



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



RESPUESTAS FISIOLÓGICAS DEL FRIJOL CAUPÍ CV. VAQUITA

(*VIGNA UNGUICULATA* L. WALP) A LA APLICACIÓN DE

FOSFITOS

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

PRESENTA:

MIGUEL BERNABÉ MONTALVO CRUZ

DIRECTOR (A)

DR. CÉSAR MÁRQUEZ QUIROZ

CODIRECTOR (A)

DR. EFRAÍN DE LA CRUZ LÁZARO

VILLAHERMOSA TABASCO

AGOSTO, 2023



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



Jefatura de
Posgrado



Villahermosa, Tabasco a 01 de agosto de 2023

Of. No. 300 /JP/2023

Asunto: Autorización de impresión de Tesis

192C26001

**MTRA. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN
Y TITULACIÓN DE LA U. J. A. T.
P R E S E N T E**

En conformidad con lo establecido en el Artículo 77 fracción III del Reglamento de Titulación de la U. J. A. T., me permito comunicar a Usted que la **Dr. César Márquez Quiroz (Director)** y el **Dr. Efraín de la Cruz Lázaro (Codirector)**, dirigieron y supervisaron el Trabajo Recepcional de Tesis denominada “**Respuesta fisiológica del frijol caupí cv. Vaquita (*Vigna unguiculata* L. Walp.) a la aplicación de fosfitos**”, elaborado por el **C. Miguel Bernabé Montalvo Cruz** egresado de la **Maestría en Ciencias Agroalimentarias**. El jurado para el examen profesional conformado por el **Dr. Rufo Sánchez Hernández, Dr. Rodolfo Osorio Osorio, Dr. César Márquez Quiroz, Dr. Aldenamar Cruz Hernández y el Dr. Maximiano Antonio Estrada Botello**, revisaron y señalaron las modificaciones pertinentes al trabajo recepcional y que al interesado ha llevado a efecto. Por lo tanto, el trabajo recepcional Tesis de Investigación puede **imprimirse**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

**M. V. Z. JORGE ALFREDO THOMAS TÉLLEZ
DIRECTOR**

U.J.A.T.



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS AGROPECUARIAS
DIRECCIÓN

c.c.p. M. C. Irma Gallegos Morales – Coordinadora de Investigación y Posgrado de la DACA

Dra. Magally Guadalupe Sánchez Domínguez – Jefa de Posgrado de la DACA

Dr. Aldenamar Cruz Hernández – Coordinador del Programa Maestría en Ciencias Agroalimentarias

Dr. César Márquez Quiroz – Director de Tesis.

Interesado.

MGSD/aemh

Km 25, Carretera Villahermosa-Teapa
Ra. La Huasteca, 2ª sección, 86298, Centro, Tabasco, México
Teléfono 993 358 1500 EXT 6607

Correo electrónico: posgrado.daca@ujat.mx

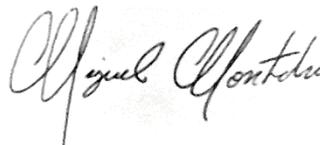
CARTA DE CEDE DE DERECHOS

El que suscribe, Miguel Bernabé Montalvo Cruz del programa de estudios de posgrado de la Maestría en Ciencias Agroalimentarias, con número de matrícula 192C26001, adscrito a la División Académica de Ciencias Agropecuarias, manifiesto ser autor intelectual y titular de los Derechos de Autor del presente Trabajo de Tesis denominada “Respuestas fisiológicas del frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) a la aplicación de fosfitos”, y autorizo a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice el presente trabajo con fines Académicos y de Investigación ya sea de forma física o digital para su difusión y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la Tesis mencionado y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco; a los veinticuatro días del mes de Julio del año 2023.

ATENTAMENTE



Miguel Bernabé Montalvo cruz
MATRICULA: 192C26001

DEDICATORIAS

La presente tesis está dedicado a Dios y a mi madre Esther Cruz Ascencio, ya que gracias a la bendición de mi Padre celestial y el apoyo incondicional de mi madre terrenal he logrado concluir con el presente estudio de posgrado.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer al Dios único y verdadero Jehová todo poderoso, por haber permitido a este, su hijo, todas las facilidades para poder llegar a este momento de mi vida, por la salud que me ha otorgado, así como por permitirme tener una familia que me ha apoyado durante todo mi proceso de formación académica y por permitirme encontrar en mi camino personas que me han guiado para poder ver materializado este sueño.

