

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“DEFICIENCIAS DE MACRONUTRIMENTOS EN PAPAYA (*Carica
Papaya* L.) BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

PRESENTA

Berta Sofía Jáuregui Paz

Escobedo, N. L.

Enero de 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



“DEFICIENCIAS DE MACRONUTRIMENTOS EN PAPAYA (*Carica papaya* L.) BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

PRESENTA

Berta Sofía Jáuregui Paz

Escobedo, N. L.

Enero de 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“DEFICIENCIAS DE MACRONUTRIMENTOS EN PAPAYA (*Carica
Papaya L.*) BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

PRESENTA

Berta Sofía Jáuregui Paz

Escobedo, N. L.

Enero de 2023

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL COMITÉ PARTICULAR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

COMITÉ PARTICULAR

Ph. D. Emilio Olivares-Sáenz
Director de Tesis

M. C. Carlos Alberto Garza-Alonso
Co-Director

Ph. D. Rigoberto E. Vázquez-Alvarado
Asesor

Dr. Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena
Asesor

Dra. Guadalupe Gutiérrez Soto
Subdirector de Posgrado e Investigación

AGRADECIMIENTO

A mi madre, Berta Patricia Paz Vega, quien me ha inspirado, acompañado y apoyado durante toda mi vida con mis sueños y mis pasiones. Le agradezco además por siempre creer en mí y enseñarme a trabajar duro para lograr mis metas.

A mi hermano Esteban por ser un compañero de vida, que siempre encuentra la manera de motivarme e inspirarme, incluso con la distancia que existe entre nosotros.

A Diego Reynoso Lobo, por todo tu amor y paciencia en esta etapa de mi vida, gracias por ser un compañero en las buenas y en las no tan buenas y darle luz a mis días más nublados.

Al Dr. Emilio Olivares Sáenz, por su acompañamiento durante estos dos años, siendo un gran mentor.

A todos mis maestros, que con paciencia me orientaron por el camino de la agricultura y que con su pasión me transmitieron aún más amor por esta área.

Al Centro de Agricultura Protegida de la FAUANL por permitirme utilizar sus instalaciones.

Al pueblo de México, que con sus impuestos hace posible que el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) financie la formación de profesionistas, agradecido por la beca proporcionada para mis estudios de posgrado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	lx
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	16
1.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA.....	16
1.3. OBJETIVO GENERAL	17
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	18
2.1. Generalidades del Papayo.....	18
2.1.1. Origen y distribución.....	18
2.1.2. Producción mundial de papaya.....	19
2.1.3. Producción nacional de papaya.....	19
2.1.4. Principales usos y propiedades.....	20
2.2. Características Botánicas y Agronómicas del Papayo.....	21
2.2.1. Taxonomía.....	21
2.2.2. Anatomía y morfología.....	21
2.2.3. Requerimientos edafoclimáticos.....	29
2.3. Nutrición Vegetal.....	32
2.3.1. Elementos esenciales para las plantas.....	32
2.3.2. Nitrógeno.....	33
2.3.3. Fósforo.....	34
2.3.4. Potasio.....	35
2.3.5. Calcio.....	36
2.3.6. Magnesio	37
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1. Ubicación del Experimento.....	38
3.2. Tratamientos y Diseño Experimental.....	38
3.3. Material Vegetal y Producción de Plántulas.....	39

3.4.	Inducción de Deficiencias Nutrimientales.....	41
3.5.	Preparación de Soluciones Nutritivas.....	42
3.6.	Síntomas Visuales de Deficiencias de Macronutrientes.....	44
3.7.	Monitoreo de Crecimiento de las Plantas.....	45
3.8.	Deficiencias Nutrimientales Estimadas con Sensor NDVI y Extracto de Savia de Pecíolo.....	46
3.9.	Extracción de Clorofila.....	47
3.10.	Determinación Foliar de Minerales.....	48
3.11.	Análisis Estadísticos.....	48
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1.	Identificación y Caracterización de Síntomas Visuales de Deficiencia.....	49
4.1.1.	Deficiencia de Nitrógeno.....	49
4.1.2.	Deficiencia de Fósforo.....	51
4.1.3.	Deficiencia de Potasio.....	53
4.1.4.	Deficiencia de Calcio	55
4.1.5.	Deficiencia de Magnesio	57
4.2.	Crecimiento Vegetativo	59
4.2.1.	Nitrógeno.....	60
4.2.2.	Fósforo.....	61
4.2.3.	Potasio.....	62
4.2.4.	Calcio.....	63
4.2.5.	Magnesio	64
4.3.	Sensor NDVI.....	65
4.4.	Extracto de	68

	Pecíolo.....	
4.5.	Cuantificación de Clorofila.....	70
4.6.	Concentración Foliar de Minerales	73
5.	CONCLUSIONES.....	76
6.	REFERENCIAS.....	78

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Elementos esenciales para las plantas.....	32
Cuadro 2.	Solución nutritiva seleccionada para el desarrollo de la investigación.....	43
Cuadro 3	Fuentes de fertilizantes utilizadas para la preparación de las soluciones nutritivas y sus concentraciones (g 100 L ⁻¹).....	44
Cuadro 4.	Crecimiento vegetativo de plantas de papaya (<i>Carica papaya L.</i>) con deficiencia de macronutrientos.....	60
Cuadro 5.	Peso seco de plantas de papaya (<i>Carica papaya L.</i>) con deficiencia de macronutrientos.....	64
Cuadro 6.	Valores de NDVI en la hoja más recientemente madura de papaya en dos fechas.....	67
Cuadro 7.	Valores de NDVI en planta de papaya vista desde arriba en dos fechas.....	68
Cuadro 8	Comparación de medias de tratamientos para la concentración de iones de nitrato y potasio en el pecíolo de la planta de papaya.....	69
Cuadro 9	Concentración de clorofila en hoja recientemente madura de papaya en presencia de deficiencias nutrimentales.....	71
Cuadro 10.	Promedio de porcentaje de macronutrientos en hojas nuevas de papaya en presencia de deficiencias nutrimentale.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Planta adulta de papaya.....	22
Figura 2.	Hoja madura de papaya, con 7 lóbulos.....	23
Figura 3	Tallo de la planta de papaya a. Marcas de pecíolos caídos b. Parte interior del tallo)	23
Figura 4.	Raíz de planta de papaya.....	24
Figura 5.	Papaya madura variedad Maradol roja.....	25
Figura 6.	Papaya en formación derramando una gota de látex.....	26
Figura 7.	Flor hermafrodita de papaya.....	28
Figura 8	Croquis del experimento con los tratamientos asignados completamente al azar.....	41
Figura 9	Establecimiento del experimento en marzo del 2021, en el centro de color azul los contenedores para las soluciones nutritivas (100 L) y de blanco las 24 unidades experimentales (19 L).....	41
Figura 10.	Establecimiento de plantas de papaya en el invernadero.....	42
Figura 11	Descripción de las partes de la hoja madura de papaya para facilitar la descripción y caracterización de síntomas visuales.....	45
Figura 12	a. Pecíolo de hoja de papaya. b. Conformación de pecíolos y tallo.....	46
Figura 13	Hoja del tratamiento Testigo, sin deficiencia y descrito con las cartas Munsell (7.5 GY $\frac{3}{4}$).....	50
Figura 14	Síntomas de deficiencia observada en a. hoja de papaya madura b) hoja de papaya nueva.....	51
Figura 15	Deficiencia de Fósforo a. Clorosis en lóbulos superiores. b. Puntas necróticas. c. Aborto de flores y frutos.....	52

Figura 16	Síntomas de deficiencia de Potasio a. Puntas y bordes cloróticos e inicio de puntas necróticas. b. Hoja joven del tratamiento -K c. Hoja marchita como efecto de la deficiencia	54
Figura 17	Fruta deforme del tratamiento -K.....	55
Figura 18	Deficiencia de Calcio en hojas intermedias en papaya.....	56
Figura 19	Quiebre de pecíolo por la deficiencia de Ca.....	57
Figura 20	Deficiencia de magnesio a. Inicio de clorosis. b. Clorosis avanzada con manchas necróticas. c. Detalle de manchas necróticas.....	59
Figura 21	Referencia del tamaño de las hojas maduras en la semana 16. a) Tratamiento 1 (Testigo), b) Tratamiento 2-sin Nitrógeno, c) Tratamiento 3-sin Fósforo, d) Tratamiento 4-sin Potasio, e) Tratamiento 5-sin Calcio y f) Tratamiento 6-Sin Magnesio.....	61
Figura 22	Relación entre el porcentaje de Nitrógeno y el porcentaje de Fósforo para cada tratamiento.....	76

RESUMEN

La papaya (*Carica papaya L.*) es una fruta mundialmente conocida por su sabor y sus propiedades digestivas, siendo considerada como un producto de alto valor económico. Este cultivo es de origen tropical, por lo que demanda temperaturas entre los 22 ° y los 30 °C y se adapta a condiciones de trópico y subtropical, pero también a condiciones subhúmedas y semihúmedas, por lo que existe la posibilidad de cultivarla en el estado de Nuevo León, México bajo condiciones de invernadero. La planta de papaya generalmente muestra un desarrollo rápido y constante desde el momento de su germinación, lo que hace que el cultivo requiera de un suministro alto de agua y una correcta nutrición vegetal para su desarrollo, principalmente Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio y Magnesio, por lo que el objetivo del trabajo es describir los síntomas de deficiencia de estos elementos. Para estudiar las deficiencias específicas de macronutrientes en el cultivo de papaya variedad Maradol roja, se utilizó la técnica del elemento faltante en hidroponía, la cual permite analizar el efecto de la ausencia de algún elemento en específico. Las deficiencias fueron descritas por medio de los síntomas visuales característicos de cada elemento, las cartas Munsell y por el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El crecimiento de las plantas se vio afectado por los tratamientos en el siguiente orden -N>-Mg>-P>-K>-Ca.

Palabras clave: *nutrición vegetal, deficiencias, hidroponía, cartas Munsell, NDVI*

ABSTRACT

Papaya (*Carica papaya* L.) is a fruit known worldwide for its flavor and digestive properties, therefore, it is a product of high economic value. This crop is originally from tropical areas, therefore it demands temperatures between 22° and 30°C and adapts to tropical and sub-tropic conditions, but also to sub-humid and semi-humid conditions, so there is the possibility of growing it in the state of Nuevo León, Mexico under greenhouse conditions. The papaya plant shows a rapid and constant development from the moment of its germination, which means that the crop requires a high supply of water and a correct plant nutrition for its development, such as, Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Calcium and Magnesium, therefore, the objective of the work is to describe the symptoms of deficiency of these elements. The missing element technique was used in a hydroponic system to study the macronutrients deficiencies of papaya variety red Maradol. Deficiencies were described by means of the characteristic visual symptoms of each element, the Munsell charts and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Plant growth was affected by treatments in the following order -N>-Mg>-P>-K>-Ca.

Keywords: *plant nutrition, deficiencies, hydroponic, Munsell charts, NDVI*

1. INTRODUCCIÓN

La papaya (*Carica papaya L.*) es una fruta mundialmente conocida por su sabor, aporte nutricional y sus propiedades digestivas, siendo considerado un cultivo de interés económico, donde este se ubica en una posición privilegiada a nivel internacional, ya que se encuentra en el tercer lugar dentro de la categoría de frutas tropicales más consumidas en el mundo, además de que se considera una de las más importantes desde el punto de vista socioeconómico (Granados *et al.*, 2015).

En el 2019 se reportó una producción mayor de 13.7 millones de toneladas en 460,000 ha alrededor del mundo (Salinas *et al.*, 2021), donde México ocupa el tercer lugar dentro de la lista de principales productores. La producción de papaya en el país va destinada al consumo nacional y de exportación; en México el consumo per cápita es de por lo menos 7.3 kilogramos anualmente (SADER, 2021), con un consumo nacional de 783.22 millones de toneladas. La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural reportó en el 2020 que la producción de papaya en México tuvo un aumento del 3.2% con un millón 118 mil toneladas.

La producción en México de este cultivo va en aumento para poder seguir satisfaciendo las necesidades de los consumidores, tanto nacional como internacionalmente.

La variedad Maradol roja es la más preciada por los productores de México, esta tiene su origen en Cuba, y resalta por su pulpa de tono rojo vibrante, además de contener una alta concentración de vitaminas y fibra.

Los principales estados productores de papaya son Oaxaca, Chiapas, Colima y Veracruz, caracterizados por tener regiones húmedas y subhúmedas, la temperatura media ideal del cultivo de la papaya va de los 22° a los 30° C, y se adapta a condiciones de trópico y subtrópico, pero también a condiciones subhúmedas y semihúmedas (Cruz, 2010), al igual requiere de una altura óptima entre los 0 y 600 msnm, dando la posibilidad de producir Maradol roja en el estado de Nuevo León en condiciones de invernadero, donde aproximadamente el 20% del clima es cálido subhúmedo, mientras que el 7% es templado subhúmedo (INEGI, 2019). Es importante mencionar que la planta no resiste heladas, por lo que su cultivo en invernadero es necesario. Los principales cultivos producidos en invernadero en Nuevo León son tomate y pimiento, por lo que es importante diversificar la producción agrícola en el Estado.

