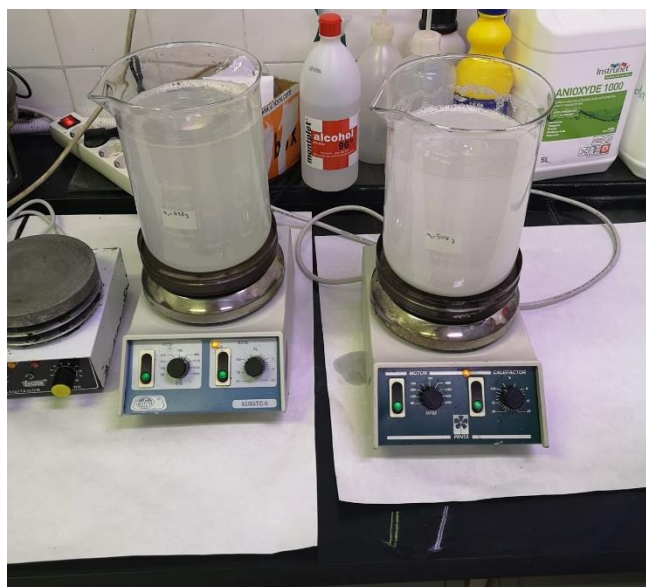


Figura 21: Preparación de la solución madre para el T2 en placas calefactoras con agitador magnético.

Debido a la presencia del hongo *Oidium caricaceae* en diversos momentos del ensayo, fue necesaria la aplicación de tratamientos curativos con azufre mojable

(Azufriil® Flow 80 % [SC] P/V, *Trade Corporation International S. A. U.*, Madrid, España). También se realizó de forma preventiva algún tratamiento con el mismo fungicida. En la **Figura 22** se aprecia la esporulación blanquecina de dicho hongo. Las hojas desarrolladas posteriormente a la infección presentaban clorosis parcial.



Figura 22: Esporulaci3n del hongo *Oidium caricaceae*.

6.3. Parámetros morfol3gicos y conductancia estomática

Como ya se ha indicado con anterioridad las plantas fueron objeto de evaluaci3n de diferentes parámetros morfol3gicos y conductancia estomática. Los datos se tomaron semanalmente en todas las plantas, con el fin valorar y comparar el efecto de la salinidad respecto al tratamiento control.

Los parámetros evaluados fueron:

- Altura de la planta: medida en cm, desde la superficie del sustrato hasta el meristemo apical (**Figura 23**).
- Diámetro del tallo: medida en cm, a 5 cm aproximadamente sobre la superficie del sustrato, empleando para ello un pie de rey que se apoyó de forma paralela a la parte superior de la maceta (**Figura 24**).
- Número de hojas funcionales: hojas verdaderas, bien desarrolladas y fotosintéticamente activas.
- Conductancia estomática: determinada mediante un porómetro (SC-1 *Leaf Porometer*, *Meter Group Inc.*, Washington, EE. UU.) en las primeras

horas del día (entre las 8:00 y las 12:00) para que los datos fueran aptos, pues los estomas tienden a cerrarse a lo largo del día (**Figura 25**).



Figura 23: Medición de la altura de la planta.



Figura 24: Medición del diámetro del tallo.



Figura 25: Medición de la conductancia estomática.

6.4. Análisis de los minerales

6.4.1. Muestreo de las plantas y preparación de las muestras

Para llevar a cabo los análisis minerales, al final del ensayo se muestrearon todas las plantas tal y como se indica en este apartado; para cada planta se separaron los distintos órganos a analizar (hojas, tallo y raíces), y se juntaron todos aquellos que provenían de plantas de un mismo tratamiento y bloque para su posterior análisis.

Los materiales empleados y la metodología seguida para el muestreo en el invernadero fueron los siguientes:

- Bisturí.
- Cuchillo.
- Bolsas plásticas correctamente identificadas con tinta indeleble.
- Nevera portátil.
- Acumuladores de frío.

A cada una de las plantas seleccionadas se le separó mediante el bisturí o cuchillo, según la necesidad, las láminas foliares funcionales (sin pecíolos), el tallo y las raíces. A continuación, cada tipo de órgano se introdujo en una bolsa exclusiva e identificada, y se fueron alojando en la nevera portátil que contenía acumuladores de frío para preservar al máximo la calidad de estos. En el caso de las raíces, previamente a embolsarlas y conservarlas en la nevera, se sumergieron en un recipiente con agua para desechar la mayor parte de sustrato posible, como se muestra en la **Figura 26**.



Figura 26: Limpieza de raíces en el invernadero.

Finalizado el muestreo, se trasladó todo el material al laboratorio para continuar con la preparación de las muestras.

En el laboratorio se dispuso del siguiente material y metodología:

- Agua destilada.

- Papel absorbente.
- Nitrógeno líquido ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), suministrado por el Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) de la ULL.
- Mortero de porcelana.
- Espátula de laboratorio.
- Tubos y botes herméticos.
- Congelador ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Liofilizador ALPHA-2-4 (Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH, Osterode am Harz, Alemania)
- Balanza analítica AC-100 (*Mettler* Toledo, Columbus, EE. UU.)
- Micromolino de laboratorio DFH-48 (Culatti, Steinenberg, Suiza).

De las hojas, se eliminó la mayor cantidad de partículas y suciedad posible mediante papel absorbente y agua destilada para retirar posibles contaminantes (**Figura 27**). El mismo procedimiento se llevó a cabo con los tallos. Las raíces requirieron una limpieza más rigurosa: se sumergieron en agua y se fue retirando los restos de sustrato. Posteriormente se enjugaron con agua destilada hasta quedar totalmente limpias (**Figura 28**).



Figura 27: Limpieza de hojas con agua destilada y papel absorbente.

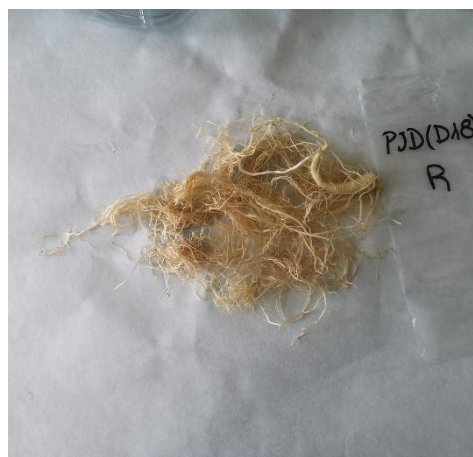


Figura 28: Raíces tras la limpieza.

Seguidamente, las muestras de tallo se trocearon y se congelaron con nitrógeno líquido ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), al igual que las de raíces y hojas como se observa en la **Figura 29**. Al congelarse, posibilita un manejo más adecuado para su trituración con un mortero de porcelana (**Figura 30**). Las muestras se depositaron en tubos o botes herméticos e identificados, y se introdujeron en el congelador a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su correcta conservación.



Figura 29: Aplicación de nitrógeno líquido a una muestra.



Figura 30: Trituración de muestra con mortero de porcelana.

El paso siguiente fue deshidratar las muestras, para lo que se empleó la técnica de la liofilización, que consiste en congelar un producto sensible a las altas temperaturas y posterior colocación en una cámara de vacío. En esta cámara, la humedad presente se sublima y es eliminada por bombeo (Siccha y Lock, 1995).

Tras todo el procedimiento anterior, las muestras se molieron en un micromolino de laboratorio (**Figura 31**), logrando muestras homogéneas aptas para su análisis químico.



Figura 31: Molienda de muestra en molino de laboratorio.

6.4.2. Análisis químicos

Para la fase de análisis químicos se dispuso del siguiente material:

- Estufa (Selecta M140B, J. P. Selecta, Barcelona, España).
- Desecador de vidrio con desecante de sílice.
- Crisoles.
- Balanza analítica AC-100 (Mettler Toledo, Columbus, EE. UU.)
- Espátula de laboratorio.
- Horno mufla (*Carbolite furnaces* CSF 110, *Carbolite Gero Ltd.*, Sheffield, Reino Unido).
- Papel de filtro cuantitativo (Whatman® Grado 40, Merck KGaA, Darmstadt, Alemania).
- Ácido clorhídrico 6 N.
- Diverso material de laboratorio (matraces, vasos de precipitado, pipetas. etc.).
- Agua destilada.
- Cloruro de estroncio.
- Espectrómetro de absorción atómica *Thermo S Series* (*Thermo Fisher Scientific*, Waltham, EE. UU.) con *autosampler*.
- Fotómetro de llama (Corning Inc., Corning, EE. UU.).

En los tres tipos de órganos se determinó el contenido en calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+). El Ca^{2+} y el Mg^{2+} se evaluaron con el espectrómetro de absorción atómica, mientras que el K^+ y el Na^+ con el fotómetro de llama. Antes de efectuar dichos análisis, se llevó a cabo el siguiente procedimiento general:

- 1) Para la preparación de las muestras y posterior evaluación de los minerales se recurrió a una técnica muy frecuente según la bibliografía consultada (Chapman y Pratt, 1973; Mills y Benton, 1996), la mineralización por vía seca, mediante la calcinación de las muestras y su posterior ataque con ácido clorhídrico (HCl). En primer lugar, las muestras se colocan en estufa durante 1 h a una temperatura aproximada de 60 °C para que pierdan la humedad que pudieran tener. Tras ello, se van pasando al desecador que contiene desecante de sílice con el propósito de que la temperatura de los botes disminuya y poder manipularlos (**Figura 32**).



Figura 32: Desecador con muestras.

- 2) Se determina y registra el peso los crisoles en una balanza analítica y posteriormente, con la ayuda de una espátula se va agregando la muestra correspondiente hasta alcanzar 0,5 g en el caso de muestras foliares y radiculares, o 1 g para tallos, como se contempla en la **Figura 33**.



Figura 33: Pesaje de muestra en balanza analítica.

- 3) Tras tener los crisoles con la muestra, se introducen en el horno mufla, donde estuvieron a 500 °C durante 4 h. En la **Figura 34** se representa la rampa de calentamiento gradual empleada para la calcinación de las muestras.