Mi más sincero respeto y agradecimiento a todos mis profesores que han compartido sus conocimientos y con gran vocación se dedican a formar personas de valor. Así como agradecer especialmente al Dr. César Márquez Quiroz, por haber puesto su confianza en mí y por todo el apoyo recibido de su persona, no me queda más desearle bendiciones en su vida, que Dios le permita crecer en la noble labor que ejerce, la cual es la formación académica y profesional de los estudiantes a su cargo.

Y finalmente agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

Índice

CARTA DE CEDE DE DERECHOS	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
1. Introducción	1
1. Planteamiento del problema	3
2. Justificación	5
3. Hipótesis	7
4. Objetivos	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	8
5. Revisión de Literatura	9
El cultivo huérfano	9
Frijol caupí (<i>Vigna unguiculata</i> L. Walp)	11
Fosfitos en la agricultura	12
Fotosíntesis y pigmentos fotosintéticos	14
6. Materiales y Métodos	19

7. Resultados y Discusión	22
8. Conclusiones	35
9. Literatura Citada	36
10. Anexos	48

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Índice de tablas

Tabla 1. Composición química proximal del frijol caupí crudo g/100g (base seca) (López <i>et al.</i> 2008).....	11
Tabla 2. Resultados del análisis de contenido de nitrógeno, materia y carbono orgánico en suelo.	22
Tabla 3. Resultado del análisis de capacidad de campo y punto de marchitez permanente en suelo.	22
Tabla 4. Análisis de varianza para componentes de rendimiento en vaina y granos.....	25
Tabla 5. Análisis de varianza para medición de peso de 100 semillas, largo, ancho y espesor de semilla.	26
Tabla 6. Análisis mineral de semilla de frijol caupí (<i>Vigna unguiculata</i>).	26
Tabla 7. Contenido de nitrógeno y proteína cruda total en semillas de frijol caupí cv. vaquita.	27

Índice de figuras

Figura 1. Dinámica de grosor de tallo en planta.	23
Figura 2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).	28
Figura 3. Índice Normalizado de Proporción de Pigmento a Clorofila a (NPCl).	29
Figura 4. Índice de Reflectancia de Carotenoides (CRI).	30
Figura 5. Índice de Reflectancia de Antocianinas (ARI).	31
Figura 6. Índice de Ancho de Banda (WBI).	32
Figura 7. Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura (SIPI).	33
Figura 8. Índice De Pigmento De Proporción Simple (SRPI).	34
Figura 9. Tendencia lineal en crecimiento de tallo por tratamiento en función al tiempo. ...	48

RESUMEN

El frijol caupí (*Vigna unguiculata*) se considera un “cultivo del futuro” ya que tiene características genéticas deseables, como la tolerancia al estrés biótico y abiótico. Los fosfitos, son compuestos inorgánicos que, en la planta, estimulan reacciones bioquímicas y sintetizan metabolitos secundarios, promoviendo el desarrollo de raíces, inducción de defensa, función bacteriostática y fungistática. El presente proyecto tiene como objetivo determinar el efecto de la aplicación de fosfitos en la producción de frijol caupí cv. Vaquita (*Vigna unguiculata* L. Walp.), mediante la comparación de rendimiento de grano, contenido mineral en grano y evaluación de pigmentos fotosintéticos foliares. De acuerdo con los resultados, la adición de fosfito de Zn, comparado con el testigo, incrementó el rendimiento, número de vainas y número de granos por vaina en 44.9, 27 y 2.4 %, así como el contenido mineral de N, P y Zn en 8.6, 11 y 14 % respectivamente. La adición de fosfito de K, comparado con el testigo, incrementó la longitud del grano un 5.5 %, así mismo incrementó el contenido mineral de Fe, Mg y Mn en 131, 10.2, 6.2 %, respectivamente. Con respecto a los análisis de pigmentos fotosintéticos, los resultados indican que los tratamientos de fosfitos, a diferencia del testigo, estimulan la producción de carotenos, además, se logró establecer una diferencia entre los contenidos de antocianinas, así como un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos, con lo cual se puede obtener un tamaño superior en vaina y semilla, permitiendo conseguir un mayor rendimiento en grano, siendo los tratamientos de Zn, Ca y K los que destacaron en este aspecto.

Palabras clave: frijol, caupí, fosfitos.