El cultivo de la papaya generalmente muestra un desarrollo rápido y constante desde el momento de su germinación, el cual viene acompañado de una floración precoz, esta es continua y paralela al desarrollo de los frutos. La planta de papaya requiere de un suministro alto de agua y de nutrientes para su correcto desarrollo, principalmente de Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio y Magnesio. La deficiencia de al menos uno de estos nutrimentos tiene efectos no deseables en la producción y rendimiento de la planta, por lo cual deben de detectarse oportunamente (Jiménez *et al.*, 2014).

La detección de deficiencias nutrimentales en los cultivos se hace mediante un análisis foliar, sirviendo como una herramienta de diagnóstico que se basa en el análisis cuantitativo de macro y micronutrientes. Las deficiencias también se pueden identificar con los síntomas característicos de cada elemento. Otra técnica para detectar deficiencias es mediante el color de las hojas medido a través de sensores específicos para este propósito como el Índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI por sus siglas en inglés.

Para inducir deficiencias nutrimentales se puede utilizar la técnica del elemento faltante, la cual permite analizar el efecto de la ausencia de algún elemento en específico. El método consiste en preparar una solución nutritiva completa sin agregar el elemento que se requiere analizar (Garza-Alonso, 2020).

En la literatura se encuentran múltiples investigaciones de deficiencias para distintas variedades de papaya, donde se analizaron la hoja y el pecíolo, por ejemplo, la variedad Cariflora (Thomas *et al.*, 1995). En la presente investigación se tiene como objetivo identificar y caracterizar los síntomas causados por deficiencias nutrimentales en la variedad Maradol roja bajo condiciones de invernadero en el estado de Nuevo León y asociarlas con el color de las hojas medido a través de cartas Munsell y con el aparato NDVI (Salinas *et al.*, 2021).

1.1. HIPÓTESIS GENERAL

La planta de papaya variedad Maradol roja presentará síntomas específicos de deficiencia nutrimental ante la ausencia de cada macronutriente, afectando su desarrollo vegetativo, así como la distribución de materia seca y concentración de nutrientes en la planta.

1.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

Los síntomas de deficiencia nutrimental podrán ser diferenciados mediante observación visual, cartas Munsell y NDVI.

Las deficiencias de macronutrientes afectan el crecimiento de los diferentes órganos de la planta.

Las deficiencias de macronutrientes tienen efecto en la concentración de nitrato y potasio en el extracto de pecíolo.

Las deficiencias de macronutrientes tienen efecto en la concentración de clorofila a, b y total.

La concentración foliar de nitrógeno y fósforo se afecta debido a la inducción de deficiencias nutrimentales.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Analizar los efectos de las deficiencias de Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio y Magnesio en el cultivo de Papaya en la variedad Maradol roja.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las deficiencias de macronutrientes en el cultivo de papaya, Maradol roja mediante observación visual, cartas Munsell y NDVI.
- Definir los efectos de las deficiencias nutrimentales de N, P, K, Ca, Mg en el crecimiento y desarrollo de la papaya Maradol roja.
- Definir la interacción de elementos por medio de extracto de pecíolo.
- Determinar la concentración de clorofila a, b, a/b y total en plantas con deficiencias nutrimentales.
- Evaluar los efectos de las deficiencias en la concentración de N y P en la materia seca de hojas.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del papayo

La papaya (*Carica papaya* L.) es una planta tropical, conocida alrededor del mundo por su agradable sabor, su contenido de vitaminas y por sus diferentes propiedades alimenticias, resaltando su capacidad digestiva. La planta es herbácea, que debido a su pequeño genoma está ubicada entre hierba y árbol, es productora de látex y que usualmente está formada por un solo tallo.

El papayo destaca por tener precocidad reproductiva, altas tasas fotosintéticas en hojas, un crecimiento rápido desde el momento de su germinación y una producción alta de semilla. En las condiciones ambientales óptimas del cultivo, tiene una germinación entre la segunda y tercera semanas, el desarrollo vegetativo ocurre entre el tercer y octavo mes hasta la floración y la producción de fruta del noveno hasta el quinceavo mes. La planta puede durar hasta 20 años, sin embargo, de manera comercial su vida es normalmente de dos a tres años (Jiménez *et al.*, 2014).

2.1.1. Origen y distribución

La papaya forma parte de la familia Caricácea, originaria de América Central, sin embargo, existen variedades desde Argentina hasta el sur de México, las cuales se formaron a través de la hibridación natural entre *Carica peltata* y otra especie silvestre. La fruta es conocida con diferentes nombres en español, como frutabomba, papaya, papaita y lechosa. La distribución de la papaya a nivel mundial inició aproximadamente en el año 1500, cuando los españoles la llevaron a Panamá y después a Filipinas, Malasia e India (Fuentes & Santamaría, 2014).

2.1.2. Producción mundial de papaya

La papaya es producida en más de 60 países, siendo India el principal productor, seguido de Brasil, juntos producen más del 50% del total mundial. México está posicionado desde el 2019 como el tercer principal productor de esta fruta, teniendo una participación de 7.6 % con una tasa media anual de crecimiento de 5.2 % (SADER, 2021). En el 2019 se reportaron 13.7 millones de toneladas de papaya en 460,000 ha alrededor del mundo (Salinas *et al.*, 2021).

2.1.3. Producción nacional de papaya

La producción de México aumenta cada año, en el período de 2015-2019 la producción mexicana de papaya fue de 984 mil toneladas, con una tasa media anual de crecimiento de 5.2%. Dicha producción satisface las necesidades nacionales, considerando que en México el consumo per cápita es de por lo menos 7.3 kilogramos anualmente, con un consumo nacional de 783.22 millones de toneladas. La variedad Maradol roja es la más preciada por los productores de México, la cual se produce principalmente en Oaxaca, con una participación de 31.2%, seguido de Chiapas, Colima y Veracruz.

La producción en el país también tiene una participación importante para la exportación, donde destaca como el principal exportador en el mundo, con un volumen de 44.7% y una tasa media anual de crecimiento de 2.4%, seguido de Guatemala y Brasil. El principal país al que se exporta es a Estados Unidos, con ventas por más de 86 millones 657 mil dólares durante 2020 (SADER, 2021).

2.1.4. Principales usos y propiedades.

La papaya madura es principalmente consumida como fruta fresca, destaca no solo por su sabor, si no por sus propiedades digestivas, esto se debe a una enzima conocida como papaína, la cual degrada rápidamente las proteínas, pectinas y ciertos azúcares, además de grasas, lo que favorece la digestión. El consumo cotidiano de papaya puede disminuir condiciones como gastritis, colitis y estreñimiento crónico (Rivera-Pastrana *et al.*, 2010).

Esta fruta es utilizada en distintas industrias como la alimentaria, la farmacéutica y la textil. Las hojas y la raíz de la papaya se pueden utilizar como diuréticos y las hojas y las semillas como antihelmínticos (Saran *et al.*, 2016).

2.2 Características Botánicas y Agronómicas del Papayo

2.2.1 Taxonomía

Reino: *Plantae*

Subreino: *Embriophyta*

División: *Antophyta*

Subdivisión: *Angiosperma*

Clase: *Dicotiledónea*

Orden: *Parietales*

Familia: *Caricácea*

Género: *Carica*

Especie: *papaya* L.

2.2.2. Anatomía y morfología

La planta de papaya generalmente tiene un solo tallo recto, aunque en ocasiones puede desarrollar más de uno en caso de perder el punto apical, que alcanza de los 2 a los 10 metros de altura. El tallo es coronado con un grupo de hojas grandes palmatilobadas (Figura 1) que suelen ser de vida corta y que están acompañadas de peciolo largos (Jiménez *et al.*, 2014).



Figura 1. Planta adulta de papaya.

2.2.2.1 *Hojas*

Las hojas del papayo son alternas con pecíolos largos, casi horizontales que salen de la punta del tallo y se arreglan en espiral hacia abajo, estas son palmatilobadas y tienen entre 5 y 9 lóbulos (Figura 2), con la nervadura central gruesa y saltada. En promedio por planta se cuenta con 15 hojas maduras, las cuales están en constante renovación, las hojas viejas caen con todo y pecíolo, lo que deja una marca en el tallo. Las hojas nuevas aparecen en un rango aproximado de 2 a 3 semanas, esto depende del ambiente y del manejo de la planta (Jiménez *et al.*, 2014).



Figura 2. Hoja madura de papaya, con 7 lóbulos.

2.2.2.2 Tallo

El tallo, el cual también se puede identificar como el tronco, está compuesto de un tejido más carnoso que leñoso, algunas de las características principales son las cicatrices que van dejando los peciolos al desprenderse y que es hueco por dentro (Figura 3) (Jiménez *et al.*, 2014).

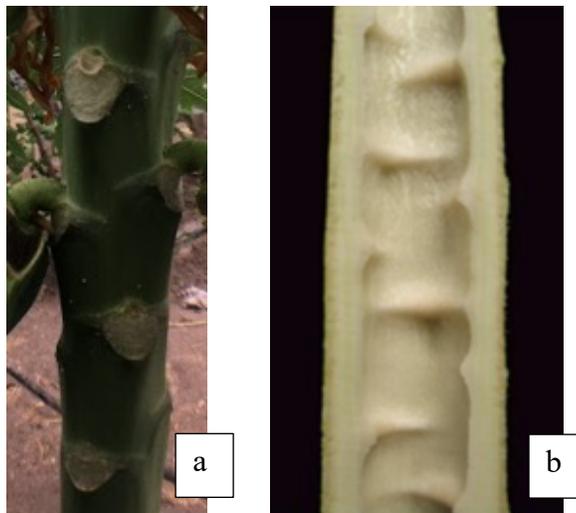


Figura 3. Tallo de la planta de papaya. a. Marcas de los peciolos caídos. b. Parte interior del tallo.

2.2.2.3 Raíz

La raíz de una planta de papaya madura se concentra en los primeros 20 cm de profundidad, siendo fibrosa y de color crema (Figura 4). La raíz se forma generalmente de una raíz principal que puede medir entre 0.5 y 1 m, y de esta suelen salir raíces secundarias.

Es importante mencionar que debido a que la raíz no alcanza profundidades considerables, es susceptible a vientos fuertes que suelen tumbar la planta, afectando considerablemente la producción y el rendimiento, esto suele suceder en suelos superficiales en donde la raíz no alcanza profundidad suficiente para anclar la planta adecuadamente (Jiménez *et al.*, 2014).



Figura 4. Raíz de planta de papaya.

2.2.2.4 Fruto

La fruta de este cultivo es conocida en México como papaya, aunque en otros lugares es conocida como frutabomba, papaita, lechosa, entre otros. La morfología del fruto depende de la variedad, hablando específicamente de la Maradol roja, esta se compone normalmente por cinco carpelos, unidos a una cavidad central que es donde se encuentra la gran cantidad de semillas. El peso del fruto de esta variedad va de 1.5 a 2.6 kg, destacando el color de la pulpa que es de color rojo salmón (Figura 5) y en términos de calidad debe de contar con 12 °Brix (Santamaría *et al.*, 2015).



Figura 5. Papaya madura variedad Maradol roja.

La fruta inmadura es de color verde y es rica en látex (Figura 6), a medida que madura el fruto cambia de color a naranja, lo cual depende de las condiciones ambientales en donde se encuentre la plantación.



Figura 6. Papaya en formación derramando una gota de látex.

2.2.2.5 Flores

La papaya es una especie denominada polígama, la cual se puede clasificar en tres tipos de sexo primarios: como masculino (estaminado), hermafrodita (bisexual) y femenino (pistilado). Algunas plantas de papaya pueden producir al mismo tiempo más de un tipo de flor, incluso pueden llegar a producir flores que no tienen estas formas básicas, pero exhiben diferentes grados de masculinidad y femineidad. La tendencia de las flores parece estar desencadenada por factores climáticos, como la sequía y las temperaturas variables.

La flor femenina típica es una flor bastante grande de forma cónica cuando está cerrada, cuando está abierta sus cinco pétalos se extienden desde la base, el

ovario es grande con forma circular y liso. Los frutos producidos por esta flor son de forma esférica u ovoide.

La flor intermedia hermafrodita cuenta con una organización no definida, los pétalos pueden estar fusionados hasta dos tercios de su longitud o libres desde la base. El número de anteras oscila entre 2-10, los carpelos van de 5-10, con diferentes grados de fusión. Este tipo de flor produce frutos de forma irregular conocidos como carpelódicos (cara de gato), con poco valor comercial. Estas flores se ven influenciadas generalmente por la temperatura, cuando durante el día el ambiente es de 24.5 °C durante el día y de 15.5 °C durante la noche.

La flor alargada hermafrodita tiene los pétalos fusionados de un cuarto a tres cuartos de su longitud total, se observan diez anteras donde, cinco son largas y cinco son cortas. El ovario es largo y cuando contiene cinco o más carpelos, la forma del fruto varía de cilíndrico a pera. De los diferentes tipos de flores hermafroditas, esta destaca por ser la de mayor importancia comercial por la calidad de su fruta.