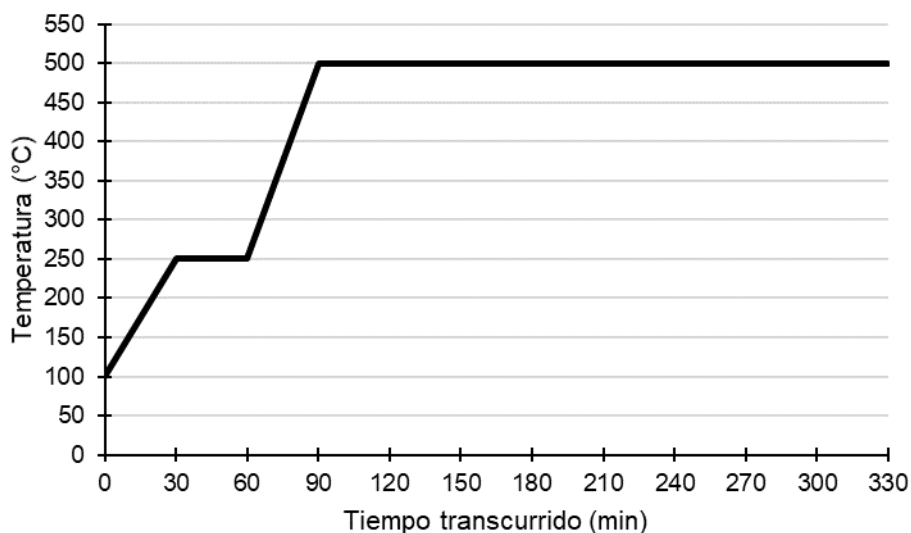


Figura 34: Rampa de temperaturas para la calcinación de muestras en horno mufla.

- 4) Las muestras calcinadas en los crisoles (**Figura 35**), se pesan y después se atacan con 5 ml de HCl 6 N como se aprecia en la **Figura 36**. De los crisoles se filtra la muestra a través de papel de filtro cuantitativo a matraces aforados de 50 ml y se enrasa con agua destilada.



Figura 35: Muestras calcinadas tras estar en el horno mufla.

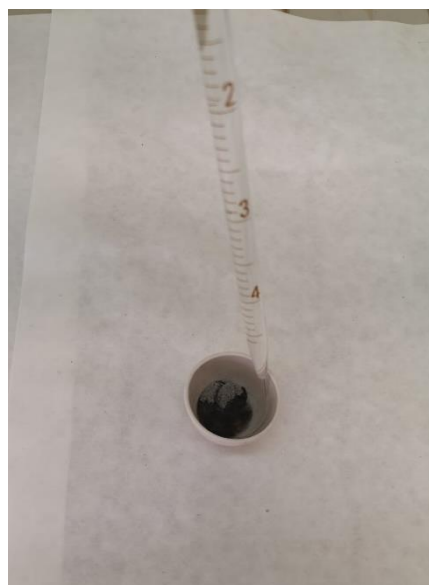


Figura 36: Ataque con 5 ml de HCl.

6.4.2.1. Determinación de Ca^{2+} y Mg^{2+}

Primeramente, se elaboran patrones de Ca^{2+} y Mg^{2+} para hacer las respectivas curvas con los valores de referencia. Se efectuaron cinco patrones con diferentes concentraciones: 0, 1, 2, 4 y 5 ppm para el Ca^{2+} y 0, 0,1, 0,2, 0,4 y 0,5 ppm para el Mg^{2+} . Además, todas estas disoluciones se preparan de forma que contengan

un 10 % V/V de una disolución madre de SrCl_2 4,5% P/V, que actúa como inhibidor de la ionización evitando posibles interferencias de otros iones en el análisis.

Se configuró el programa del espectrómetro de absorción atómica y se realizó la curva con los patrones. A continuación, se prepararon las diluciones pertinentes para cada tipo de muestras (**Cuadro 4**), a las cuales se añade la misma cantidad de la disolución de SrCl_2 que a los patrones, de forma que la concentración final de este compuesto en toda muestra analizada sea 0,45 % P/V.

Cuadro 4: Diluciones empleadas para cada tipo de muestra en la evaluación de Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Tipo de muestra	Ca^{2+}	Mg^{2+}
Foliar	1:100	1:500
Caulinar	1:100	1:500
Radicular	1:25	1:500

Todas las diluciones se colocan en el *autosampler*, como se muestra en la **Figura 37**, y de forma automática se registra el contenido en Ca^{2+} y Mg^{2+} de las muestras (**Figura 38**).



Figura 37: Disoluciones de las muestras en el *autosampler*.

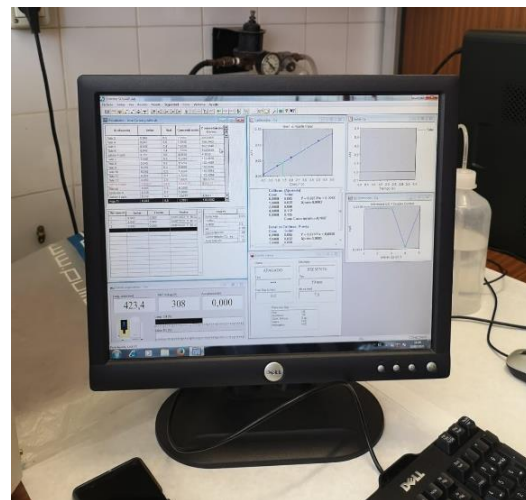


Figura 38: Registro de los valores determinados por el espectrómetro de absorción atómica.

6.4.2.2. Determinación de K^+ y Na^+

En primer lugar, se prepararon patrones de K^+ y Na^+ para hacer las respectivas curvas con los valores de referencia. En ambos casos, partiendo de una solución estándar de 1000 ppm de cada elemento, se realizaron cinco patrones con diferentes concentraciones: 0, 2, 4, 6 y 8 ppm.

Teniendo la curva, se introducen las diluciones y se registran los resultados (**Figura 39**). En algunos casos fue necesario emplear dos diluciones diferentes para muestras de un mismo tipo, con el propósito de conseguir una lectura acorde a la curva establecida. Las diluciones empleadas fueron las que se muestran en el **Cuadro 5**.



Figura 39: Determinación de la concentración de K^+ o Na^+ en el fotómetro de llama.

Cuadro 5: Diluciones empleadas para cada tipo de muestra en la evaluación de K^+ y Na^+ . (*) Diluciones predominantes para ese tipo de muestras.

Tipo de muestra	K^+	Na^+
Foliar	1:50* y 1:100	1:5* y 1:10
Caulinar	1:100* y 1:50	1:250* y 1:100
Radicular	1:50	1:50* y 1:100

6.5. Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el *software* IBM® SPSS® Statistics versión 25 para Windows (IBM Corporation, Armonk, Nueva York, EE. UU.).

Las diferencias de elementos minerales entre tratamientos se determinaron mediante ANOVA, y las diferencias entre conductancia estomática y parámetros de crecimiento vegetativo mediante la prueba no paramétrica *H* de Kruskal – Wallis por no cumplirse las condiciones de normalidad y homocedasticidad. En ambos casos, se estableció un nivel de significación de $P \leq 0,05$, salvo valores aún menores que son adecuadamente indicados en el pie de las gráficas correspondientes.



7. Resultados y discusión

Dado el carácter fijo de las plantas, su subsistencia en los entornos cambiantes en los que habitan depende de las respuestas a los estímulos externos. Cuando la planta se encuentra bajo condiciones de estrés, activa una serie de mecanismos de control para ajustar determinados procesos a fin de mantener el equilibrio funcional y hacer frente a la adversidad (Jeyakumar et al., 2007).

Por tanto, la exposición de las plantas a circunstancias adversas (como, por ejemplo, el tratamiento salino que se estudia en este trabajo) provoca un conjunto diverso de cambios fisiológicos, morfológicos y de desarrollo; en este apartado se recogen los resultados obtenidos mediante la monitorización de estos cambios durante el periodo en que las plántulas de papaya estudiadas estuvieron sometidas a las condiciones de estrés salino.

7.1. Crecimiento vegetativo

7.1.1. Número de hojas

La **Figura 40** muestra la evolución del promedio de hojas totales para las plantas de los dos tratamientos. Se observa que cuando se comenzaron a tomar las medidas (ocho días antes de comenzar los tratamientos), la cantidad de hojas es prácticamente idéntica en las plantas que serían sometidas al tratamiento control ($11,06 \pm 0,25$) y al estrés salino ($10,81 \pm 0,12$). Este mismo patrón se observa en las medidas tomadas el día que comenzaron los tratamientos (DDT 0), lo que pone de manifiesto la homogeneidad de las plantas ensayadas: $12,52 \pm 0,49$ hojas en T1 frente a $12,43 \pm 0,12$ hojas en T2. Sin embargo, a partir de la siguiente medida (DDT 8) comienzan a aparecer diferencias significativas entre los dos tratamientos, observándose un menor número de hojas en las plantas sometidas al estrés salino. Esta diferencia entre tratamientos se va haciendo más pronunciada a medida que avanza el ensayo.

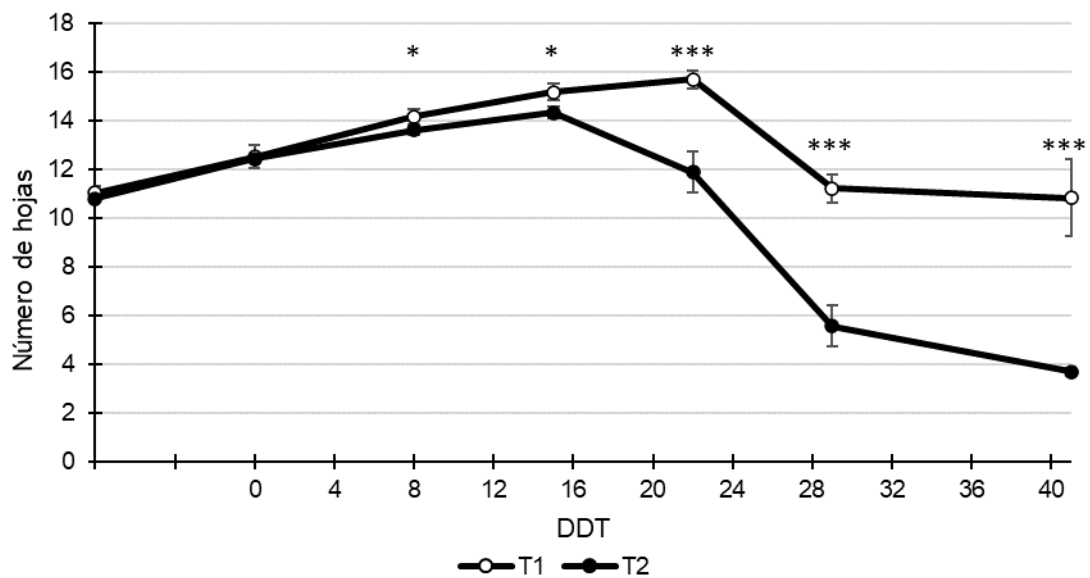


Figura 40: Evolución del promedio de número de hojas funcionales de las plantas de T1 y T2 durante el ensayo. Los tratamientos presentan diferencias significativas de acuerdo con el test *H* de Kruskal – Wallis cuando se indica con asterisco/s: (*), $P \leq 0,05$; (**), $P \leq 0,001$.