Figura 7. Flor hermafrodita de papaya.

La flor estéril hermafrodita es una flor que se asemeja a la anterior, pero no desarrolla ovario, por lo tanto, es estéril, solo produce polen, por lo que se puede considerar como masculina, esta flor puede formarse con temperaturas cálidas o por estrés hídrico.

La flor masculina típica tiene una corola larga y delgada que contiene anteras en dos series de cinco. Tienen un pistilo rudimentario sin estigma y no son funcionales (Wadekar *et al.*, 2021).

2.2.3 Requerimientos edafoclimáticos

2.2.3.1. *Altitud*

El cultivo del papayo se adapta a diversas latitudes y condiciones de clima y suelo, siendo la temperatura la principal limitante de la producción. Las mayores plantaciones comerciales se ubican entre las latitudes 23°N y 23°S; sin embargo, se pueden encontrar producciones que se han extendido hasta las latitudes 32°N y 32°S, siempre y cuando se encuentren cerca del nivel del mar, ya que la altitud óptima de este frutal es de 0 a 600 m.s.n.m. para mantener frutos de buena calidad con alto contenido de azúcares.

2.2.3.2. *Suelo*

Esta especie crece en una amplia variedad de tipos de suelo; su principal requerimiento es buen drenaje para evitar causar daños a la raíz. Los mejores suelos para producir papaya son los de textura media, con un contenido de arcilla entre 10 y 30%, profundidad mayor a 80 cm y pH entre 5.6 y 7.0. De acuerdo con Benacchio (1982; Vázquez *et al.*, 2010), el papayo es ligeramente tolerante a la salinidad.

2.2.3.3. *Requerimiento hídrico*

En términos generales, el papayo requiere de 800 a 2,000 mm de lluvia anuales y no tolera periodos largos de sequía, por lo cual es necesario aplicar riegos para tener un continuo amarre de frutos y buenos rendimientos. Otro aspecto

importante del clima es la humedad relativa, que en este cultivo no debe ser menor a 66% para mantener una óptima conductancia estomática y un buen crecimiento del cultivo (Nakasone & Paul, 1998).

2.2.3.4. Radiación

El papayo se considera una planta de día neutro y sin influencia del fotoperíodo, esto se ve reflejado en la inducción floral, la cual está controlada genéticamente. En cuanto a luz, la planta de papaya se desarrolla mejor en áreas soleadas, con cantidades de radiación fotosintéticamente activa entre $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a $1650 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. La exposición prologada a la sombra reduce el crecimiento de la planta, generando menor área foliar, lo que impacta en la densidad estomática e incrementa la longitud de entrenudos y pecíolos (Vázquez *et al.*, 2010).

2.2.3.5. Vientos

Los árboles de papaya son delicados y se ven afectados por vientos mayores de 64 km.h^{-1} , por lo que se tiene que considerar algún tipo de protección, estos vientos provocan mayor evaporación del agua del suelo y una mayor transpiración que les causa estrés hídrico. Vientos mayores a 120 km.h^{-1} pueden dañar flores y frutos, incluso quebrar plantas enteras, afectado considerablemente la producción. (De los Santos *et al.*, 1997; Nakasone & Paul, 1998; Vázquez *et al.*, 2010).

2.2.3.6. *Temperaturas*

La temperatura es un factor limitante para la planta de papaya, para un correcto desarrollo la temperatura debe oscilar entre los 21-33 °C, siendo 25 °C la óptima. Las temperaturas inferiores a 20 °C o superiores a 35 °C afectan directamente a la floración, provocando diversas malformaciones, reduciendo el rendimiento y la calidad del fruto. En cuanto a las temperaturas inferiores a 15 °C comienzan a comprometer la producción de papaya, haciéndola no apta para el cultivo en campo abierto, además de que la planta no tolera heladas, mientras que temperaturas superiores a 30 °C limitan la fotosíntesis y dificultan la fecundación de las flores, reduciendo así los rendimientos (Campostrini & Glenn, 2007; Salinas *et al.*, 2021).

2.3.Nutrición Vegetal

2.3.1. Elementos esenciales para las plantas

Los elementos esenciales para las plantas son 17 (Cuadro 1), los cuales han sido identificados debido a que cumplen las siguientes características:

1. Una deficiencia de alguno de estos elementos hace imposible que la planta complete su ciclo de vida.
2. La deficiencia de un elemento es específica y puede prevenirse o corregirse únicamente con el mismo elemento, es decir, no puede ser sustituido por otro.
3. El elemento está directamente involucrado en el metabolismo de la planta.

Cuadro 1. Elementos esenciales para las plantas.

Elemento	Formas asimiladas por las plantas	Elemento	Formas asimiladas por las plantas
Hidrogeno (H)	H ₂ O	Cloro (Cl)	Cl ⁻
Oxígeno (O)	H ₂ O / O ₂	Cobre (Cu)	Cu ²⁺
Carbono (C)	CO ₂	Manganeso (Mn)	Mn ²⁺
Nitrógeno (N)	NO ₃ ⁻ / NH ₄ ⁺	Molibdeno (Mo)	MoO ₄ ⁼
Fósforo (P)	H ₂ PO ₄ ⁻ / HPO ₄ ⁼	Zinc (Zn)	Zn ²⁺
Potasio (K)	K ⁺	Fierro (Fe)	Fe ²⁺
Calcio (Ca)	Ca ²⁺	Níquel (Ni)	Ni ²⁺
Magnesio (Mg)	Mg ²⁺	Boro (B)	H ₃ BO ₃ / H ₂ BO ₃ ⁻ /HBO ₃ ⁼ / BO ₃ ³⁻
Azufre (S)	SO ₄ ⁼		

2.3.2. Nitrógeno

El Nitrógeno (N) es un elemento que se requiere en grandes cantidades por las especies vegetales, considerado como suficiente cuando la concentración está dentro del rango de 1 - 5 % del peso seco. El N es un componente esencial de los ácidos nucleicos, proteínas, aminoácidos, fosfolípidos y muchos otros metabolitos secundarios, además de formar parte de la molécula de la clorofila, siendo el pigmento que imparte el color verde a las hojas. El N es un elemento muy móvil y la planta lo absorbe como nitrato (NO_3^-) o como amonio (NH_4^+), esto depende de la especie y de las condiciones del suelo (pH y estado redox) (Karthika *et al.*, 2018; Garza-Alonso, 2020).

La deficiencia de N se caracteriza por inhibir el crecimiento en general de la planta, afectando todos sus órganos. Los principales síntomas de deficiencia comienzan con amarillamiento o clorosis en las hojas maduras, al trasladarse ocurre el colapso de los cloroplastos y el elemento se mueve a las partes más jóvenes de la planta. Otros síntomas resultan en la formación del tallo con menor diámetro y en hojas visiblemente más pequeñas, que además la planta las elimina de manera prematura (Karthika *et al.*, 2018; Garza-Alonso, 2020).

2.3.3. Fósforo

El fósforo (P) se requiere en menores cantidades que el N, dentro de la planta se debe encontrar entre un 0.1 y 0.4% con respecto a su peso seco para que se considere como suficiente, lo que representa 1/5 a 1/10 de Nitrógeno o Potasio. El P en el suelo es considerado como inmóvil, mientras que en la planta se considera móvil. La planta absorbe directamente el P del suelo como inorgánico principalmente como H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} , destacando que las partes nuevas de la planta obtienen dicho elemento tanto por la raíz como de las hojas viejas. En cuanto a las funciones del P en la planta, este forma parte de la estructura de los ácidos nucleicos, de las membranas lipídicas y destaca por ser un componente vital de la adenosina trifosfato (ATP), estando el P involucrado en las transferencias de energía en la célula. El P es un elemento con un rol importante en la fotosíntesis, la translocación de azúcares y el movimiento de nutrimentos en la planta, además de ser fundamental en la formación de flores, semillas y crecimiento en general (Karthika *et al.*, 2018; Garza-Alonso, 2020).

La deficiencia del Fósforo, al igual que la del Nitrógeno, afecta en general el crecimiento de la planta, siendo este notorio en las hojas, en las cuales disminuye el área foliar. Los síntomas de esta deficiencia aparecen en las hojas viejas, recordando que este es un elemento móvil, y suele aparecer con una pigmentación morada o rojiza, causado por el exceso de antocianinas, aunque esto depende de la especie, ya que también puede aparecer con una pigmentación verde oscuro con un sub-tono morado en las hojas, las cuales progresivamente pueden deformarse e

incluso pueden aparecer puntas cloróticas o necróticas (Karthika *et al.*, 2018; Garza-Alonso, 2020).

2.2.4. Potasio

El potasio (K) es un elemento que se encuentra entre el 1-5% en los tejidos vegetales que se consideran sanos, elemento muy móvil y es absorbido como catión (K^+) por las raíces. Las plantas pueden absorber y traslocar K de manera eficiente, al ser absorbido por la raíz, la planta puede movilizar al elemento tanto por el xilema como por el floema, este último se asegura que el potasio llegue a los órganos necesarios como los frutos. En cuanto a sus funciones, el K no forma parte de ningún componente estructural dentro de la planta, pero es vital como regulador en el metabolismo y desarrollo de la misma. El K tiene un rol importante en la activación de más de 60 enzimas, incluidas algunas involucradas en la fotosíntesis y respiración, por lo que influye en la velocidad fotosintética y en una mayor producción de ATP. Además, son responsables de la apertura y cierre de estomas.

Los síntomas de deficiencia de K se observan en las hojas viejas, inicia en los márgenes con una clorosis que avanza al centro de las hojas, tornándose en necrosis. Los frutos son de los más afectados, causando problemas de deformaciones y de calidad (Karthika *et al.*, 2018; Garza-Alonso, 2020).

2.3.5. Calcio

El calcio (Ca) dentro de una planta sana se puede encontrar entre el 0.2 y 1% de su peso seco, este elemento lo absorbe la planta como catión (Ca^{2+}). El Ca destaca por ser móvil en el suelo, pero relativamente inmóvil en la planta, ya que una vez dentro de la planta dicho elemento permanece secuestrado dentro de la vacuola de las células maduras. El Ca está involucrado en el crecimiento de la planta, tiene un rol fundamental en los tejidos meristemáticos, estando involucrado en la elongación y división celular. Además, es el principal constituyente de las paredes celulares, aportando rigidez y mantiene la integridad de las membranas celulares (Karthika *et al.*, 2018; Garza-Alonso, 2020).

Los síntomas de deficiencia de Ca aparecen en tejido intermedio a joven, generalmente la planta desarrolla una clorosis junto con deformaciones en las hojas y es posible que el tamaño de la hoja se vea afectado resultando en un menor tamaño. Al estar involucrado en la estructura de la planta, el quiebre de pecíolos es algo habitual, además de la debilitación del tallo principal. El sistema radical también se ve afectado, cambiando a un tono marrón en conjunto con un aumento en su ramificación y una apariencia raquítica. La deficiencia de Ca es conocida por afectar la calidad de los frutos (Mengel & Kirkby, 2001; Karthika *et al.*, 2018; Garza-Alonso, 2020).

2.2.6. Magnesio

El magnesio (Mg) se encuentra entre el 0.05 y el 0.5% del peso total de una planta considerada sana, este elemento es absorbido como catión (Mg^{2+}) y tanto en el suelo como en la planta es considerado móvil. El Mg en conjunto con el N forman parte de la molécula de la clorofila, el Mg ubicándose en la parte central de esta, por lo que tiene un rol importante en la fotosíntesis. Otra función por la que también destaca el Mg es como activador de la enzima Ribulosa Bifosfato Carboxilasa (Rubisco), además de tener un efecto en la asimilación de CO_2 y en la producción de azúcares. En cuanto a temas energéticos dentro de la planta, el ATP se vuelve biológicamente activo cuando está unido a este elemento (Karthika *et al.*, 2018; Garza-Alonso, 2020).

Los síntomas de deficiencia para este elemento se aprecian mejor en las hojas viejas, esto debido a que es un elemento muy móvil, siendo un síntoma común la clorosis intervenal, que en algunas ocasiones donde la deficiencia es excesiva, puede pasar a una necrosis y posterior muerte de las hojas (Mengel & Kirkby, 2001; Karthika *et al.*, 2018; Garza-Alonso, 2020).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del Experimento

El presente experimento se llevó a cabo en el Centro de Agricultura Protegida de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, el cual se localiza en el Campus de Ciencias Agropecuarias en el municipio de Gral. Escobedo, N. L., a una altitud de 479 msnm y ubicación geográfica de 25° 47' 07'' latitud Norte, 100° 17' 03'' longitud Oeste (INEGI, 2019).

La investigación se realizó en un invernadero tipo gótico, con una superficie de 1,000 m² y altura aproximada de 4.5 m en las canaletas laterales y 7 m a la parte más alta.

3.2. Tratamientos y Diseño Experimental

Para la identificación de las deficiencias nutrimentales y su efecto en algunas características de la planta se evaluaron los siguientes tratamientos bajo el diseño experimental completamente al azar:

1. Solución nutritiva completa (Testigo)
2. Solución sin nitrógeno (-N)
3. Solución sin fósforo (-P)
4. Solución sin potasio (-K)
5. Solución sin calcio (-Ca)
6. Solución sin magnesio (-Mg)

3.3. Material Vegetal y Producción de Plántulas

El material vegetal utilizado fue semillas de papaya Maradol roja. La siembra se realizó en charolas de propagación tipo forestal de 38 cavidades el 1 de abril del 2021, el sustrato utilizado fue turba (peat moss). Las plántulas en las charolas fueron fertilizadas a partir del 18 de mayo con una solución que contenía 0.5 g L^{-1} del fertilizante 18-18-18 (N-P₂O₅, K₂O).

En el experimento se utilizaron contenedores de 19 L con perlita como sustrato, el cual es un material inerte de pH neutro y sin contenido de nutrientes (Papadopoulos *et al.*, 2008).

El riego se suministró por medio de un sistema automático utilizando un temporizador, durante las primeras semanas se aplicaron 8 impulsos diarios de 100 mL por maceta y a medida que la planta avanzó en su crecimiento, su requerimiento hídrico también aumentó, por lo que se incrementó a 12 impulsos diarios. Las soluciones nutritivas estaban localizadas al centro de las unidades experimentales en contenedores de 100 L con el tratamiento correspondiente (Figura 8 y 9).

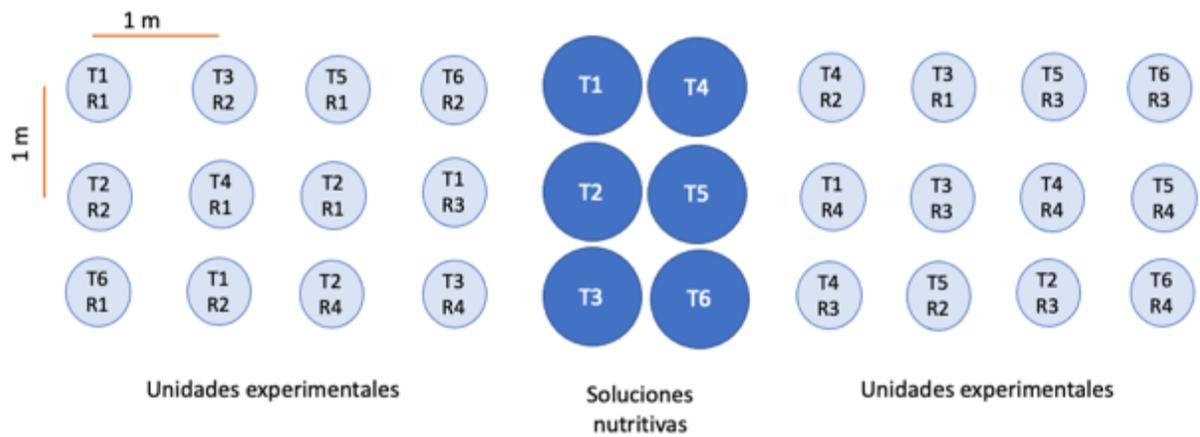


Figura 8. Croquis del experimento con los tratamientos asignados completamente al azar.



Figura 9. Establecimiento del experimento en marzo del 2021, en el centro de color azul los contenedores con las soluciones nutritivas (100 L) y de blanco las 24 unidades experimentales (19 L).

Las plántulas fueron trasplantadas en los contenedores el 26 de junio (Figura 10), las cuales fueron fertilizadas utilizando una solución nutritiva con las siguientes concentraciones: 168, 41, 156, 160 y 36 ppm de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente y micronutrientos hasta el 20 de agosto, fecha en la que se inició la etapa de inducción de deficiencias. Las observaciones y la toma de datos se llevaron a cabo durante 17 semanas, terminando el experimento el 14 de diciembre del 2021.



Figura 10. Establecimiento de plantas de papaya en el invernadero.

3.4. Inducción de Deficiencias Nutrimientales

Las deficiencias nutrimentales fueron inducidas a las plantas mediante la técnica del elemento faltante, que consistió en eliminar de la solución nutritiva el elemento en estudio (-N, -P, -K, -Ca y -Mg) y fueron comparados con el Testigo, el cual tenía una solución nutritiva completa (Cuadro 2).

3.5. Preparación de Soluciones Nutritivas

La solución base se preparó utilizando la propuesta por Hewitt (1966), siendo un punto medio entre las soluciones utilizadas en papaya (Cuadro 2).

Cuadro 2. Solución nutritiva seleccionada para el desarrollo de la investigación.

Elemento	Mg L ⁻¹	Elemento	Mg L ⁻¹
N	168	Fe	2.8
P	41	Mn	0.55
K	156	B	0.54
Ca	160	Cu	0.064
Mg	36	Zn	0.065
S	48	Mo	0.048

Las soluciones nutritivas control y los tratamientos -N, -P y -K se prepararon con agua que contenía 4.2 y 0.8 meq L⁻¹ de Ca y Mg disueltos en agua respectivamente y una conductividad eléctrica de 0.7 dS m⁻¹. Para la preparación de las soluciones de los tratamientos -Ca y -Mg se utilizó agua de lluvia con conductividad eléctrica de 0.05 dS m⁻¹.

Para las soluciones nutritivas con el elemento faltante se utilizaron fuentes de fertilizantes carentes de cada elemento de interés (Cuadro 3). Estas fueron calculadas por medio de ecuaciones simultáneas y matrices en el programa Microsoft Excel.

Cuadro 3. Fuentes de fertilizantes utilizadas para la preparación de las soluciones nutritivas y sus concentraciones (g / 100 L).

Fuente de fertilizante	Soluciones nutritivas					
	Completa	-N	-P	-K	-Ca	-Mg
CaCl ₂	-	16.7	-	-	-	16.7
Ca(NO ₃) ₂	44	-	44	44	-	50
31-4-0	-	-	-	27.3	17.6	-
KNO ₃	21.9	-	40.9	-	21.9	22.6
MgSO ₄	27.1	27.1	27.1	27.1	36.9	-
KH ₂ PO ₄	3.7	18	-	-	-	5.4
18-18-18	41.5	-	-	-	48.2	36.6
CaSO ₄	-	9.5	-	-	-	-
KCl	-	21.1	-	-	-	-
NH ₄ H ₂ PO ₄	-	-	-	13.7	-	-
(NH ₄) ₂ SO ₄ ⁻	-	-	24.7	-	-	-

3.6. Síntomas Visuales de Deficiencias de Macronutrientos

Los síntomas visuales de deficiencias para los macronutrientos fueron identificados y caracterizados utilizando las cartas de color para tejidos vegetales de Munsell (Munsell Color, Estados Unidos), las cuales describen los colores específicos de clorosis, necrosis y algún otro cambio de color en los tejidos. La hoja de papaya típica se muestra en las Figuras 11 y 12a y la distribución de las hojas en la Figura 12b, en donde se identificaron las partes principales para poder hacer la descripción de las deficiencias.

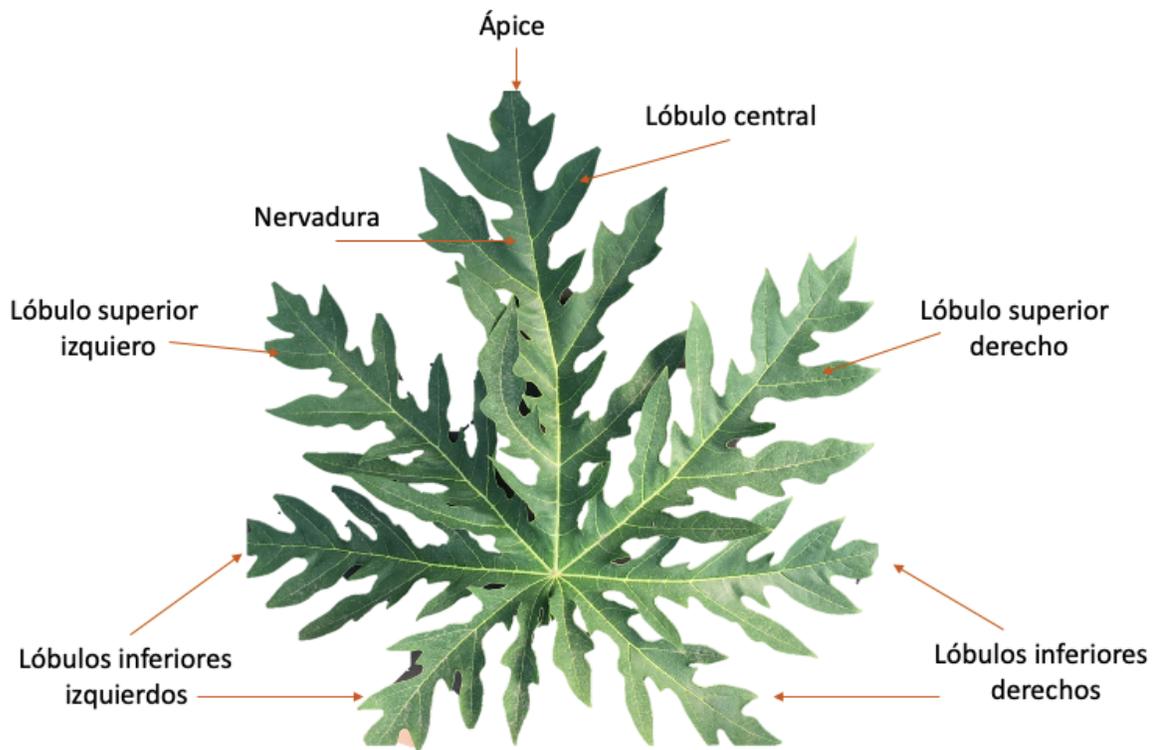


Figura 11. Descripción de las partes de la hoja madura de papaya para facilitar la descripción y caracterización de síntomas visuales.

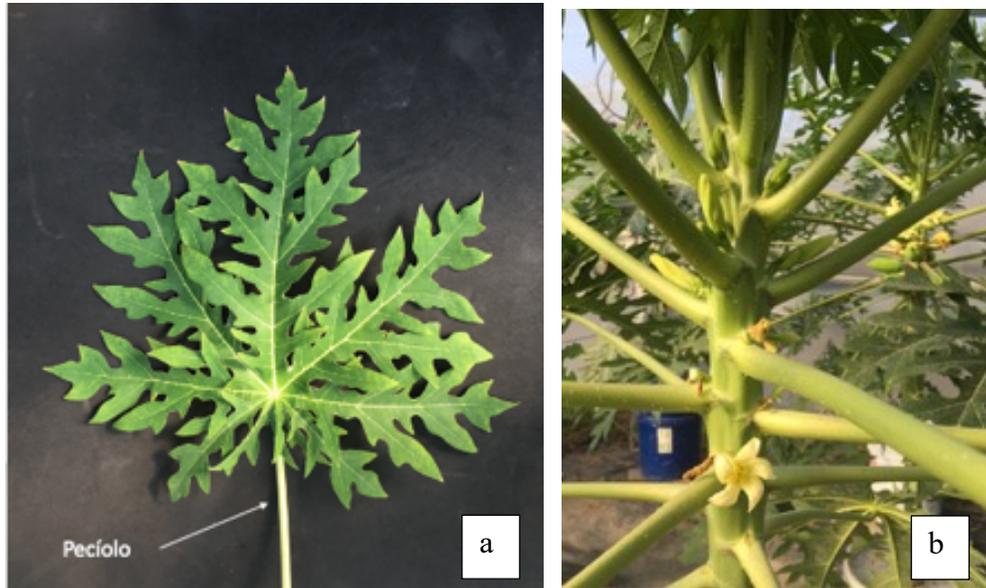


Figura 12. a. Pecíolo de hoja de papaya. b. Conformación de pecíolos y tallo.

3.7. Monitoreo de Crecimiento de las Plantas

El monitoreo de las plantas consistió en el registro de datos semanales, durante el periodo del 20 de agosto del 2021 al 13 de diciembre del mismo año. Las variables que se evaluaron fueron las siguientes:

1. Diámetro de tallo inferior: registrado en la base de la planta con vernier digital y se tomó en la base de la planta.
2. Diámetro de tallo superior: registrado a 35 cm a partir de la superficie del sustrato con un vernier digital con el objetivo de marcar un estándar en todas las unidades experimentales.
3. Altura de tallo: registrada desde la base hasta el ápice del tallo utilizando un estadal.
4. Determinación de peso seco: Al final del experimento, el peso seco fue cuantificado en los siguientes órganos de la planta, considerando raíz, tallo, pecíolo y hojas por separado. Las muestras fueron colocadas en un secador por 2 semanas y posteriormente en un

horno de secado a una temperatura de 60 °C por 24 horas. La materia resultante fue pesada en una báscula digital. El peso seco de las hojas y pecíolos se dividió en hojas nuevas-jóvenes y maduras-viejas de la planta, en la primera se consideró la zona media (sexta hoja aproximadamente) para arriba, mientras que la parte considerada maduras-viejas era la de abajo.