El mayor número de hojas por planta se alcanza a los 15 días en el caso de T2 ($14,33 \pm 0,24$), y a partir de ese momento comienza a descender el promedio de hojas; por su parte, las plantas del tratamiento control alcanzan su máximo valor de número de hojas a los 22 días ($15,70 \pm 0,35$), descendiendo su número a partir de ese momento. La **Figura 41** muestra el aspecto de las plantas del T1 y del T2 en ese momento del ensayo.



Figura 41: Plantas del T1 (izquierda) y del T2 (derecha), 22 DDT.

Al margen de esa tendencia general de alcanzar un mayor número de hojas hacia la mitad del ensayo y luego ocurrir la caída de las hojas más viejas, ésta se produce de forma mucho más drástica en las plantas sometidas a estrés salino, y alcanza su máxima expresión al finalizar el ensayo (DDT 41, **Figura 42**), cuando se observaron valores del número de hojas para los tratamientos 1 y 2 de $10,85 \pm 1,58$ y $3,70 \pm 0,15$, respectivamente. Si comparamos este número de hojas al final del ensayo con la primera medida antes del comienzo del mismo, se observa que para T1 el número de hojas es análogo al valor inicial ($10,85 \pm 1,58$ frente a $11,06 \pm 0,25$), mientras que para T2 se ha producido una pérdida de hojas del 66 % ($3,70 \pm 0,15$ frente a $10,81 \pm 0,12$). Además de la abscisión foliar, al final del ensayo las hojas de T2 presentan un menor tamaño que las de T1, así como un aspecto clorótico debido a la toxicidad por salinidad.



Figura 42: Planta del T1 (izquierda) y del T2 (derecha), al término del ensayo (41 DDT).

García (2013) también comprobó los efectos de concentraciones salinas elevadas sobre el número de hojas funcionales de papaya. Su trabajo muestra una conducta llamativa en cuanto al número de hojas por planta, ya que se producen múltiples y acusadas variaciones tanto en las plantas control, como en las sometidas a estrés durante el transcurso del experimento, al igual que ocurrió en el presente estudio. Posiblemente estas circunstancias estén relacionadas con factores ambientales que no fueron objeto de control en ambos ensayos.

La autora, sometió plantas de dos cultivares de *C. papaya* a dos tratamientos salinos y durante periodos de tiempo diferentes. Las plantas de 'Intenza' se trataron con la mayor concentración de sal (80 mM de NaCl), y presentaron



diferencias significativas respecto al control a partir de 57 días tras el comienzo de los tratamientos, hasta los 99. A partir de este momento, y hasta el fin del experimento (126 DDT) las diferencias no fueron significativas.

Por otro lado, plantas de 'Siluet' se sometieron a una concentración menor (60 mM de NaCl), produciéndose diferencias significativas respecto a las plantas no tratadas en el último periodo del ensayo, mostrando un 37,65 % menos de hojas que las plantas control, al final del experimento (90 DDT). Este valor fue algo superior que el extraído en este ensayo (34,1 %) con una concentración salina superior (100 mM de NaCl) 41 DDT.

Se deduce que a pesar de que el número de hojas funcionales dependen notablemente de las condiciones ambientales, el estrés salino ejerce una fuerte influencia sobre este parámetro. Del mismo modo, Leidi y Pardo (2002) confirman que uno de los efectos más evidentes de la salinidad sobre las plantas es la reducción de absorción de agua, que motiva el descenso de expansión foliar.

7.1.2. Altura de las plantas

En la **Figura 43** se expone la evolución de los dos tratamientos ensayados respecto a la altura promedio de los tallos. Antes de comenzar los tratamientos el promedio de altura de T1 y T2 es semejante ($8,35 \pm 0,06$ cm y $7,90 \pm 0,14$, respectivamente). Al comienzo de los tratamientos (DDT 0) la similitud de los valores promedio disminuye levemente, pero no es hasta ocho días tras el comienzo del tratamiento cuando se aprecian diferencias significativas (DDT 8). A partir de ese momento y hasta el final del experimento, las diferencias en altura de las plantas de ambos tratamientos son significativamente diferentes. En la **Figura 41** se percibe la variación a los 22 días de comenzar los tratamientos.

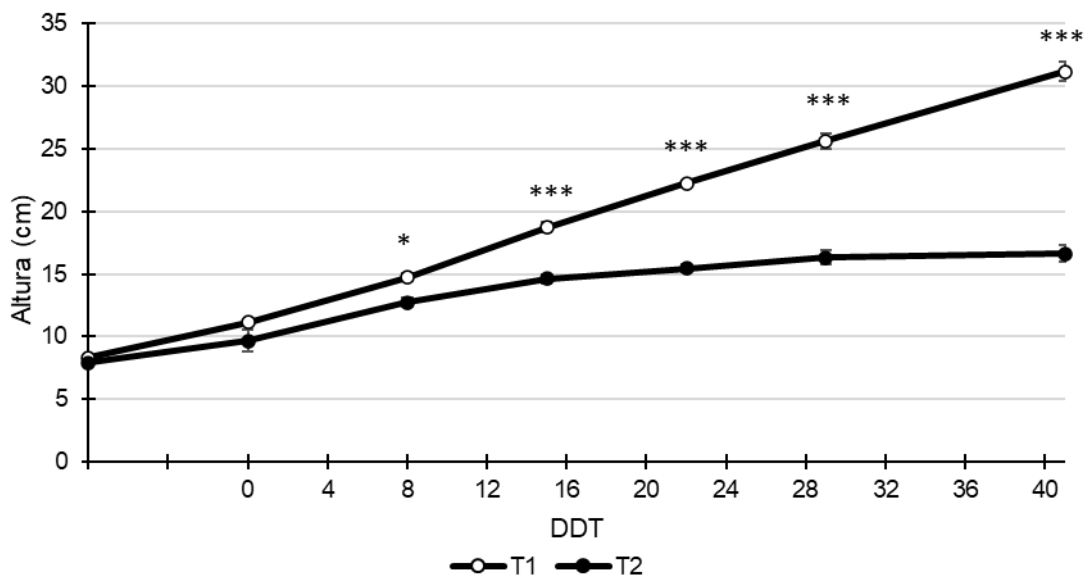


Figura 43: Evolución del promedio de la altura de las plantas de T1 y T2 durante el ensayo. Los tratamientos presentan diferencias significativas de acuerdo con el test *H* de Kruskal – Wallis cuando se indica con asterisco/s: (*), $P \leq 0,05$; (***), $P \leq 0,001$.

Tanto el tratamiento control como el salino muestran una tendencia creciente respecto a la altura a lo largo del ensayo, por lo que los valores máximos de altura se alcanzan al final de este (DDT 41), T1 con un promedio máximo de $31,15 \pm 0,77$ cm y T2 con $16,60 \pm 0,66$ cm. Se percibe de estos valores que T1 presenta un crecimiento mucho más acusado que T2. Concretamente, al término del ensayo, el tratamiento control incrementó su altura respecto a la primera toma de datos un 273 % ($31,15 \pm 0,77$ respecto a $8,35 \pm 0,06$), mientras que el tratamiento salino tan solo lo hizo un 110 % ($16,60 \pm 0,66$ respecto a $7,90 \pm 0,14$). Esta desemejanza en altura es notablemente patente en la **Figura 42**.

Cabe destacar que, en la última etapa del experimento, las plantas sometidas a salinidad ralentizaron su crecimiento, incrementando solamente un 1,7 % entre 29 DDT y el final del ensayo, a diferencia de las plantas control, que para el mismo periodo el aumento fue de 21,5 %.

García (2013) revela en su estudio que, plantas de ‘Intenza’ sometidas a estrés salino (80 mM de NaCl), mostraron a partir de los 43 días del comienzo del tratamiento, diferencias significativas respecto a plantas control en cuanto a la altura de las plantas. Además, en la etapa final de su ensayo las plantas mostraron una detención total de su crecimiento.

Por otro lado, plantas de ‘Siluet’ sometidas a una concentración salina menor (60 mM de NaCl), no presentaron diferencias significativas con las plantas control. Asimismo, dicha concentración de salinidad fomentó el desarrollo en altura, llegando a superar la curva de crecimiento de las plantas control desde los 35 días tras la primera aplicación del tratamiento hasta el 62. Esto pone de

manifiesto la relativa tolerancia de la papaya a la salinidad (Mujeriego, 1990; Rhoades et al., 1992; Hueso et al., 2015; Villalobos et al., 2017c), y que, las plantas jóvenes son más sensibles a esta (Agustí, 2014).

7.1.3. Diámetro de los tallos

La **Figura 44** presenta la evolución del promedio del diámetro de los tallos de ambos tratamientos. Se aprecia que los valores iniciales de diámetro son similares en ambos tratamientos ($9,84 \pm 0,10$ mm para T1 y $10,10 \pm 0,16$ mm para T2), adquiriendo una mayor uniformidad entre ellos para el día que comenzaron los tratamientos (DDT 0): $12,11 \pm 0,16$ mm de diámetro en el tratamiento control y $12,15 \pm 0,32$ mm en el tratamiento salino.

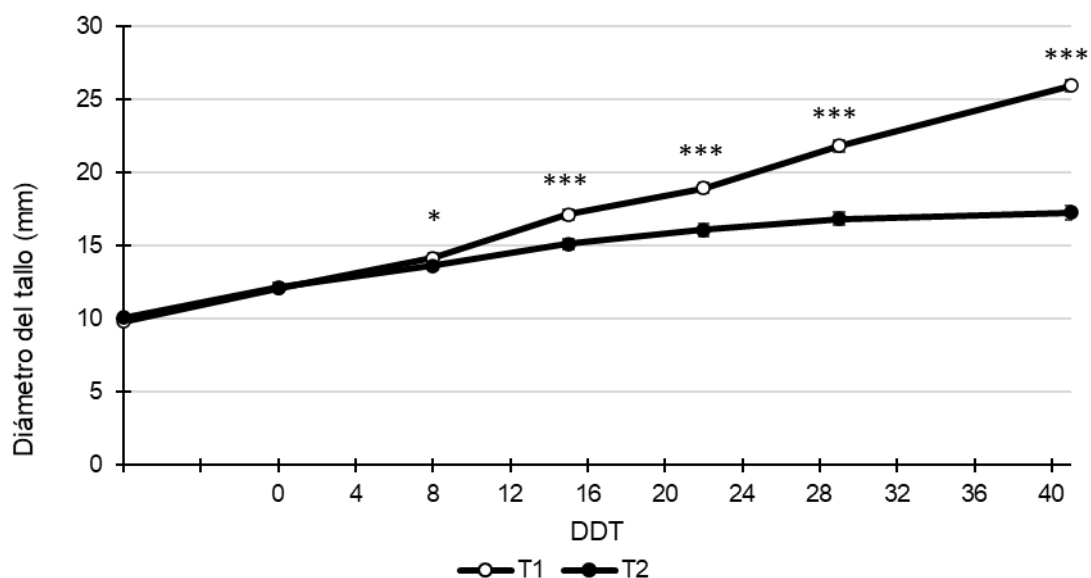


Figura 44: Evolución del promedio del diámetro de los tallos de las plantas de T1 y T2 durante el ensayo. Los tratamientos presentan diferencias significativas de acuerdo con el test *H* de Kruskal – Wallis cuando se indica con asterisco/s: (*), $P \leq 0,05$; (**), $P \leq 0,01$; (***), $P \leq 0,001$.