5. Número de hojas: El conteo se realizó al final del experimento considerando las hojas completamente expandidas.

3.8. Deficiencias Nutrimientales Estimadas por Sensor NDVI y Extracto de Savia de Pecíolo

La evaluación de las deficiencias de los nutrimentos consistió en medir la intensidad del color verde mediante un sensor NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), para encontrar alguna relación entre el valor de NDVI y las deficiencias. El sensor relaciona el color de las hojas con valores de -1.0 a 1.0, estos valores se interpretan con la finalidad de contribuir al diagnóstico rápido de condiciones relacionadas con la nutrición, el estado fisiológico, al igual que condiciones de estrés y del rendimiento de cultivos (Inman *et al.*, 2005; Lan *et al.*, 2009; Gutierrez-Soto *et al.*, 2011).

El equipo GreenSeeker modelo HCS-100 marca Trimble fue utilizado para realizar las mediciones de NDVI, manteniéndolo siempre a 60 cm de distancia de la planta o de la hoja que se estuviera midiendo. La recolección de datos se llevó a cabo en dos fechas, la primera fue 7 semanas después de la inducción de las deficiencias y la segunda en la semana 17. Para cada planta se obtuvieron 2 valores, siendo el primero en la hoja más recientemente madura y el segundo en la planta vista desde arriba.

El contenido de nitrato y potasio en savia de pecíolos fue medido mediante equipos LAQUAtwin de Horiba, en las mismas fechas en que se tomaron las lecturas de NDVI.

3.9. Extracción de clorofila

La extracción y cuantificación de clorofila a, b y total se realizó utilizando la metodología reportada por Marr *et al.* (1995) y Garza-Alonso *et al.* (2022), considerando la hoja más recientemente madura al término del experimento.

La determinación de clorofila consistió en pesar 5 g de hoja de papaya fresca, sin nervadura central, colocada en un vaso de cristal, y se agregaron 50 mL de acetona al 80 %. La muestra se licuó durante 30 segundos, y se colocó en tubos Corning de 50 mL para centrifuga, dejando reposar por 10 minutos hasta la precipitación de material insoluble, recuperando el sobrenadante.

La cuantificación de la concentración de clorofila a y b fue mediante un espectrofotómetro UNICO S-2150 (United products & Instruments, INC) a dos longitudes de onda, 647 nm y 663 nm, expresada en mg por g de hoja fresca y se calculó utilizando la ecuación de Lichtenthaler (1987) (Garza-Alonso *et al.*, 2022).

$$\text{Chl}_a = 12,25A_{663} - 2,79A_{647}$$

$$\text{Chl}_b = 21,50A_{647} - 5,10A_{663}$$

3.10. Determinación Foliar de Minerales

El análisis foliar de N y P en el tejido vegetal fue en hojas maduras. El N se cuantificó mediante la metodología de Bremner (1965) con el método micro Kjendahl. Mientras tanto, la determinación de P fue con extracto mediante la técnica de amarillo vanadato, utilizado un espectrofotómetro a 420 nm. Ambas determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos en la unidad Marín de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

3.11. Análisis Estadístico

Los datos fueron analizados considerando el modelo del diseño completamente al azar. En las variables continuas se realizaron análisis de varianza y cuando se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$) las medias se compararon utilizando el método de Tukey. Los análisis mencionados se realizaron con el programa SPSS Statistics 21 (IBM Corp., Estados Unidos).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Identificación y Caracterización de Síntomas Visuales de Deficiencias

El tratamiento 1 (Testigo), con solución completa, no desarrolló ningún síntoma de deficiencia, las 4 unidades experimentales durante las 17 semanas mostraron un color verde intenso similar al color 7.5 GY $\frac{3}{4}$ de las cartas Munsell (Figura 13).



Figura 13. Hoja del tratamiento Testigo, sin deficiencias y descrito con las cartas Munsell (7.5 GY $\frac{3}{4}$).

4.1.1. Deficiencia de N

Los síntomas de las deficiencias de Nitrógeno se manifestarán durante la segunda semana después de la inducción, con clorosis en las hojas viejas con color parecido al tono 2.5 GY 8/12 de las cartas Munsell (Figura 14a). La deficiencia inició en la parte central de las hojas y se extendió a lo largo de toda el área en las siguientes semanas. Al paso

de las semanas, la deficiencia ocasionó daños severos, con afectación a las hojas nuevas (Figura 14b).

El N forma parte de la molécula de clorofila, la deficiencia de este elemento genera una clorosis al dejar de sintetizar la clorofila (de Mello, 2021).



Figura 14. Síntomas de deficiencia de N observados en: a. hoja de papaya madura b. hoja de papaya nueva.

La floración fue afectada por la deficiencia de N, al abortar todas las flores durante las 17 semanas, siendo un síntoma observado en Pimiento (Silva *et al.*, 2017). Las plantas durante la etapa de reproductiva disminuye su actividad en la absorción de nutrientes por las raíces, dando inicio a procesos de removilización y suministro de nutrientes para el desarrollo de los órganos reproductivos (Gregersen *et al.*, 2013; Mu & Chen, 2021). A pesar de ello, la removilización del N hacia las partes reproductivas de la planta, no es suficiente para la formación de flores y frutos. Además, al ser un constituyente de proteínas, ácidos nucleicos, coenzimas y fitohormonas, estos intervienen en la formación de flores y frutos, por lo que una aguda deficiencia tiene como consecuencia la inhibición de floración o aborto de flores y frutos (Marschner & Rengel, 2012).

4.1.2. Deficiencia de Fósforo (P)

La deficiencia de P comenzó a presentarse a partir de la quinta semana después de la inducción, la planta mostró puntas cloróticas en hojas viejas, iniciando en los lóbulos superiores (Figura 15a), la clorosis evolucionó a puntas necróticas con el paso del tiempo (Figura 15b). Los síntomas observados en papaya también se vieron en el cultivo de higuera, donde se observaron hojas pequeñas (Garza-Alonso et al., 2019).



Figura 15. Síntomas de deficiencia de Fósforo: a. Clorosis en lóbulos superiores. b. Puntas necróticas. c. Aborto de flores y frutos.

En varias especies, incluyendo al pimiento (Silva *et al.* 2017), los síntomas de deficiencia de P inician con un oscurecimiento de las hojas, estas se tornan a un verde oscuro, con subtonos púrpuras o rojizos por el exceso de antocianinas (Malhorta *et al.*, 2018), y posteriormente se desarrolla clorosis. En la papaya no se observó un oscurecimiento del tono de verde , ni tonalidades púrpuras.

Otro síntoma visible de la deficiencia de P fue el aborto de flores y frutos (Figura 15c), siendo un síntoma considerado como característico de esta deficiencia, al ser un elemento involucrado en la transferencia de energía, floración y la formación de frutos y semillas (Bhattacharya, 2019).

4.1.3. Deficiencia de Potasio (K)

La deficiencia de K se manifestó durante la quinta semana después de la inducción, con clorosis en los bordes de las hojas más viejas (Figura 16a), este síntoma coincide con los observados en higuera (Garza-Alonso *et al.*, 2019), en pepino (Campos *et al.*, 2021) y en pimiento (Silva *et al.*, 2017).



Figura 16. Síntomas de deficiencia de Potasio a. Puntas y bordes cloróticos e inicio de puntas necróticas. b. Hoja joven del tratamiento -K c. Hoja marchita como efecto de la deficiencia.

En las semanas siete y ocho las hojas viejas comenzaron a desarrollar necrosis en los ápices, siendo también un síntoma característico de la deficiencia de K, debido a que

afecta la síntesis de proteínas y causa una mayor acumulación de compuestos nitrogenados solubles, como la putrescina, siendo esta considerada como un compuesto fitotóxico y causante de la necrosis en tejido foliar (Mengel, 2007; Hawkesford *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2017). La necrosis al paso de los días se expandió al resto de la hoja, hasta marchitarla completamente (Figura 16c), este efecto está también relacionado con el rol del K en la apertura de estomas. Las hojas jóvenes tenían un color similar al tono 7.5 GY 5/4 (Figura 16b), siendo aún más claro que el tratamiento -P.

Los frutos fueron afectados por esta deficiencia, desarrollando papayas visiblemente deformes (Figura 17), debido a que altera la partición de asimilados, por lo que los azúcares se acumulan en las hojas maduras debido a una inhibición de la exportación hacia los tejidos meristemáticos y otros órganos de la planta como las hojas en crecimiento (Gerardeaux *et al.*, 2010; Marschner & Rengel, 2012) y los frutos carnosos (Kanai *et al.*, 2007; Marschner & Rengel, 2012).



Figura 17. Frutos deformes en el tratamiento -K.

4.1.4. Deficiencia de Calcio (Ca)

La deficiencia de Ca se desarrolló a partir de la octava semana con una clorosis que inició en el centro del lóbulo central y en ambos lóbulos superiores en las hojas intermedias similar al tono 2.5 GY 7/8 (Figura 18). Esta fue la única deficiencia que no comenzó a manifestarse en las hojas viejas, debido a la poca movilidad del elemento.



Figura 18. Síntoma de deficiencia de Calcio en hojas intermedias en papaya.

En el tratamiento de -Ca las hojas no mostraron deformidad, a diferencia del cultivo de higuera (Garza-Alonso *et al.*, 2019), sin embargo, durante las semanas nueve y diez, la clorosis avanzó en toda la hoja y afectó la integridad de los pecíolos, los cuales sufrieron de quiebres (Figura 19) y posterior caída. El Ca, en forma de pectato de calcio, es un elemento que aporta estructura a la planta, siendo el componente principal de la pared celular, aportando rigidez y manteniendo la integridad de las membranas (Karthika *et al.*, 2018). Un síntoma típico de la deficiencia de Ca es la desintegración de las paredes celulares y el colapso de los tejidos afectados, como pecíolos, tallos y frutos (Shear, 1975; Ho y White, 2005; Marschner & Rengel, 2012). Esto se debe a una menor elongación celular, más que a una falta de división celular (Marschner & Rengel, 2012). Los frutos presentaron deformaciones y abortos, síntomas que son comunes en otros cultivos con deficiencia de Ca, como el caso de la pudrición apical en tomate (El-Tantawy & Mahmoud, 2016) y en pimiento (Silva *et al.*, 2019).



Figura 19. Pecíolo dañado por la deficiencia de Ca.

4.1.5. Deficiencia de Magnesio (Mg)

La deficiencia de Mg se manifestó en la 11va semana después de la inducción, presentando clorosis intervenal (2.5 GY 7/10) en el centro de las hojas más viejas (Figura 20a), comenzando con el lóbulo central y expandiéndose a toda la hoja al paso de los días. Manchas necróticas aparecieron a medida que la deficiencia fue más severa (Figura 20c), este síntoma también es común en pepino (Carmona *et al.*, 2015). La deficiencia con el paso de los días se extendió a toda la planta, incluso las hojas nuevas donde los bordes de estas eran un tono verde similar al 7.5 GY 4/4 (Figura 20b). El Mg desempeña un papel fundamental en la estabilización de los ácidos nucleicos (Marschner & Rengel, 2012), teniendo como consecuencia una clorosis intervenal.





Figura 20. Síntomas de deficiencia de Mg: a. Inicio de clorosis. b. Clorosis avanzada con manchas necróticas. c. Detalle de manchas necróticas.

4.2. Crecimiento Vegetativo

Las variables agronómicas que se analizaron fueron altura de la planta, diámetro inferior y superior del tallo, número de hojas y peso seco. El tratamiento Testigo alcanzó una mayor altura, fue también el que tuvo mayor diámetro inferior, encontrando diferencia con los otros tratamientos, los cuales no presentaron diferencias significativas entre ellos.

El diámetro superior del tallo fue también mayor en el Testigo comparado con los tratamientos -N y -Mg, los cuales resultaron con los menores diámetros de tallo (Cuadro 4). Los pesos secos de hojas, pecíolos, tallo y raíz fueron los más altos en el tratamiento Testigo (Cuadro 5), demostrando que la plantas en este tratamiento no contaba con ninguna deficiencia nutrimental. El peso seco del tallo, hojas y pecíolos viejos también fueron síntomas de deficiencias de todos los elementos estudiados, evidenciado por la diferencia en peso de todos los tratamientos respecto al testigo (Cuadro 5).

Cuadro 4. Crecimiento vegetativo de plantas de papaya (*Carica papaya L.*) con deficiencia de macronutrientes.

Trata	Altura de la planta (cm)	Diámetro inferior del tallo (mm)	Diámetro superior del tallo (mm)
1. Testigo	88.68 a	50.45 a	42.53 a
2. -N	76.36 b	42.65 b	31.28 b
3. -P	81.65 ab	43.58 b	37.03 ab
4. -K	86.91 a	41.31 b	34.56 b
5. -Ca	87.23 a	43.12 b	37.11 ab
6. -Mg	78.05 b	40.62 b	33.34 b

a, b: letras diferentes indican que hay diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$).