Ambos tratamientos muestran una tendencia creciente respecto al parámetro diámetro de tallo, hasta alcanzar el mayor valor al final del experimento (DDT 41) en ambos casos ($25,98 \pm 0,39$ mm en el caso de T1 y $17,27 \pm 0,48$ mm en T2). En la **Figura 42** se advierte la disparidad entre los diámetros de plantas de T1 y T2 en ese momento.

Pese a la evolución creciente de este parámetro en ambos tratamientos, a partir de 8 DDT las diferencias significativas comienzan a acentuarse notablemente, por lo que el tratamiento salino manifiesta un crecimiento en grosor de tallo más pausado que el tratamiento control.

Comparando los datos iniciales respecto a los finales del ensayo, se advierte que el promedio del grosor de tallo de T2 se incrementó en un 71 % ($10,10 \pm 0,16$ frente a $17,27 \pm 0,48$). Lo mismo ocurre con T1, aunque como ya se mencionó previamente, la evolución de este es mucho más notable, con una diferencia de 164 % entre la primera toma de datos y la última (DDT 41) ($9,84 \pm 0,10$ frente a $25,98 \pm 0,39$).

García (2013) evaluó el efecto de una concentración salina menor que la del presente estudio (80 mM) en el perímetro del tallo de plantas de *C. papaya* 'Intenza', y también detectó diferencias significativas respecto a plantas no tratadas (36 DDT). La salinidad provocó una clara disminución del perímetro (28,2 % menos que las plantas control al final del ensayo, tras 126 días de tratamiento), al igual que ocurre con las plantas tratadas de este experimento (diferencia de diámetro entre T1 y T2 de un 33,5% al término del mismo, a los 41 DDT). Asimismo, las plantas de 'Siluet' tratadas con 60 mM de NaCl también mostraron un menor desarrollo en grosor que las plantas control (21,1 % menos tras 90 días de tratamiento), pero las diferencias no fueron significativas.

7.2. Conductancia estomática

Jeyakumar et al., (2007) exponen que la conductancia estomática (g_s) es uno de los indicadores fisiológicos más interesantes, ya que decae cuando las plantas están expuestas a estrés abiótico: se percibió que la conductancia estomática junto con la asimilación de CO_2 fueron las primeras variables evaluadas que disminuyeron a medida que las plantas de papaya experimentaban estrés.

En *C. papaya*, la densidad estomática de una hoja bien iluminada por el sol es aproximadamente de 400 estomas por mm^2 , aunque este valor variará en función de las condiciones de luminosidad, temperatura y contenido de agua en el suelo (Jiménez et al., 2014).

En las dos primeras tomas de datos, ocho días antes de comenzar los tratamientos y el día que se comenzaron, los valores promedio g_s no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, siendo el valor máximo para ambos el primer día de medición, $484,59 \pm 84,02$ $mmol/(m^2 s)$ para T1 y $511,97 \pm 91,17$ $mmol/(m^2 s)$ para T2. Por otro lado, el tratamiento control tomó su valor mínimo 22 DDT, mientras que el tratamiento 2 lo hizo al finalizar el ensayo (41 DDT) ($236,25 \pm 51,48$ y $21,60 \pm 3,10$ $mmol/(m^2 s)$, respectivamente).

A partir del comienzo de los tratamientos las mediciones de T1 y T2 comienzan a ser significativamente diferentes.

Parés et al. (2008), determinaron que la salinidad disminuye la densidad estomática en plantas de *C. papaya*. Este ajuste podría estar relacionado con el objetivo, por parte de la planta, de conservar el agua y no perderla por transpiración. Esto ayuda a comprender las amplias diferencias que se dan en el ensayo entre ambos tratamientos para los valores de g_s , llegando al final de este (41 DDT) a un valor de T1 13,6 veces mayor que el de T2 ($292,85 \pm 23,32$ $mmol/(m^2 s)$ frente a $21,60 \pm 3,10$ $mmol/(m^2 s)$, respectivamente).

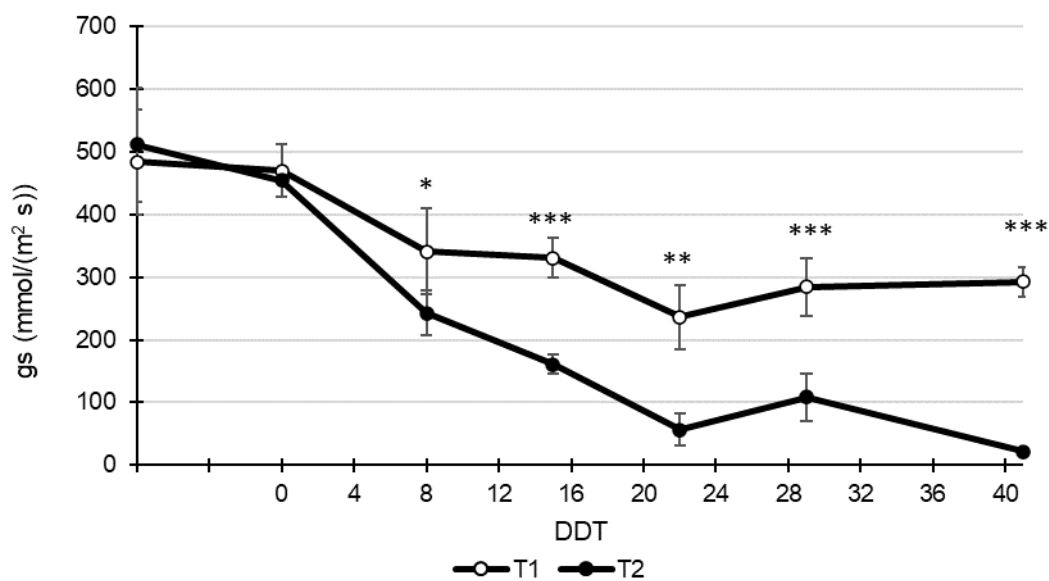


Figura 45: Evolución del promedio de la conductancia estomática de las plantas de T1 y T2 durante el ensayo. Los tratamientos presentan diferencias significativas de acuerdo con el test *H* de Kruskal – Wallis cuando se indica con asterisco/s: (*), $P \leq 0,05$; (**), $P \leq 0,01$; (***), $P \leq 0,001$.

7.3. Análisis minerales

7.3.1. Minerales foliares

En ambos tratamientos el contenido de Ca^{2+} en las hojas ($1,46 \pm 0,04$ % para T1 y $1,21 \pm 0,04$ % para T2, **Figura 46 A**) al final del ensayo (41 DDT) se ajusta al intervalo considerado como óptimo por Mills y Benton (1996), de 1 a 3 %. También obedecen a los valores extraídos por Pío (2004), con una concentración media de 1,75 % en papayas de dos meses y medio de edad.

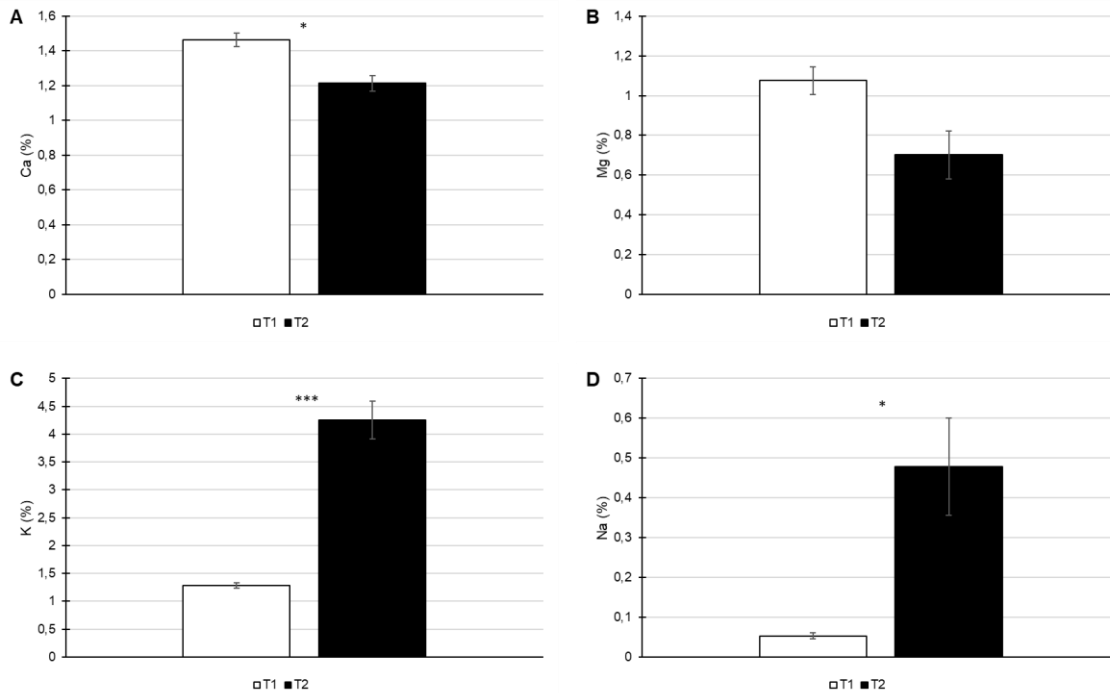


Figura 46: Contenido promedio de calcio (A), magnesio (B), potasio (C) y sodio (D) en hojas de las plantas de T1 y T2 al término del ensayo. Los tratamientos presentan diferencias significativas de acuerdo con el test ANOVA cuando se indica con asterisco/s: (*), $P \leq 0,05$; (***) , $P \leq 0,001$.

En los estudios realizados por García (2013) se advierte que el contenido foliar de Ca^{2+} disminuye por la influencia salina, siendo más acusada la disminución cuanto mayor es la concentración de NaCl. Este hecho se corresponde con lo ocurrido en este ensayo. Tal y como se muestra en la **Figura 46 A**, el contenido en Ca^{2+} fue significativamente superior en las plantas control respecto a las del tratamiento salino.

La deficiencia de Ca^{2+} en las plantas afecta a la división celular, es por ello, que los síntomas son más notables en las zonas meristemáticas de raíces, tallos y hojas (Bonilla, 2013). En parte, esto permite interpretar la reducción de crecimiento de las plantas sometidas a estrés salino que se discutió en **Crecimiento vegetativo**.

Mills y Benton establecen 0,4 – 1,2 % como el intervalo óptimo de Mg^{2+} foliar, valores similares a los determinados por Salamanca y Román (1999) en peciolos (0,5 – 1,5 %). El trabajo de Pío (2004) exhibió datos parecidos, con oscilaciones entre 0,6 y 0,92 %. Por tanto, los resultados de este experimento se adecuan a los de ensayos previos.

La tendencia que se muestra en los estudios de García (2013) sigue la línea de los de este trabajo, pues por lo general, el efecto de la salinidad dio lugar a una menor concentración de Mg^{2+} en las hojas, aunque no hubo diferencias significativas respecto a las plantas control ($0,70 \pm 0,12$ % y $1,08 \pm 0,07$ %, respectivamente, como se aprecia en la **Figura 46 B**).

El contenido de K^+ de las hojas del tratamiento control ($1,28 \pm 0,05$ %) se puede considerar insuficiente en comparación con los valores establecidos por diversos autores: 3,3 – 5,5 % (Mills y Benton, 1996); 2,11 – 2,66 % (Pío 2004); o 3 – 6 % en peciolos (Salamanca y Román, 2000). Sin embargo, el contenido de K^+ en las hojas del T2 ($4,26 \pm 0,34$ %) sí se encuadra en los valores de referencia. Por otro lado, García (2013) observó en algunos casos un contenido de K^+ menor, pero no significativamente, en las plantas de tratamiento salino, mientras que en otros casos sí fue significativamente mayor en las plantas sometidas a estrés, aunque de forma general el comportamiento no es el mismo que el observado en las plantas de este ensayo.

En cuanto al Na^+ , García (2013) determinó una concentración en hojas de 0,045 % en plantas del cultivar Siluet sin estrés, mientras que para plantas regadas con agua salina (60 mM de NaCl) fue de 0,680 % (58 DDT). Las plantas del presente estudio mostraron el mismo comportamiento y concentraciones semejantes, presentando $0,05 \pm 0,01$ % en T1 y $0,48 \pm 0,12$ % en T2.

Una de las principales características de la tolerancia celular a la salinidad es la capacidad de mantener una elevada relación K^+/Na^+ en el citosol para evitar el efecto tóxico del Na^+ (Leidi y Pardo, 2002). Como se observa en la **Figura 46 C** y **D**, las hojas de las plantas del T2 sufren un aumento de la concentración de K^+ y Na^+ respecto a las del T1, con el propósito de mantener esa relación K^+/Na^+ elevada.

Del mismo modo, Bonilla (2013) asegura que, generalmente, las plantas tienden a absorber selectivamente más K^+ que Na^+ . Esta conducta puede dar sentido a que, debido a una mayor concentración de NaCl en el sustrato, las plantas de papaya incrementen notablemente la absorción de K^+ .

7.3.2. Minerales en tallo

La acumulación de Ca^{2+} en los tallos ($1,14 \pm 0,04$ % en T1 y $0,79 \pm 0,02$ % en T2, **Figura 47 A**), sigue la misma conducta que en las hojas, habiendo mayor concentración en T1 que en T2, aunque el contenido en este órgano es menor que en las hojas para ambos tratamientos.

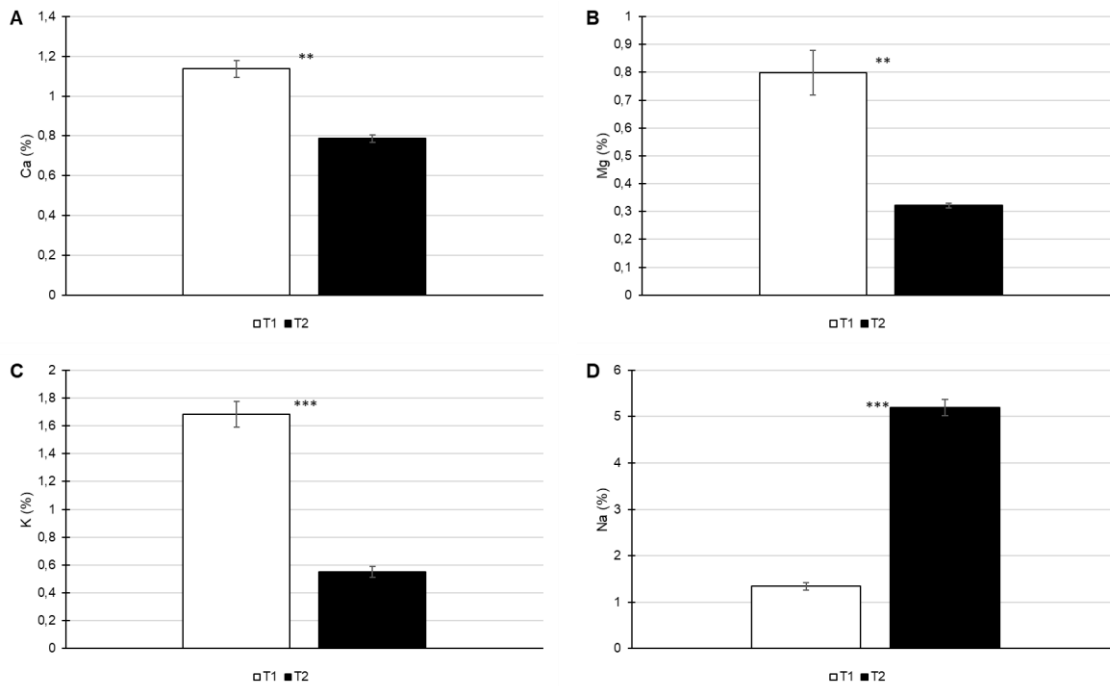


Figura 47: Contenido promedio de calcio (A), magnesio (B), potasio (C) y sodio (D) en tallos de las plantas de T1 y T2 al término del ensayo. Los tratamientos presentan diferencias significativas de acuerdo con el test ANOVA cuando se indica con asterisco/s: (**), $P \leq 0,01$; (***), $P \leq 0,001$.

En el experimento de Pío (2004), el contenido medio de Ca^{2+} en tallos fue de 0,98 %, valor análogo a los obtenidos en los dos tratamientos de este ensayo.

De igual forma, hay una mayor concentración de Mg^{2+} en los tallos de las plantas control ($0,80 \pm 0,08$ %) que en las sometidas a tratamiento salino ($0,32 \pm 0,01$ %), aunque en este órgano las diferencias entre tratamientos sí son significativas (Figura 47 B).

La concentración advertida en las plantas del T1 es algo superior al rango óptimo del estudio de Pío (2004), entre 0,53 y 0,65 %, en plantas sanas. No obstante, el contenido de Mg^{2+} en T2 ($0,32 \pm 0,01$ %) es considerablemente más bajo que los valores de referencia. De esto se percibe que la salinidad tiene un notable efecto sobre la acumulación de Mg^{2+} en los tallos.

Los valores de K^+ en tallos obtenidos por Pío (2004) en plantas control variaron entre 1,30 % y 1,60 %, por lo que la concentración en tallos del T1 es aceptable ($1,68 \pm 0,09$ %), mientras que la de T2 es notoriamente inferior ($0,55 \pm 0,04$ %), tanto al intervalo establecido por Pío (2004), como al valor obtenido en T1, presentando diferencias significativas como se puede apreciar en la Figura 47 C.

Llama la atención que en este órgano la tendencia acumulativa de K^+ por ambos tratamientos es la inversa que la de las hojas.

Por otro lado, en el tallo se concentra el mayor contenido de Na^+ en la planta para los dos tratamientos. La concentración en T2 fue significativamente superior a la de T1 ($5,19 \pm 0,17 \%$ y $1,34 \pm 0,08 \%$, respectivamente), como se aprecia en la **Figura 47 D**.

La concentración de K^+ en el tallo es 3,06 veces mayor en el T1 que en el T2, mientras que el contenido en Na^+ encontrado en las plantas del T1 corresponde únicamente a 0,26 veces el valor hallado en el T2. Por tanto, en este órgano la relación K^+/Na^+ es de 1,25 en las plantas control y de 0,11 en las plantas estresadas: a diferencia de lo que se observó y discutió en el apartado anterior **Minerales foliares**, las plantas sometidas a estrés salino no presentan esa inclinación de aumentar la relación K^+/Na^+ , por lo que al contrario que en las hojas, la acumulación de Na^+ no indujo la acumulación de K^+ .

7.3.3. Minerales en raíz

Coincidiendo con los resultados de Pío (2004), el contenido más bajo de Ca^{2+} se halla en las raíces. No hay diferencias significativas entre los tratamientos, siendo los valores muy semejantes: $0,64 \pm 0,06 \%$ en T1 y $0,55 \pm 0,01 \%$ en T2 (**Figura 48 A**). Asimismo, los valores de ambos tratamientos son semejantes a los del intervalo óptimo considerado por este autor ($0,49 \%$ – $0,60 \%$).

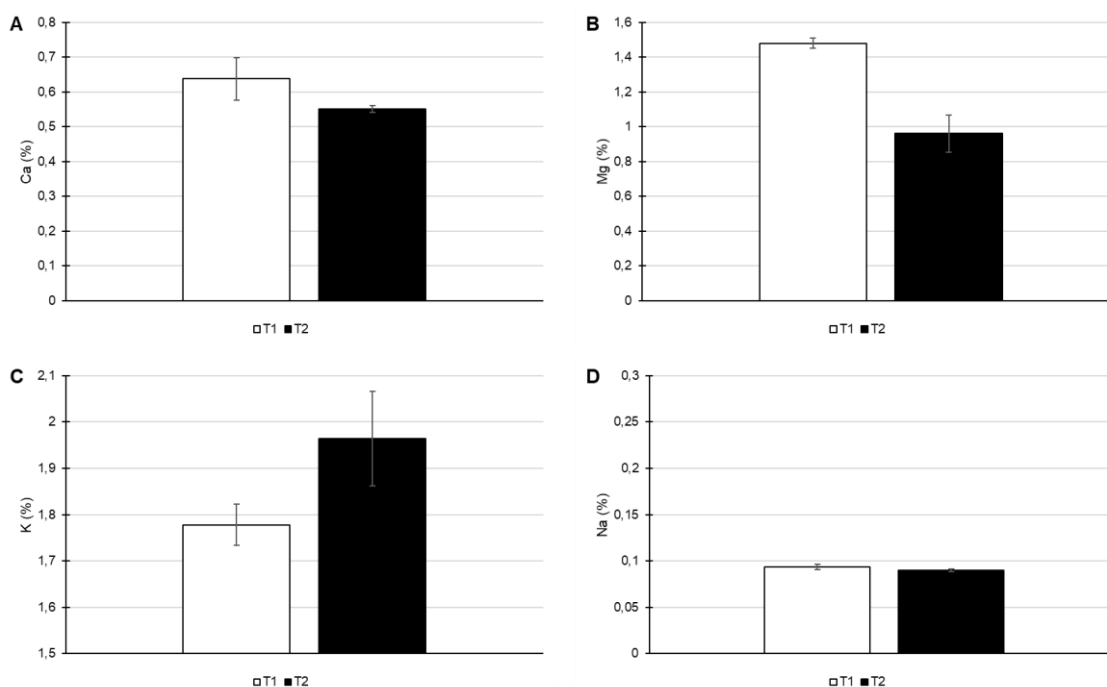


Figura 48: Contenido promedio de calcio (A), magnesio (B), potasio (C) y sodio (D) en raíces de las plantas de T1 y T2 al término del ensayo. Los tratamientos no presentan diferencias significativas de acuerdo con el test ANOVA ($P \leq 0,05$).