4.2.1. Nitrógeno

El crecimiento vegetativo se afectó por falta de N en las variables consideradas. La deficiencia disminuyó la velocidad de crecimiento, dando como resultado menor altura y menor diámetro superior (Cuadro 4). Además, fue el tratamiento con menor número de hojas, siendo estas las de menor tamaño (Figura 21). Lo mismo se observó en higuera (Garza-Alonso *et al.*, 2019), en pepino (Campos *et al.*, 2021) y en pimiento (Silva *et al.*, 2017). La deficiencia severa de N induce una degradación de los ácidos nucleicos y proteínas, lo cual está asociado a la senescencia de las hojas. El rompimiento del Rubisco conduce a un decremento de la capacidad fotosintética de la planta y, por lo tanto, inhibe el crecimiento de la planta en general (Marschner & Rengel, 2012).

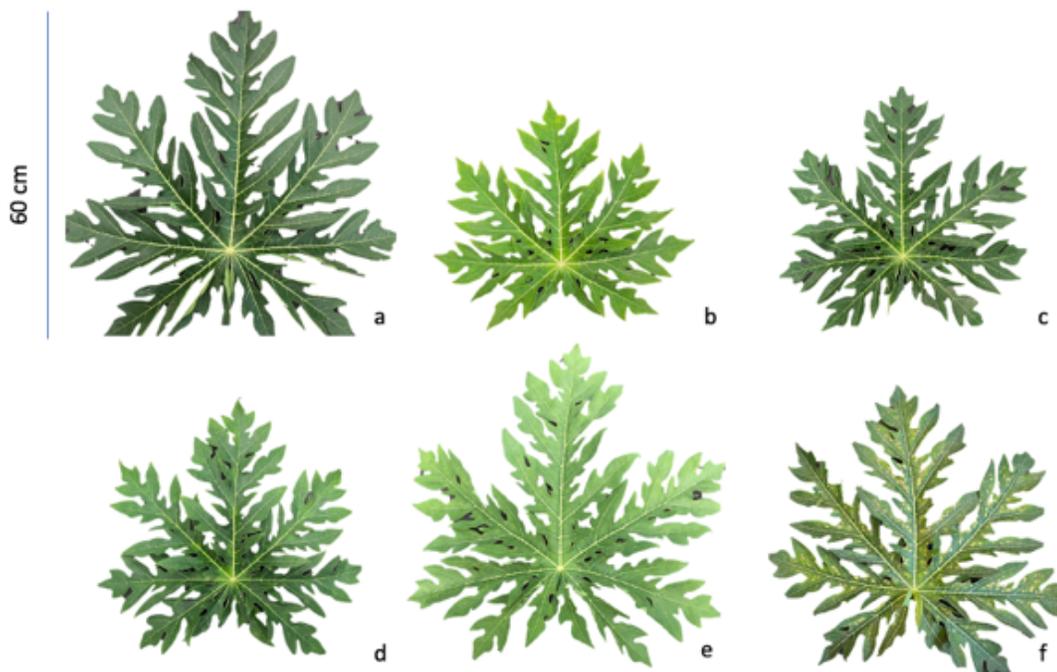


Figura 21. Referencia del tamaño de las hojas maduras en la semana 16. a) Testigo b) -N, c) -P, d) -K, e) -Ca y f) -Mg

Además, la deficiencia de N generó la menor acumulación de materia seca en hojas, pecíolos y tallos (Cuadro 5). El N forma parte de varios componentes de la célula vegetal y está directamente relacionado con la división celular, por lo que una deficiencia de este elemento afecta crecimiento, desarrollo y acumulación de materia seca dentro de los cultivos (de Mello, 2021).

4.2.2. Fósforo

La deficiencia de P afectó la altura de la planta y el tamaño de las hojas (Figura 21), esto ocurre debido a que el P se encuentra en altas concentraciones en los tejidos meristemáticos, está involucrado en todos los procesos energéticos de la planta y participa de manera activa en la síntesis de proteína, por lo que al omitir este elemento se afecta el crecimiento y el desarrollo de nuevos órganos vegetativos (Bhattacharya, 2019; Fariña *et al.*, 2022; Enriquez *et al.*, 2022). La deficiencia de P induce una reducción del número y expansión de las hojas debido a que se reduce la división celular y el periodo en el cual se lleva a cabo este proceso (Assuero *et al.*, 2004; Marschner & Rengel, 2012). La expansión de las hojas está relacionada con la expansión de las células de la epidermis, lo cual se reduce debido a la deficiencia de P (Clarkson *et al.*, 2000; Marschner & Rengel, 2012). El diámetro del tallo superior no se afectó por la deficiencia de P, debido a que este tratamiento fue estadísticamente igual que el Testigo (Cuadro 4).

El tratamiento -P, en cuanto a peso seco de hojas nuevas, fue el segundo más bajo, seguido de -N: esto se debe a que el P interviene en varios procesos metabólicos importantes que se desarrollan en este órgano, como son, síntesis de ATP, involucrado

en la transferencia de energía (de Mello, 2021). En el peso seco de pecíolos no hubo diferencia significativa del tratamiento -P con -K, -Ca y -Mg. La raíz también se observó afectada por la deficiencia de P (Cuadro 5).

4.2.3. Potasio

La altura de las plantas y el diámetro superior, en el tratamiento -K fue estadísticamente igual al Testigo, lo que indica que la deficiencia no afectó estas variables, lo que se debe a que el potasio no forma parte de ningún compuesto orgánico de la planta, además de no tener una función estructural (de Mello, 2021), este resultado también se observó en la altura de la higuera, la cual no fue afectada por la falta de K (Garza-Alonso *et al.*, 2019).

En cuanto al peso seco, el tratamiento -K fue menor que en el Testigo, tanto en hojas como en pecíolos, sin embargo, no hubo diferencia significativa con -P, -Ca y -Mg. Las raíces de las plantas en este tratamiento (-K) fueron las de menor peso seco, esto también coincide con lo observado en higuera (Garza-Alonso *et al.*, 2019), donde la deficiencia de K y de N afectaron por igual al peso seco de la raíz, sin embargo, en otros cultivos no se ha visto este efecto; en pepino (Campos *et al.*, 2021), el menor desarrollo de la planta y por ende el menor peso en raíz fue con las deficiencias de Mg y N, al igual que en pimiento (Silva *et al.*, 2017). La materia seca disminuye ante una omisión de K, ya que una de las funciones de este nutrimento es ayudar en el transporte de fotoasimilados, lo que repercute directamente en la materia seca de la planta (Cakmak, 1994; Hawkesford *et al.*, 2012; Cavalcante *et al.*, 2019).

4.2.4. Calcio

La deficiencia de Ca no tuvo un efecto negativo en la altura de las plantas ni en el diámetro superior (Cuadro 4) evidenciado a través del análisis estadístico, en donde resultó que el tratamiento -Ca fue igual al Testigo, sin embargo, el peso seco si se afectó, siendo menor que el Testigo y estadísticamente igual que las deficiencias de P, K y Mg (Cuadro 5). El peso seco de la raíz fue bajo, esto se debe a que la raíz en ausencia de suministro de Ca cesa su crecimiento en pocas horas (de Mello, 2021).

Cuadro 5. Peso seco de plantas de papaya (*Carica papaya* L.) con deficiencia de macronutrientes.

Trata	Peso seco (kg)					
	Hoja nueva	Hoja vieja	Pecíolo nuevo	Pecíolo viejo	Tallo	Raíz
Testigo	.120 a	.127 a	.047 a	.053 a	.358 a	.268 a
-N	.011 c	.017 b	.005 c	.009 b	.131 b	.123 b
-P	.034 bc	.047 b	.015 b	.024 b	.189 b	.089 bc
-K	.045 b	.038 b	.014 b	.016 b	.133 b	.057 c
-Ca	.038 b	.052 b	.011 bc	.019 b	.135 b	.064 bc
-Mg	.043 b	.053 b	.013 bc	.019 b	.125 b	.079 bc

a, b, c: letras diferentes indican que hay diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$).

4.2.5. Magnesio

Las plantas con deficiencia de Mg se afectaron en altura y en diámetro superior, siendo las segundas más afectadas seguidas de la deficiencia de N. El Mg tiene un rol importante en la fotosíntesis, siendo parte de la molécula de la clorofila, por lo que la deficiencia de Mg disminuye la síntesis de clorofila y en consecuencia la tasa fotosintética, ya que se afecta el tamaño, la estructura y la función de los cloroplastos (McSwain *et al.*, 1976; de Mello, 2021).

El tratamiento -Mg tuvo menor peso seco con respecto al Testigo, en hojas, pecíolos y raíz, siendo estadísticamente igual que -P, -K y -Ca, este efecto se ha encontrado en higuera (Garza-Alonso *et al.*, 2019) y pepino (Campos *et al.*, 2021).

4.3 Sensor NDVI

Para el NDVI en la hoja más recientemente madura, el análisis de varianza mostró diferencia significativa para la interacción entre tratamientos por fechas, por lo que se realizó la comparación de medias de los tratamientos en cada fecha.

En la primera fecha (Cuadro 6), no se encontraron diferencias significativas, todos los valores oscilaron entre 0.855 y 0.890, lo que indica tejido sano, sin embargo, en la fecha 2, es decir al término del experimento, se encontró que el tratamiento Testigo fue diferente a los otros tratamientos, con un valor mayor de NDVI, lo que evidencia un color más verde de la hoja, además de que valores menores a 0.7 se pueden relacionar con tejidos enfermos o con deficiencias (Gutiérrez-Soto *et al.*, 2011) La intensidad del color verde de la hoja, medido a través del NDVI, estuvo en el siguiente orden: Testigo > -K > -P > -Ca > -N > -Mg. Al finalizar el experimento, los menores valores de NDVI se observaron en el tratamiento de -Mg, debido a una degradación de la clorofila de la hoja, explicado por el hecho de que el Mg es el centro de la molécula de clorofila. En el tratamiento -Mg las hojas se apreciaban con clorosis intervenal y en los bordes, además de múltiples manchas necróticas a lo largo de la superficie de la hoja, por lo que el NDVI confirmó el daño.

Estos resultados concuerdan con los reportados por Paul *et al.* (2020) en un trabajo donde se identificaron las deficiencias de nutrimentos en hojas de vid, donde obtuvieron un decremento significativo en el valor de NDVI, con los valores más bajos en los tratamientos -N y -Mg seguido de -K.

Cuadro 6. Valores de NDVI en la hoja más recientemente madura de papaya en dos fechas.

Tratamiento	6-oct-2021	14-dic-2021
Testigo	0.855 a	0.875 a
-N	0.855 a	0.705 d
-P	0.865 a	0.770 bc
-K	0.890 a	0.808 b
-Ca	0.885 a	0.760 c
-Mg	0.863 a	0.625 e

a, b, c, d, e: letras diferentes indican que hay diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$).

Los resultados de NDVI para la planta completa vista desde arriba en la primera fecha no mostraron diferencias significativas (Cuadro 7), sin embargo, en la segunda fecha los valores de NDVI estuvieron en el siguiente orden: Testigo > -Mg > -K > -P > -Ca > -N. El orden de los tratamientos fue diferente al observado en la hoja recientemente madura debido a que los síntomas de deficiencias se presentan en forma diferencial en hojas nuevas y en hojas viejas dependiendo de la movilidad del elemento en la planta.

Esto coincide con la descripción de los síntomas visuales, debido a que el tratamiento -Ca tuvo bajos valores de NDVI debido a la presencia de clorosis en hojas jóvenes e intermedias por la poca movilidad del elemento, además de que el rompimiento de pecíolos provocó que perdiera follaje rápidamente en las últimas semanas del experimento. Los valores de NDVI también están relacionados con el área foliar, debido

a esto, el tratamiento -N tuvo valores bajos de NDVI porque desarrollo las hojas más pequeñas, resultando en menor área foliar y una clorosis generalizada.

Cuadro 7. Valores de NDVI en planta de papaya vista desde arriba en dos fechas.

Trata	6-oct-2021	14-dic-2021
Testigo	0.898 a	0.868 a
-N	0.885 a	0.780 c
-P	0.913 a	0.845 ab
-K	0.910 a	0.860 a
-Ca	0.903 a	0.828 b
-Mg	0.893 a	0.875 a

a, b, c: letras diferentes indican que hay diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$).

4.4. Extracto de Pecíolo

Las concentraciones de los iones nitrato y potasio en el pecíolo de la hoja más recientemente madura se realizó para estimar el efecto de los tratamientos sobre estas variables, además de identificar las interacciones entre los elementos. Los análisis de varianza para estas variables mostraron diferencias significativas ($p=0.000$) entre los tratamientos (Cuadro 8).

Cuadro 8. Comparación de medias de tratamientos para la concentración de iones de nitrato y potasio en el pecíolo de la planta de papaya.

Tratamiento	Promedio (NO ₃ -)	Promedio (K)
Testigo	1500.0 a	2150.0 b
-N	145.0 c	1600.0 c
-P	852.5 b	2075.0 b
-K	632.5 b	382.5 c
-Ca	1475.0 a	2200.0 b
-Mg	1500.0 a	3025.0 a

a, b, c: letras diferentes indican que hay diferencia significativa entre los tratamientos ($p<0.05$).