El estrés salino no parece alterar la acumulación de Ca^{2+} en las raíces.



Como se observa en la **Figura 48 B**, la cantidad de Mg^{2+} hallada en raíces al final del ensayo fue de $1,48 \pm 0,03$ % y de $0,96 \pm 0,11$ % para los tratamientos 1 y 2, respectivamente. El análisis estadístico muestra que la diferencia entre la cantidad de magnesio presente en las raíces de las plantas sometidas a los dos tratamientos no es significativa, al igual que ocurre con el Mg^{2+} foliar (**Minerales foliares**). Ambos valores son algo elevados respecto al obtenido en plantas sanas por Pío (2004) (0,56 % – 0,76 %).

El K^+ en la raíz presenta el mismo comportamiento que el discutido en **Minerales foliares** para las hojas, aunque la concentración en estos órganos en el tratamiento salino es notablemente superior. El T1 mostró un contenido de $1,78 \pm 0,04$ % mientras que el T2 fue superior con $1,96 \pm 0,10$ %, aunque la estadística no reveló diferencias significativas (**Figura 48 C**). Los valores resultantes son llamativamente inferiores al intervalo de 2,65 % – 3,07 % que propone Pío (2004).

A diferencia de los otros órganos, en la raíz el contenido de Na^+ es ligeramente superior en T1 que en T2 (1,04 veces más) (**Figura 48 D**), mientras que en los otros la concentración del T2 es marcadamente superior respecto la del T1. El contenido en T1 es de $0,093 \pm 0,00$ % y de $0,090 \pm 0,00$ % en T2. No hay diferencias significativas entre los tratamientos.

Ambos valores de Na^+ obtenidos en la raíz son apreciablemente menores en comparación con los obtenidos por Pío (2004), que establece un rango apropiado desde 0,75 % a 1,00 %.

En las raíces al igual que en las hojas, se da condición razonada en la sección **Minerales foliares**, puesto que las plantas sometidas a estrés salino tendieron a acumular K^+ , y por tanto, incrementar la relación K^+/Na^+ , a pesar de que la concentración en Na^+ , como ya se dijo, es muy similar en ambos tratamientos en las raíces.

Por otro lado, el bajo contenido de Na^+ en las raíces respecto a los otros dos órganos puede tener sentido por el movimiento de sales que se produce desde las raíces hasta las hojas a través del flujo de agua provocado por la transpiración foliar (Leidi y Pardo, 2002). De este modo, también se interpreta que en las hojas y tallos del T2, el contenido de Na^+ respecto al T1 sea considerablemente superior.



8. Conclusiones

Las principales conclusiones de este trabajo se exponen a continuación:

1) Crecimiento vegetativo:

- El número de hojas por planta, el diámetro de los tallos y la altura de las plantas fueron significativamente menores en las plantas sometidas a estrés salino en comparación con las plantas control desde los 8 días después del comienzo de los tratamientos, tendencia que se fue acrecentando a medida que transcurrió el ensayo hasta alcanzar una máxima diferencia a los 41 días, al final del mismo.
- Las hojas de las plantas sometidas a estrés salino presentan un menor tamaño, así como un aspecto clorótico debido a la toxicidad por salinidad.

2) Conductancia estomática:

- La conductancia estomática fue significativamente menor en las plantas sometidas a estrés salino respecto a las plantas no tratadas a partir de los 8 días del comienzo de los tratamientos, hasta el final de los mismos a los 41 días, incrementándose esta diferencia con el tiempo.

3) Concentración de los elementos minerales al final del ensayo:

- El contenido en calcio en las hojas fue significativamente menor en las plantas sometidas a estrés salino.
- El contenido en magnesio en las hojas no presentó diferencias significativas entre tratamientos.
- El contenido en potasio y sodio en las hojas fue significativamente mayor en las plantas sometidas a estrés salino.
- El contenido en calcio, magnesio y potasio en los tallos fue significativamente menor en las plantas sometidas a estrés salino.
- El contenido en sodio en los tallos fue significativamente mayor en las plantas sometidas a estrés salino.
- El contenido en calcio, magnesio, potasio y sodio en las raíces no presentó diferencias significativas entre tratamientos.
- Las concentraciones de calcio y magnesio siguen la misma tendencia entre ambos tratamientos (menor en las plantas sometidas a estrés salino) en las hojas, los tallos y las raíces.
- La concentración de potasio sigue la misma tendencia entre ambos tratamientos (mayor en las plantas sometidas a estrés salino) en las hojas y las raíces.
- La concentración de sodio sigue la misma tendencia entre ambos tratamientos (mayor en las plantas sometidas a estrés salino) en las hojas y los tallos.



9. Conclusions

The main conclusions of the present study are show bellow:

- 1) Vegetative growth:
 - The number of leaves per plant, the diameter of the stems and the height of the plants were significantly reduced in plants subjected to saline stress in contrast with control plants since 8 days after the beginning of the treatments. This tendency increased during the trial period, reaching the maximum difference between treated and untreated plants at the end of the study (41 days).
 - The leaves of plants subjected to saline stress present a smaller size, as well as a chlorotic appearance due to salinity toxicity.
- 2) Stomatal conductance:
 - The stomatal conductance was significantly lower in plants subjected to saline stress by comparison with untreated plants from 8 days after the beginning of the treatments, until the end of them at 41 days. This difference became greater over time.
- 3) Concentration of mineral elements at the end of the test:
 - The calcium concentration in leaves was significantly lower in plants subjected to saline stress.
 - The magnesium concentration in leaves did not show significant differences between treatments.
 - The potassium and sodium concentration in leaves were significantly higher in plants subjected to saline stress.
 - The calcium, magnesium and potassium concentration in stems were significantly lower in plants subjected to saline stress.
 - The sodium concentration in stems was significantly higher in plants subjected to saline stress.
 - The calcium, magnesium, potassium and sodium concentration in roots did not show significant differences between treatments.
 - The calcium and magnesium concentrations follow the same trend between both treatments (lower in plants subjected to saline stress) in leaves, stems and roots.
 - The potassium concentration shows the same trend between both treatments (higher in plants subjected to saline stress) in leaves and roots.
 - The sodium concentration follows the same trend between both treatments (higher in plants subjected to saline stress) in leaves and stems.



10. Referencias bibliográficas

- AGUSTÍ, M. Frutales tropicales de mayor interés. En: AGUSTÍ, M. *Fruticultura*. 2ª ed. Madrid: Ediciones Mundi-Presa, 2014.
- ALCARAZ ARIZA, F. J. Salinidad y vegetación [en línea]. En: ALCARAZ ARIZA, F. J. *Geobotánica*. España: Universidad de Murcia, 2012, [consulta: agosto 2021] Disponible en: <https://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema18.pdf>
- ALFONSO, M. A. *Guía técnica del cultivo de la papaya* [en línea]. El Salvador: Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova”, 2010, [consulta: julio 2021]. Disponible en: <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/frutales/GUIA%20CULTIVO%20PAPAYA.pdf>
- ALLAN, P. Carica papaya Responses under Cool Subtropical Growth Conditions [en línea]. *Acta Horticulturae*, 2002, **575**, 757-763, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Peter-Allan-2/publication/287456912_Carica_papaya_responses_Under_cool_subtropical_growth_conditions/links/56925c2908aec14fa55d6be2/Carica-papaya-responses-Under-cool-subtropical-growth-conditions.pdf
- ALONSO, M., et al. Caracterización de los frutos de cuatro cultivares de papaya del grupo Solo, introducidos en Cuba [en línea]. *Agronomía Costarricense*, 2008, **32** (2), 169-175, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2931068>
- ARANGO W, L. V. y ROMÁN H, C. A. Requerimientos de clima y suelo. En: ARANGO WIESNER, L. V. *El cultivo de la papaya en los Llanos Orientales de Colombia. Manual de asistencia técnica n.º 4*. [en línea]. Villavicencio: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), 1999, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12830?locale-attribute=es>
- ARAVIND, G., et al. Traditional and Medicinal Uses of Carica papaya [en línea]. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 2013, **1** (1), 7-15 [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://www.plantsjournal.com/archives/?year=2013&vol=1&issue=1&part=A&ArticleId=5>
- ARROYO URIARTE, P., et al. *Informe de Estado de Situación sobre “Frutas y Hortalizas: Nutrición y Salud en la España del S. XXI”* [en línea]. España: Fundación Española de la Nutrición (FEN), 2018, [consulta: agosto 2021].



Disponible en:
https://www.fen.org.es/storage/app/media/imgPublicaciones/informe_frutas_y_hortalizas_fen_2018-v1.pdf

- BADILLO, V. M. Caricaceae: segundo esquema [en línea]. *Alcance*, 1993, **43**, 1-111, [consulta: julio 2021]. Disponible en: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=orton.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=057305>
- BARRANTES-SANTAMARÍA, W., LORÍA-QUIRÓS, C. y GÓMEZ-ALPÍZAR, L. Evaluación de dos sistemas de sexado en plantas de papaya (Carica papaya) híbrido Pococí [en línea]. *Agronomía Mesoamericana*, 2019, **30** (2), 437-446, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: http://www.mag.go.cr/rev_meso/v30n02_437.pdf
- BOGANTES A., A., et al. *Guía para el cultivo de la papaya en Costa Rica* [en línea]. San José: Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2011, [consulta: julio 2021]. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10190.pdf>
- BONILLA, I. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. En: AZCÓN-BIETO, J. y TALÓN, M. *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2ª ed. [en línea]. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España, S.L, 2013, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetal2008Azcon..pdf>
- CABRERA, J. A., et al. Papaya (Carica papaya L.) Phenology under Different Agronomic Conditions in the Subtropics [en línea]. *Agriculture*, 2021, **11** (2), 173, [consulta: agosto 2021]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/2/173#cite>
- CARNEIRO, C. E. y CRUZ, J. L. Caracterização anatômica de órgãos vegetativos do mamoeiro [en línea]. *Ciência Rural*, 2009, **39** (3), 918-921 [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/262541572_Anatomical_characterization_of_vegetative_organs_of_papaya_plants/citations
- CHAPMAN, H. D. y PRATT, P. F. *Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas*. México: Trillas, 1973.
- CHAVES-BARRANTES, N. F. y GUTIÉRREZ-SOTO, M. Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II: Tolerancia y tratamiento agronómico [en línea]. *Agronomía Mesoamericana*, 2017, **28** (1), 255-271, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v28n1/43748637021.pdf>