Los tratamientos con mayores concentraciones de nitratos fueron el Testigo, -Ca y -Mg, lo que indica que la deficiencia de Ca y Mg no inhibieron la concentración de nitrato en los pecíolos. Los tratamientos -P y -K resultaron con diferencia significativa respecto al Testigo, por lo que una deficiencia de P o K deprimieron la concentración de nitrato. Esto concuerda con la interacción que existe entre el N y K, donde aplica la ley del mínimo,

en donde la absorción de N es limitada por niveles bajos de K en la planta (Dibb & Thompson, 1985; de Mello, 2021). La interacción entre N y P es considerada como un sinergismo, cuando existe una deficiencia de P, la absorción y asimilación del N se ve afectada negativamente (Gniazdowska & Rychter, 2000; Kumar *et al.*, 2021).

La comparación de medias para la concentración de K mostró que los tratamientos -P y -Ca no afectaron la concentración de K, sin embargo, la ausencia de Mg incrementó la concentración de K en el pecíolo. La alta concentración de K en ausencia de Mg en la solución nutritiva fue explicada por Mello (2021), quien menciona que la planta prefiere absorber K por ser un ion monovalente (K^+) con bajo grado de hidratación comparado con los iones divalentes (Mg^{2+}), por lo que en ausencia de Mg, la planta absorbe y acumula más K. La interacción de N y K también se observó cuando se omitió al N en la solución nutritiva, debido a que el tratamiento -N deprimió considerablemente la concentración de K en pecíolo, lo cual puede estar relacionado con el papel del K como ion acompañante en el movimiento del nitrato dentro del xilema, si el nitrato tiene muy baja concentración en el pecíolo, se esperaría una baja concentración de K (Marschner & Rengel, 2012).

La interacción entre nutrientes se ha encontrado en otras investigaciones, en los cultivos de pepino (Campos *et al.*, 2021) y frijol (de Souza *et al.*, 2020) reportaron que la deficiencia de P disminuyó la concentración de N y que la deficiencia de N disminuyó la concentración de K.

4.5. Cuantificación de Clorofila

La extracción y cuantificación de clorofila se realizó al término del experimento, logrando cuantificar clorofila a (Cla), clorofila b (Clb) y clorofila total (CIT). La Cla fue mayor en el tratamiento -K, seguido del tratamiento -Ca, ambos fueron iguales estadísticamente, con valores de 24.037 y 19.999 mg/g, respectivamente.

El orden de Cla fue el siguiente: -K > -Ca > -Mg > -P > T > -N. La Clb fue mayor en todos los tratamientos comparado con la Cla, la mayor concentración se observó en el tratamiento -Ca con un valor de 40.115 mg/g, y el menor fue -N con 9.942 mg/g, el orden de todos los tratamientos fue el siguiente: -Ca > -K > T > -Mg > -P > -N (Cuadro 9). En la investigación realizada por Sánchez *et al.* (2018) en frijol, se observó que con dosis de fertilizantes deficientes de K ocurrió un incremento en la concentración de Cla, mientras que con dosis deficientes de N y de P ocurrió lo contrario, observando un decremento en la concentración de Cla, similar a lo que se encontró en el cultivo de papaya.

Cuadro 9. Concentración de clorofila en hoja recientemente madura de papaya en presencia de deficiencias nutrimentales.

Tratamiento	Cla	Clb	CIT	Cla/Clb
Testigo	5.662 c	31.893 b	37.555 b	.178 c
-N	3.354 c	9.942 d	13.296 c	.345 b
-P	13.914 b	19.630 c	33.544 b	.714 a
-K	24.037 a	34.712 b	58.749 a	.700 a
-Ca	19.999 a	40.115 a	60.114 a	.496 b
-Mg	15.392 b	20.073 c	35.464 b	.760 a

a, b, c, d: letras diferentes indican que hay diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$).

La CIT fue mayor en el tratamiento -Ca, seguido del tratamiento -K, con valores de 60.114 mg/g y 58.749 mg/g respectivamente. El Testigo tuvo una concentración de 37.555 mg/g, la cual concuerda con una investigación de extracción de pigmentos en papaya (Zulqarnain *et al.*, 2021), donde se utilizó una metodología similar a la presente investigación, se logró extraer de una hoja madura de papaya 14.125 mg g⁻¹ de Cla y 19.845 mg/g de Clb, resultando en un total de 34 mg/g de clorofila total. La concentración de CIT del Testigo no mostró diferencia significativa con el tratamiento -P y -Mg, la concentración más baja se encontró en -N.

Los valores de Clb fueron mayores que los de la Cla en todos los tratamientos, esto pudo haber sucedido debido a que, durante el experimento, en los meses de junio a septiembre las plantas estuvieron debajo de una malla sombra del 30%, lo que pudo alterar la síntesis de clorofila a, considerando que el cultivo de la papaya es de sol directo y requiere de una intensidad lumínica alta para su correcto desarrollo (Vázquez *et al.*, 2010).

La relación entre el contenido de Cla y Clb ya se ha estudiado en otras investigaciones, donde se ha encontrado que cualquier tipo de estrés en la planta, puede afectar reduciendo la actividad fotosintética, además de que la concentración de la clorofila b tiende a ser mayor, afectando directamente en la relación a/b (Cambrón *et al.*, 2011; Jaramillo *et al.*, 2018). En el presente estudio se encontró que la deficiencia de cualquiera de los elementos estudiados (N, P, K, Ca y Mg) incrementó la relación clorofila a/b, en el siguiente orden -Mg > -P > -K > -Ca > -N > T.

En maíz y en tomate se observaron otros efectos de las deficiencias nutrimentales y la concentración de clorofila (Kalaji *et al.*, 2017), donde todos los elementos excepto P, causaron un decremento significativo en el total de clorofila. En maíz la deficiencia de Ca fue el elemento que más afectó la concentración de clorofila, seguido de K, N y Mg. En el cultivo de tomate la falta de Ca fue la que registró menor clorofila, seguido de N, K y Mg.

En dicho estudio se mencionó que la acumulación de clorofila varía dependiendo de la especie vegetal, en la investigación de Garza-Alonso *et al.* (2019) en higueras con deficiencias de macronutrientes se observó que el tratamiento con valores más bajos de unidades SPAD fue -K seguido de -N y -Mg, sin encontrar diferencia significativa entre -P, -Ca, y la solución nutritiva completa.

4.6. Concentración Foliar de Minerales

4.6.1. Nitrógeno

La concentración de N en las hojas fue mayor en los tratamientos de -Mg, -Ca y -K, comparados con el Testigo (Cuadro 10), esto indica que la ausencia de estos cationes promueve una mayor absorción de N o una mayor asimilación. Este resultado es contrario a lo obtenido en la concentración de nitrato en la sabia de pecíolo, en donde no se encontró diferencia significativa entre el Testigo y -Ca y -Mg.

Cuadro 10. Promedio de porcentaje de N y P en hojas nuevas de papaya en presencia de deficiencias nutrimentales

Tratamiento	Promedio % Nitrógeno	Promedio % Fósforo
Testigo	4.408 c	0.442 d
-N	2.961 d	0.624 bc
-P	4.361 c	0.222 e
-K	5.247 b	0.673 ab
-Ca	5.401 ab	0.566 c
-Mg	5.859 a	0.739 a

a, b, c, d: letras diferentes indican que hay diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$).

La concentración de N en hojas no se vio afectada por el tratamiento -P debido a que no presentó diferencias significativas con el Testigo. En el tratamiento -N se encontró la menor concentración de N en la hoja como era de esperarse.

La concentración de clorofila total (Cuadro 9) coincide con la concentración de N acumulado en las hojas, donde los tratamientos que reportaron mayor contenido de clorofila total fueron -Ca, -K y -Mg, al igual que los que acumularon mayor % de N: -Mg, -Ca y -K.

La molécula de clorofila está compuesta en su mayoría por N (de Mello, 2021), por lo que tiene sentido que a una mayor concentración de N se observe una mayor concentración de clorofila. De acuerdo con los resultados, la deficiencia de Mg no afectó la concentración de clorofila en hojas nuevas de papaya, a pesar de ser el centro de dicha molécula.

El % de N en las hojas no mostró diferencia significativa entre los tratamientos -P y Testigo, sin embargo, en diversas investigaciones (Campos *et al.*, 2021 y Garza-Alonso *et al.*, 2019), se ha visto que la deficiencia de P provoca cambios químicos en la planta que inducen que se incremente el N.

4.6.2. Fósforo

El análisis de varianza para la concentración de P en el tejido vegetal mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p < 0.000$). La comparación de medias indicó que la deficiencia de alguno de los nutrientes N, K, Ca y Mg incrementó la concentración foliar de P, el orden del incremento fue -Mg > -K > -N > -Ca. En el cultivo de higuera Garza-Alonso, *et al.* (2019) encontraron resultados semejantes a los de la presente investigación, en donde observaron que el tratamiento -K acumuló más P, seguido de -N > -Mg > -Ca.

Los resultados anteriores se pueden visualizar fácilmente en una gráfica en donde se presenta la relación entre las concentraciones foliares de N y P para cada tratamiento (Figura 22). La gráfica muestra que los tratamientos -Mg, -K y -Ca indujeron una mayor concentración foliar de N y P comparados con el Testigo. En la gráfica también se observa que una deficiencia de N también incrementó la concentración de P en las hojas, pero una deficiencia de P no tuvo efecto en la concentración foliar de N.

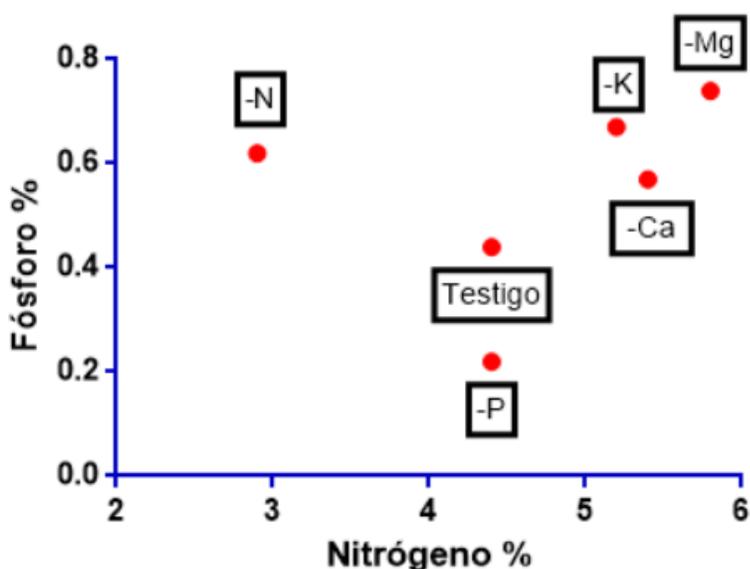


Figura 22. Relación entre el porcentaje de Nitrógeno y el porcentaje de Fósforo para cada tratamiento.

5. CONCLUSIONES

Las deficiencias de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) en el cultivo de papaya variedad Maradol roja se manifestaron a partir de la semana dos y fue diferente para cada elemento, logrando caracterizar dichas deficiencias hasta la semana 11 por medio de observación visual de síntomas, las cartas Munsell, la medición de NDVI, medidores portátiles de la concentración de Nitratos y Potasio en pecíolo, contenido de clorofila a, b y total, así como concentración de nitrógeno y fósforo en el tejido foliar.

El tratamiento más afectado en altura fue el -N seguido de -Mg, -P, -K y -Ca. El peso seco de hojas y pecíolos fue afectado mayormente por el tratamiento -N y el peso seco de raíz se afectó por el tratamiento -K.

En cuanto al NDVI, hubo diferencia entre los resultados de la hoja más recientemente madura y la planta vista desde arriba, en cuanto a la hoja más recientemente madura, el tratamiento -Mg fue el más afectado seguido de -N, -Ca, -P y -K. Los resultados de los valores de NDVI de la planta vista desde arriba fueron -N seguido de -Ca, -P, -K y -Mg, esto debido a la movilidad de los elementos.

El extracto de pecíolo identificó interacciones entre N y K ; N y P ; K y Mg.

El orden de Clorofila a fue el siguiente: -K > -Ca > -Mg > -P > T > -N. La Clorofila b fue mayor en todos los tratamientos comparado con la Clorofila a, donde la mayor concentración se observó en el tratamiento -Ca con un valor de 40.115 mg/g, y el menor fue -N con 9.942 mg/g, el orden de todos los tratamientos fue el siguiente: -Ca > -K > T > -Mg > -P > -N.

Se observó que la deficiencia de cualquiera de los elementos estudiados (N, P, K, Ca y Mg) incrementó la relación clorofila a/b, en el siguiente orden -Mg > -P > -K > -Ca > -N.

La concentración de nutrimentos en hoja mostró para la concentración de N: -Mg > -Ca > -K > T > -P > -N, y para la concentración P: -Mg > -K > -N > -Ca > T > -P.