- CRESCENCIO ARREDONDO, E. *Cosecha y postcosecha de la papaya* [en línea]. Chapingo: Universidad Autónoma de Chapingo, 2016, [consulta: septiembre 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/293491550_COSECHA_Y_POST_COSECHA_DE_LA_PAPAYA
- CRUZ, J. L., et al. Produção e partição de matéria seca e abertura estomática do limoeiro 'Cravo' submetido a estresse salino [en línea]. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 2003, **25** (3), 528-531 [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/262592025_Production_and_partitioning_of_dry_matter_and_stomatal_conductance_of_Rangpur_lemon_under_salt_stress
- DELGADO, A. y GÓMEZ, J. A. El suelo. Propiedades biológicas, físicas y químicas. En: VILLALOBOS MARTÍN, F. J. y FERERES CASTIEL, E. *Fitotecnia. Principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2017.
- ESCAMILLA GARCÍA, J. L., et al. Fertilización orgánica, mineral y foliar sobre el desarrollo y la producción de papaya cv. Maradol [en línea]. *Terra Latinoamericana*, 2003, **21** (2), 157-166, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57315595002>
- EVANS, E. A. y BALLEEN, F. H. Una mirada a la producción, el comercio y el consumo de papaya a nivel mundial [en línea]. *Ask IFAS (Institute of Food and Agricultural Sciences), University of Florida*, 2018, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/FE917>
- FAO. *Análisis de mercado de las principales frutas tropicales* [en línea]. Roma: FAO, 2020, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/cb0834es/CB0834ES.pdf>
- FAO. Carica papaya. En: FAO. *Especies forestales productoras de frutas y otros alimentos. Ejemplos de América Latina*. Roma: FAO, 1987.
- FAO. *Food and agriculture data (FAOSTAT)* [en línea] [consulta: junio 2021]. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>
- FISHER, J. B. The Vegetative and Reproductive Structure of Papaya (Carica papaya). *Lyonia*, 1980, **1** (4), 191-208 [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstream/10125/10737/1/vol1.no4-1980.pdf>
- FUENTES, G. y SANTAMARÍA, J. M. Papaya (Carica papaya L.): Origin, domestication, and production. En: MING, R. y MOORE, P. H. *Genetics and genomics of papaya* [en línea]. Nueva York: Springer, 2014, [consulta: julio



- 2021]. Disponible en: <https://link-springer-com.accedys2.bbtk.ull.es/content/pdf/10.1007%2F978-1-4614-8087-7.pdf>
- GÁRATE, A. y BONILLA, I. Nutrición mineral y producción vegetal. En: AZCÓN-BIETO, J. y TALÓN, M. *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2ª ed. [en línea]. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España, S.L., 2013, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetal2008Azcon..pdf>
 - GARCÍA BENCOMO, M. *Caracterización morfológica y fisiológica de la papaya frente a condiciones de estrés hídrico y estrés salino*. Trabajo de fin de grado. La Laguna: Universidad de La Laguna. 2013.
 - GARCÍA MEDINA, S. y ACOSTA ROBAINA, M. A. Estudio comparativo de siete cultivares de papaya [en línea]. *Granja. Revista agropecuaria*, 2015, **22**, 6-18, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <http://anuariosatlanticos.casacolombiana.com/index.php/GRANJA/article/view/9934>
 - GIL, A. I. y MIRANDA, D. Morfología de la flor y de la semilla de papaya (*Carica papaya* L.): variedad Maradol e híbrido Tainung-1 [en línea]. *Agronomía Colombiana*, 2005, **23** (2), 217-222, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v23n2/v23n2a04.pdf>
 - GLOBAL BIODIVERSITY INFORMATION FACILITY (GBIF). *Carica papaya* L. [en línea] [consulta: junio 2021]. Disponible en: <https://www.gbif.org/es/species/2874484>
 - GUZMÁN DÍAZ, G. A. *Guía para el cultivo de la papaya (Carica papaya L.)* [en línea]. San José: Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), 1998, [consulta: julio 2021]. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658papaya.pdf>
 - HUESO MARTÍN, J. J. La papaya en el Sur de España [en línea]. *Fichas de transferencia*, 2014, n.º 001, 1-6, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://www.cajamar.es/storage/documents/001-papaya-1393852821-3a401.pdf>
 - HUESO MARTÍN, J. J., SALINAS ROMERO, I. y CUEVAS GONZÁLEZ, J. El cultivo de la papaya [en línea]. *Fichas de transferencia*, 2015, n.º 009, 1-10, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://www.cajamar.es/storage/documents/009-papaya-1441794549-6f9d7.pdf>
 - IBAR, L. La papaya. En: IBAR, L. *Cultivo del aguacate, chirimoyo, mango, papaya*. 3ª ed. Barcelona: Editorial AEDOS, 1896.



- INGRAM, G.C. Family life at close quarters: communication and constraint in angiosperm seed development [en línea]. *Protoplasma*, 2010, **247** (3-4), 195-214, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/45367211_Family_life_at_close_quarters_Communication_and_constraint_in_angiosperm_seed_development
- INTEREMPRESAS MEDIA, S. L. *Frutas: exóticas: papaya: poscosecha* [en línea] [consulta: septiembre 2021]. Disponible: <https://www.frutas-hortalizas.com/Frutas/Poscosecha-Papaya.html>
- JEYAKUMAR, P., et al. Physiological performance of papaya cultivars under abiotic stress conditions [en línea]. *Acta Horticulturae*, 2007, **740**, 209-215, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Kavino-Mathiyazhagan/publication/283888633_Physiological_performance_of_papaya_cultivars_under_abiotic_stress_conditions/links/56811cdf08ae1e63f1edaefb/Physiological-performance-of-papaya-cultivars-under-abiotic-stress-conditions.pdf
- JIMÉNEZ, V. M., MORA-NEWCOMER, E. y GUTIÉRREZ-SOTO, V. Biology of the papaya planta. En: MING, R. y MOORE, P. H. *Genetics and genomics of papaya* [en línea]. Nueva York: Springer, 2014, [consulta: julio 2021]. Disponible en: <https://link-springer-com.accedys2.bbtk.ull.es/content/pdf/10.1007%2F978-1-4614-8087-7.pdf>
- KUMARI, S. y MISHRA, M. Papaya (*Carica papaya* L.) [en línea]. En: PARTHASARATHY, V. A., et al. *Breeding of Horticultural Crops Vol 2: Tropical Fruits*. Nueva Delhi: Today & Tomorrows Printers and Publishers, 2019, [consulta: julio 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339677073_Papaya_Carica_papaya_L
- LEIDI, E. O. y PARDO, J. M. Tolerancia de los cultivos al estrés salino: qué hay de nuevo [en línea]. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNR)*, 2002, **2**, 70-82, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://rehip.unr.edu.ar/handle/2133/648>
- MAHOUACHI, J., ARBONA, V. y GÓMEZ-CADENAS, A. *Hormonal changes in papaya seedlings subjected to progressive water stress and re-watering*. *Plant Growth Regulation*, 2007, **53**, 43-51.
- MAHOUACHI, J., ARGAMASILLA, R. y GÓMEZ-CADENAS, A. Influence of exogenous glycine betaine and abscisic acid on papaya in responses to water-deficit stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2012, **31**, 1-10.



- MAHOUACHI, J., SOCORRO, A. R. y TALON, M. Responses of papaya seedlings (*Carica papaya* L.) to water stress and re-hydration: growth, photosynthesis and mineral nutrient imbalance [en línea]. *Plant Soil*, 2006, **281**, 137-146, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://link-springer-com.accedys2.bbtck.ull.es/article/10.1007/s11104-005-3935-3>
- MEJÍA CLADERÓN, G. y VIDES, J. E. *Cultivo de la papaya (Carica papaya L.)* [en línea]. El Salvador: Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova”, 2018, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: http://centa.gob.sv/docs/guias/frutales/Guia%20Centa_Papaya%202019.pdf
- MÉNDEZ HERNÁNDEZ, C. *Ensayo comparativo de variedades de papaya (1998 a 2001)*. Tenerife: Servicio de Agricultura. Cabildo Insular de Tenerife, 2001.
- MEZA, N., PEREIRA, A. y BAUTISTA, D. Efecto de la salinidad en la germinación y emergencia de semillas de níspero (*Manilkara achras* Miller Fosberg) [en línea]. *Revista de la Facultad de Agronomía (Rev. Fac. Agron. LUZ)*, 2004, **21** (4) supl. 1, 60-66, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/26520/27146>
- MILLS, H. A. y BENTON JONES, J. *Plant analysis handbook II: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. Georgia: MicroMacro, 1996.
- MOORE, P. H. Phenotypic and Genetic Diversity of Papaya. En: MING, R. y MOORE, P. H. *Genetics and genomics of papaya* [en línea]. Nueva York: Springer, 2014, [consulta: julio 2021]. Disponible en: <https://link-springer-com.accedys2.bbtck.ull.es/content/pdf/10.1007%2F978-1-4614-8087-7.pdf>
- MORTON, J. Papaya. En: MORTON, J. F. *Fruits of warm climates* [en línea]. Miami: Southern Book Service, 1987, [consulta: julio 2021]. Disponible en: <https://hort.purdue.edu/newcrop/morton/index.html>
- MUJERIEGO, R. *Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada* [en línea]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 1990, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230887765_Manual_Practico_De_Riego_Con_Agua_Residual_Municipal_Regenerada
- NAKASONE, H. Y. Producción de la papaya. Agrotecnología y problemas en la comercialización en los subtrópicos y los trópicos. En: XIII Congreso Norcofel. *Cultivo y Producción de Frutos Tropicales*. Islas Canarias, 1983.