5. REFERENCIAS

- Assuero, S. G., Mollier, A. and Pellerin, S. (2004). The decrease in growth of phosphorus-deficient maize leaves is related to a lower cell production. *Plant Cell Environ.* 27, 887–895.
- Benacchio S. S. (1982). Algunas Exigencias Agroecológicas en 58 Especies de Cultivo con Potencial de Producción en el Trópico Americano. FONAIAP- Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay Venezuela. 202 p.
- Bhattacharya, A. (2019). Changing environmental condition and phosphorus-use efficiency in plants. *Changing climate and resource use efficiency in plants*, 241-305.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *In: Methods for Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*; Norman, A. G., ed.; Amer. Soc. Agron., Inc. Madison, Wisconsin, USA, pp. 1149–1178.
- Cambrón, V., Herrerías, Y., España, M., Sáenz, C., Sánchez, N., & Vargas, J. (2011). Producción de clorofila en *Pinus pseudostrobus* en etapas juveniles bajo diferentes ambientes de desarrollo. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17 (2): 253-260.
- Campos, C., Teixeira, G., Prado, R., Caione, G., da Silva Júnior, G., David, C., Sales, A., & Teodoro, P. (2021). Macronutrient deficiency in cucumber plants impacts in nutrition, growth and symptoms. *Journal of Plant Nutrition*, 44 (17), 2609-2626.
- Campostrini, E., & Glenn, D. M. (2007). Ecophysiology of papaya: a review. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19, 413-424.
- Carmona, V. V., Costa, L. C., & Cecílio Filho, A. B. (2015). Symptoms of nutrient deficiencies on cucumbers. *International Journal of Plant & Soil Science*, 8(6), 1-11.
- Cavalcante, V. S., de Mello Prado, R., de Lima Vasconcelos, R., de Almeida, H. J., & da Silva, T. R. (2019). Growth and nutritional efficiency of watermelon plants grown under macronutrient deficiencies. *HortScience*, 54(4), 738-742.
- Clarkson, D. T., Carvajal, M., Henzler, T., Waterhouse, R. N., Smyth, A. J., Cooke, D. T. and Steudle, E. (2000). Root hydraulic conductance: diurnal aquaporin expression and the effects of nutrient stress. *J. Exp. Bot.* 51, 61–70
- Cruz, S. (2010). Producción de papaya (carica *Papaya L.*) en México estudio de caso: Estado Chiapas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México.
- De los Santos F., E. N. Becerra-León, A. Mosqueda-Vázquez y A. B. Vargas- García. (1997). Manual de Producción de Papaya en el Estado de Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Veracruz, México. 86 p.

- de Mello Prado, R. (2021). *Mineral nutrition of tropical plants*. Springer.
- de Souza C., Marques G., Barreto, R., Silva Campos, C., Freitas A., Teodoro, P. & de Mello R. (2020). Macronutrient deficiency in snap bean considering physiological, nutritional, and growth aspects. *Plos one*, 15(6), e0234512.
- Dibb, D. W., & Thompson Jr, W. R. (1985). Interaction of potassium with other nutrients. *Potassium in agriculture*, 515-533.
- El-Tantawy, E. M., & Mahmoud, M. I. (2016). Tomato Fruit Marketability, Blossom-End Rot Incidence and Quality as Affected by Different Calcium Sources and Time of Application Under Calcareous Soil. *Journal of Plant Production*, 7(5), 475-488.
- Enriquez, E., Rodriguez, L., Barrera, L., & Cedeño, J.(2022). Deficiencia nutricional de macronutrientes en plantas de pimiento (capsicum annum linneo) cultivadas en solución nutritiva. *Revista de Investigación Talentos*, 9(1), 69-82.
- Fariña, P. R. V., Franco, M. F. S., Aquino, L. A., Macedo, W. R., Pauletti, V., & Silva, C. D. da. (2022). Influência do vigor de sementes na resposta do feijoeiro à adubação com fósforo. *Research, Society and Development*, 11(2), e58011225914. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25914>
- Fuentes, G., & Santamaría, J. M. (2014). Papaya (*Carica papaya* L.): origin, domestication, and production. In *Genetics and genomics of papaya* (pp. 3-15). Springer, New York, NY.
- Gerardeaux, E., Jordan-Meille, L., Constantin, J., Pellerin, S. and Dingkuhn, M. (2010). Changes in plant morphology and dry matter partitioning caused by potassium deficiency in *Gossypium hirsutum* (L.). *Environ. Exp. Bot.* 67, 451–459.
- Garza-Alonso, C. (2020). Deficiencias de macronutrientes en higuera (*Ficus carica* L.) bajo condiciones de invernadero. Universidad Autónoma de Nuevo León. General Escobedo, Nuevo León, México.
- Garza-Alonso C., Carballo-Méndez F., Rodríguez-Salinas P., Olivares-Sáenz E., Rodríguez-Ortiz J. (2022). Salinidad y silicio en el crecimiento vegetativo y la concentración de pigmentos en cuatro cultivares de higuera (*Ficus carica* L.). *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 118(1): 19-35. <https://doi.org/10.12706/itea.2021.018>
- Garza-Alonso, C. A., Olivares-Sáenz, E., Gutiérrez-Díez, A., Vázquez-Alvarado, R. E., & López-Jiménez, A. (2019). Visual symptoms, vegetative growth, and mineral concentration in fig tree (*Ficus carica* L.) under macronutrient deficiencies. *Agronomy*, 9(12), 787.
- Gniazdowska, A., and Rychter, A. (2000). Nitrate uptake by bean (*Phaseolus vulgaris* L.) roots under phosphate deficiency. *Plant Soil* 226, 79-85. Doi 10.1023/A: 1026463307043

- Granados Ramírez, R., Salceda López, R., & Longar Blanco, M. D. P. (2015). Situación actual y perspectivas tecnológicas para la papaya (*Carica papaya* L.) en el distrito de Veracruz, Veracruz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(4), 749-761.
- Gregersen, P. L., Culetic, A., Boschian, L., & Krupinska, K. (2013). Plant senescence and crop productivity. *Plant molecular biology*, 82(6), 603-622.
- Gutiérrez-Soto, M. V., Cadet-Piedra, E., Rodríguez-Montero, W., & Araya-Alfaro, J. M. (2011). El GreenSeeker TM y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía mesoamericana*, 22(2), 397-403.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager Moller, I. y White, P. (2012). Function of macronutrientes. En P. Marschner (Ed.). *Marschner's mineral nutrition* (pp. 135-178). Oxford: Elsevier.
- Ho, L. and White, P. J. (2005). A cellular hypothesis for the induction of blossom end rot in tomato fruit. *Ann. Bot.* 95, 571–581.
- Hughes NM, Lev-Yadun S. (2015). Red/purple leaf margin coloration: potential ecological and physiological functions. *Environmental and Experimental Botany* 119: 27–39.
- Inman, D; Khosla, R; Mayfield, T. (2005). On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review* 25(3):209-214.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). Mapa Digital de México V6.3 Recuperado de: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?coordinates=>
- Jaramillo Salazar M. T., Marín Giraldo Y., & Ocampo Serna D. M. (2018). Efectos en el nivel fotosintético en tres especies de plantas acuáticas sometidas a un tratamiento con agua residual de origen minero. *Boletín Científico. Centro de Museos*, 22(1), 43-57. <https://doi.org/10.17151/bccm.2018.22.1.3>
- Jiménez, V. M., Mora-Newcomer, E., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2014). Biology of the papaya plant. In *Genetics and genomics of papaya* (pp. 17-33). Springer, New York, NY.
- Kanai, S., Ohkura, K., Adu-Gyamfi, J. J., Mohapatra, P. K., Nguyen, N. T., Saneoka, H. and Fujita, K. (2007). Depression of sink activity precedes the inhibition of biomass production in tomato plants subjected to potassium deficiency stress. *J. Exp Bot.* 58, 2917–2928.
- Karthika, K.S., Rashmi, I.; Parvathi, M.S. (2018). Biological functions, uptake, and transport of essential nutrients in relation to plant growth. In: *Plant nutrients and abiotic stress tolerance*; Hasanuzzaman, M.; Fujita, M.; Oku, H.; Nahar, K.; Hawrylak, B., eds; Springer Nature Singapore, Gateway East, Singapore, pp. 1-49, doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8>

- Kalaji, H. M., Dąbrowski, P., Cetner, M. D., Samborska, I. A., Łukasik, I., Brestic, M., ... & Panchal, B. M. (2017). A comparison between different chlorophyll content meters under nutrient deficiency conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 40(7), 1024-1034.
- Kumar, S., Kumar, S., & Mohapatra, T. (2021). Interaction between macro-and micro-nutrients in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 665583.
- Lan, Y; Zhang, H; Lacey, R; Hoffmann, WC; Wu, W. (2009). Development of an integrated sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. *Agricultural Engineering International, The CIGR E-Journal* 11:1-16.
- Marr IL, Suryana N, Lukulay P, Marr M.I., (1995). Determination of chlorophyll a and b by simultaneous multi-component spectrophotometry. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* volume 352(5): 456-460. <https://doi.org/10.1007/BF00323366>.
- Marschner, P., & Rengel, Z. (2012). Nutrient availability in soils. In *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (pp. 315-330). Academic Press.
- McSwain, B. D., Tsujimoto, H. Y., & Arnon, D. I. (1976). Effects of magnesium and chloride ions on light-induced electron transport in membrane fragments from a blue-green alga. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 423(2), 313-322.
- Mengel, K. (2007). Potassium. En A. V. Barker y D. J. Pilbeam (Eds.). *Handbook of plant nutrition* (pp. 135-178). Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
- Mengel, K.; Kirkby, E. A.; Kosegarten, H.; Appel, T. (2001). *Principles of plant nutrition*, 5th ed.; Springer, Dordrecht, NL., doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2>
- Mu, X., & Chen, Y. (2021). The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 76-82.
- Nakasone H. Y. & R. E. Paull. (1998). Papaya. In. *Tropical fruits*. New Cork: Ed. CAB International. pp. 239-269.
- Paul, M., Debnath, S., Debnath, T., Rogiers, S., Baby, T., Rahaman, D. & Schmidtke, L. (2020). Hyperspectral Imaging to detect Age, Defects, and Individual Nutrient Deficiency in Grapevine Leaves. arXiv preprint arXiv:2007.05197.
- Rivera-Pastrana, D. M., Yahia, E. M., & González-Aguilar, G. A. (2010). Phenolic and carotenoid profiles of papaya fruit (*Carica papaya* L.) and their contents under low temperature storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(14), 2358-2365.
- Sánchez, E., Ruiz, J. M., Romero, L., Preciado-Rangel, P., Flores-Córdova, M. A., & Márquez-Quiroz, C. (2018). ¿ Son los pigmentos fotosintéticos buenos indicadores de la relación del nitrógeno, fósforo y potasio en frijol ejotero?. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 5(15), 387-398.

- Santamaría, F., Mirafuentes, F., Zavala, M., & Vázquez, E. (2015). Calidad de Frutos de Materiales Comerciales de Papaya Roja Producidos en Yucatán, México. *Agronomía Costarricense*, 39(1), 161-167.
- Salinas, I., Hueso, J.J. y Cuevas, J. (2021) Active Control of Greenhouse Climate Enhances Papaya Growth and Yield at an Affordable Cost. *Agronomy* 11, 378.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2021). Papaya una fruta llena de sabor y valor económico. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/papaya-una-fruta-llena-de-sabor-y-valor-economico?idiom=es>
- Saran, P. L., Solanki, I. S., & Choudhary, R. (2016). Papaya: biology, cultivation, production and uses. CRC Press.
- Shear, C. B. (1975). Calcium-related disorders of fruits and vegetables. *HortScience* 10, 361–365.
- Silva, A. Z., Anderson, F. W., Nowaki, R. H., Cecílio Filho, A. B., & Mendoza-Cortez, J. W. (2017). Síntomas de deficiencia de macronutrientes en pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Agrociencia (Uruguay)*, 21(2), 31-43.
- Thomas, M., Ferguson, J. y Carne, J. (1995). Identification of N, K, Mg, Mn, Zn and Fe deficiency symptoms of carambola, lychee and papaya grown in sand culture. Florida state horticultural society. 108, pp 370-370.
- Vázquez, E., Mata, H., Ariza, R., & Santamaría, F. (2010). Producción y manejo postcosecha de papaya Maradol en la Planicie Huasteca. Secretaría de Agricultura, Ganadería. *Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*.
- Wadekar, A. B., Nimbawar, M. G., Panchale, W. A., Gudalwar, B. R., Manwar, J. V., & Bakal, R. L. (2021). Morphology, phytochemistry and pharmacological aspects of *Carica papaya*, and review. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 14(3), 234-248.
- Zulqarnain, A., Durrani, A. I., Saleem, H., & Rubab, S. (2021). Development of an ultrasonic-assisted extraction technique for the extraction of natural coloring substance chlorophyll from leaves of carica papaya. *Journal of Oleo Science*, 70(10), 1367-1372.