- NUNES DE LIMA, R. S., et al. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya [en línea]. *Scientia Horticulturae*, 2015, **183**, 13-22, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423814006785?casa_token=Bm6iKmpvzaUAAAAA:quulB2OzoEw_MS56RP1r7kEUryQ8kWAGjrfJ3Aq3HT9P8aj7DiA1w56h0i6w1XcpQoVwQfAR
- PATERSON, A. H., et al. The Fruits of Tropical Plant Genomics [en línea]. *Tropical Plant Biology*, 2008, **1** (1), 3-19, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/226441457_The_Fruits_of_Tropical_Plant_Genomics
- PARÉS, J., et al. Efecto de los niveles de salinidad sobre la densidad estomática, índice estomático y grosor foliar en plantas de *Carica papaya* L. [en línea]. *Acta Botánica Venezuelica*, 2008, **31** (1), 27-34, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0084-59062008000100003
- PÉREZ HERNÁNDEZ, E. *Ensayo de variedades de papaya, 2013–2015*. [en línea]. Tenerife: Cabildo Insular de Tenerife, 2016, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/subt_599_Var%20papaya%20web.pdf
- PERSLEY, D. M. y PLOETZ, R. C. Diseases of Papaya [en línea]. En: PLOETZ, R. C. *Diseases of tropical fruit crops*. Florida: CABI Publishing, 2003, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://ebookcentral-proquest-com.accedys2.bbtk.ull.es/lib/bull-ebooks/reader.action?docID=292066&ppg=395>
- PÍO PÉREZ, A. *Influencia del estrés hídrico sobre el crecimiento vegetativo de la papaya (*Carica papaya* L.)*. Trabajo de fin de grado. La Laguna: Universidad de La Laguna. 2004.
- RHOADES, J. D., KANDIAH, A., MASHALI, A. M. *The use of saline Waters for crop production* [en línea]. Roma: FAO, 1992, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://halophyteskh.biosaline.org/sites/default/files/content/BestPractices_WMManagement/FAO48.pdf
- RODRÍGUEZ PASTOR, M. C. *Situación actual y condiciones de cultivo de la papaya en Canarias* [en línea]. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), s. f., [consulta: agosto 2021]. Disponible en:



<https://docplayer.es/13589135-Situacion-actual-y-condiciones-de-cultivo-de-la-papaya-en-canarias.html>

- RODRÍGUEZ PASTOR, M. C., GALÁN SAÚCO, V. y ESPINO, A. I. *Técnicas de cultivo de la papaya (Carica papaya L.) en Canarias*. 2ª edición. La Laguna: Consejería de Agricultura y Alimentación y Secretaría General Técnica del Gobierno de Canarias, 1995.
- RODRÍGUEZ PASTOR, M. C., LOBO RODRIGO, M. G., SUÁREZ SÁNCHEZ, C. L. Comportamiento de los cultivares de papaya Sunset, Sunrise y de los genotipos Baixinho de Santa Amalia y BH - 65 en la zona sur de la isla de Tenerife [en línea]. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 2010, **32** (4), 1105-1115, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/ZC4HX3n7bhS56zJt4LwnTSQ/?lang=es#>
- SADRAS, V. O., et al. Efectos del estrés hídrico en la producción de los cultivos. En: VILLALOBOS MARTÍN, F. J. y FERERES CASTIEL, E. *Fitotecnia. Principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2017b.
- SADRAS, V. O., VILLALOBOS, F. J. y FERERES, E. Las limitaciones a la productividad de los cultivos. En: VILLALOBOS MARTÍN, F. J. y FERERES CASTIEL, E. *Fitotecnia. Principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2017a.
- SALAMANCA, C. R. y ROMÁN HOYOS, C. A. Nutrición y fertilización. En: ARANGO WIESNER, L. V. *El cultivo de la papaya en los Llanos Orientales de Colombia. Manual de asistencia técnica n.º 4*. [en línea]. Villavicencio: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), 1999, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12830?locale-attribute=es>
- SALINAS, I., et al. Comparación de los sistemas productivos de la papaya en España y Brasil [en línea]. *I+D+i (INNOVAGRI)*, 2017, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://www.innovagri.es/investigacion-desarrollo-inovacion/comparacion-de-los-sistemas-productivos-de-la-papaya-en-espana-y-brasil.html>
- SCHELDEMAN, X., et al. Vasconcellea [en línea]. En: KOLE, C. *Wild crop relatives: genomic and breeding resources*. Nueva York: Springer, 2011, [consulta: julio 2021]. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=WY4zSqE8sdgC&oi=fnd&pg=PR3&dq=%EF%82%A7+SCHELDEMAN+V,+et+al.+Vasconcellea+.+En:+KOLE,+C.+Wild+crop+relatives:+genomic+and+breeding+resources&ots=M1dcBUNMrn&sig=ROJd85Yk10c3TEx_-QeGige_rnw#v=onepage&q=chapter%2011&f=false



- SICCHA M., A. y LOCK DE UGAZ, O. Liofilización [en línea]. *Revista de Química*, 1995, **9** (2), 173-183, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5565/5561>
- SOUSA, M. S. S., et al. Organic fertilization to attenuate water salinity effect on papaya growth [en línea]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2019, **23** (2), 79–83, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331157929_Organic_fertilization_to_attenuate_water_salinity_effect_on_papaya_growth/citations
- SUBSECRETARÍA DE AGRICULTURA, PESCA y ALIMENTACIÓN Y SUBDIRECCIÓN GENERAL DE ANÁLISIS, COORDINACIÓN Y ESTADÍSTICA. *Encuesta sobre Superficies y Rendimiento de cultivos (ESYRCE), año 2020* [en línea]. España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), 2021, [consulta: agosto 2021] Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin2020_tcm30-564330.pdf
- TADEO, F. R. y GÓMEZ-CARDENAS, F. Fisiología de las plantas y el estrés. En: AZCÓN-BIETO, J. y TALÓN, M. *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2ª ed. [en línea]. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España, S.L, 2013, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetal2008Azcon..pdf>
- TEIXEIRA DA SILVA, J. A., et al. Papaya (*Carica papaya* L.) Biology and Biotechnology [en línea]. *Global Science Books*, 2007, **1** (1), 47-73, [consulta: julio 2021]. Disponible en: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/10209>
- THE HINDU BUSINESS LINE: AGRI BUSINESS. *Papaya: Introducing high-yield varieties key to healthy profits* [en línea] [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://www.thehindubusinessline.com/economy/agri-business/papaya-introducing-high-yield-varieties-key-to-healthy-profits/article20371730.ece1>
- TORIBIO FERNÁNDEZ, C. Cultivo de la papaya. En ABAD CATALINA, M., et al. *Diez temas sobre plantas subtropicales*. Madrid: Ministerio de Agricultura, 1969.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). *FoodData Central: Papayas, raw* [en línea] [consulta: agosto 2021]. Disponible en: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169926/nutrients>
- VAVILOV, N. I. *Origin and geography of cultivated plants* [en línea]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992, [consulta: julio 2021].



Disponible en:
https://books.google.es/books?id=BqNOAAAIAAJ&printsec=frontcover&dq=Origin+and+Geography+of+Cultivated+Plants&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Origin%20and%20Geography%20of%20Cultivated%20Plants&f=false

- VILLALOBOS, F. J., et al. El control de la salinidad. En: VILLALOBOS MARTÍN, F. J. y FERERES CASTIEL, E. *Fitotecnia. Principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2017c.
- VILLALOBOS, F. J., et al. La temperatura y la humedad del aire. En: VILLALOBOS MARTÍN, F. J. y FERERES CASTIEL, E. *Fitotecnia. Principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2017a.
- VILLALOBOS, F. J., TESTI, L. y MATEOS, L. La manipulación del ambiente de los cultivos. En: VILLALOBOS MARTÍN, F. J. y FERERES CASTIEL, E. *Fitotecnia. Principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2017b.
- VILLEGAS, V. N. Carica papaya L. [en línea] En: VERHEIJ, E. W. M. y CORONEL, R. E. *Plant Resources of South-East Asia n.º 2: Edible fruits and nuts*. Bogor: PROSEA Foundation, 1991, [consulta: julio 2021]. Disponible en: <https://www.prota4u.org/prosea/view.aspx?id=1484>
- WAHOME, P. K., JESCH, H. H. y GRITTNER, I. Mechanisms of salt stress tolerance in two rose rootstocks: *Rosa chinensis* 'Major' and *R. rubiginosa* [en línea]. *Scientia Horticulturae*, 2001, **87** (3), 207-216, [consulta: agosto 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/248477541_Mechanisms_of_salt_stress_tolerance_in_two_rose_rootstocks_Rosa_chinensis_'Major'_and_R_rubiginosa
- YEE, W., et al. *Papayas in Hawaii*. Honolulu: Cooperative Extension Service, 1970.



11. Anexos

Cuadro 6: Significancias del ANOVA y del test *H* de Kruskal – Wallis para los datos promedio de número de hojas funcionales de las plantas de T1 y T2 durante el ensayo.

Parámetro	DDT	ANOVA	H de Kruskal–Wallis
Número de hojas	- 8	0,615	0,406
	0	1,000	0,537
	8	0,261	0,031
	15	0,111	0,042
	22	0,000	0,000
	29	0,000	0,000
	41	0,000	0,000

Cuadro 7: Significancias del ANOVA y del test *H* de Kruskal – Wallis para los datos promedio de altura de las plantas de T1 y T2 durante el ensayo.

Parámetro	DDT	ANOVA	H de Kruskal–Wallis
Altura de las plantas	- 8	0,392	0,339
	0	0,125	0,158
	8	0,027	0,013
	15	0,000	0,000
	22	0,000	0,000
	29	0,000	0,000
	41	0,000	0,000

Cuadro 8: Significancias del ANOVA y del test *H* de Kruskal – Wallis para los datos promedio de diámetro de los tallos de T1 y T2 durante el ensayo.

Parámetro	DDT	ANOVA	H de Kruskal–Wallis
Diámetro de los tallos	- 8	0,595	0,719
	0	0,969	0,885
	8	0,237	0,050
	15	0,004	0,000
	22	0,000	0,000
	29	0,000	0,000
	41	0,000	0,000



Cuadro 9: Significancias del ANOVA y del test *H* de Kruskal – Wallis para los datos promedio de conductancia estomática de T1 y T2 durante el ensayo.

Parámetro	DDT	ANOVA	H de Kruskal–Wallis
Conductancia estomática	- 8	0,549	0,872
	0	0,235	0,302
	8	0,011	0,026
	15	0,000	0,000
	22	0,002	0,002
	29	0,000	0,001
	41	0,000	0,001

Cuadro 10: Significancias del ANOVA y del test *H* de Kruskal – Wallis para los datos promedio de contenidos minerales foliares de T1 y T2 al término del ensayo.

Parámetro	Mineral	ANOVA	H de Kruskal–Wallis
Contenido en hojas	Ca	0,013	0,050
	Mg	0,055	0,050
	K	0,001	0,050
	Na	0,025	0,050

Cuadro 11: Significancias del ANOVA y del test *H* de Kruskal – Wallis para los datos promedio de contenidos minerales en tallos de T1 y T2 al término del ensayo.

Parámetro	Mineral	ANOVA	H de Kruskal–Wallis
Contenido en tallos	Ca	0,002	0,050
	Mg	0,004	0,050
	K	0,000	0,050
	Na	0,000	0,050

Cuadro 12: Significancias del ANOVA y del test *H* de Kruskal – Wallis para los datos promedio de contenidos minerales en tallos de T1 y T2 al término del ensayo.

Parámetro	Mineral	ANOVA	H de Kruskal–Wallis
Contenido en raíces	Ca	0,234	0,127
	Mg	0,090	0,050
	K	0,170	0,127
	Na	0,360	0,275