ABSTRACT

Cowpea bean (*Vigna unguiculata*) is considered a “crop of the future” because it has desirable genetic characteristics, such as tolerance to biotic and abiotic stress. Phosphites are inorganic compounds that stimulate biochemical reactions and synthesize secondary metabolites in plants, promoting the development of roots, defense induction, bacteriostatic and fungistatic function. The aim of this project is to determine the effect of phosphite application on the production of cowpea cv. Vaquita (*Vigna unguiculata* L. Walp.), by comparing grain yield, grain mineral content and evaluating leaf photosynthetic pigments. According to the results, the addition of Zn phosphite, compared to the control, increased the yield, number of pods and number of grains per pod by 44.9, 27 and 2.4%, as well as the mineral content of N, P and Zn by 8.6, 11 and 14%, respectively. The addition of K phosphite, compared to the control, increased the grain length by 5.5%, as well as the mineral content of Fe, Mg and Mn by 131, 10.2, 6.2%, respectively. Regarding the analysis of photosynthetic pigments, the results indicate that the phosphite treatments, unlike the control, stimulate the production of carotenes. Furthermore, it was possible to establish a difference between the contents of anthocyanins, as well as a better utilization of water resources, with which it is possible to obtain a higher pod and seed size, allowing to obtain a higher grain yield, being the treatments of Zn, Ca and K which stood out in this aspect.

Keywords: vean, cowpea, phosphite.

1. Introducción

El frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) es una leguminosa anual, originaria de África e India, ampliamente cultivada en las zonas tropicales. Dentro de la familia de esta especie, al frijol caupí se le considera un cultivo huérfano o secundario asociado con algunas características genéticas deseables, que le ha valido el título de “cultivo del futuro”, en comparación con los cultivos principales con mayor área de producción, rendimiento o valor nutricional (Tadale, 2019b). Según Li y Siddique (2018) una de las mayores noblezas de los cultivos huérfanos es su potencial de adaptación ante el cambio climático, esto como un ejemplo de la oportunidad para la investigación y producción de este tipo de cultivos. A pesar de su gran importancia genética para la agricultura presente y futura, los cultivos huérfanos generalmente han recibido poca atención por parte de la comunidad científica mundial, esto a pesar del creciente interés de la comunidad científica por resolver problemáticas en cuestión de viabilidad de diversos cultivos por cuestiones de alteraciones climáticas (CATIE, 2017).

Desde mediados de la década pasada, se ha proyectado la reducción del rendimiento de granos, lo que llevaría al aumento de precios por la pérdida de producción, debido a las alteraciones de condiciones climáticas en latitudes bajas, especialmente en regiones tropicales y con sequía estacional, clima representativo de las zonas agrícolas de México (CATIE, 2017; IPCC, 2014). De acuerdo con el panorama agroalimentario 2020, desde finales del año 2018 se estimaba una reducción de la producción de frijol en México causada por alteraciones climáticas (SIAP, 2020). Para el año 2019 se reportó una disminución en la producción del 26 %, superando de manera negativa los pronósticos de déficit a nivel nacional, mientras que, en algunos estados como Durango, este déficit incluso llegó a niveles de -49 % de producción, creando una incertidumbre en el cultivo y el precio del frijol. Dentro

de este contexto, los cultivos huérfanos se pueden desempeñar mejor que los cultivos principales debido a su resistencia a las diversas limitaciones ambientales (Chivenge *et al.*, 2015).

En general, los rasgos positivos de los cultivos huérfanos deberían alentar investigaciones enfocadas a derogar sus características indeseables para incrementar su rendimiento, nutricionalmente superiores y resistentes. Debido a la falta de investigación y desarrollo por parte de la comunidad científica de estos cultivos secundarios, no se han llevado a cabo esfuerzos que ayuden a potenciar rasgos desfavorables como rendimientos inferiores en términos de cantidad y calidad nutricional. Los principales elementos que afectan la productividad de estos cultivos son poca o ninguna selección de rasgos genéticos mejorados y condiciones ambientales extremas (Assefa *et al.*, 2011).

Los esfuerzos de colaboración para mejorar la agricultura, la alimentación, el valor comercial y la conservación no agrícola de este tipo de cultivos no solo ayudarían a los agricultores marginales, sino que también ayudarían a preservar los recursos genéticos disponibles aún por explorar (Arunava, 2019). Los fosfitos, por su parte, son compuestos que podrían ayudar al mejoramiento de rasgos agronómicos deseables para el cultivo de frijol caupí, debido a que al incorporarse al metabolismo secundario de las plantas, estimulan reacciones bioquímicas que sintetizan metabolitos secundarios, que promueven el desarrollo de raíces, inducción de defensa, función bacteriostática y fungistática con lo que mejoran la respuesta de estos ante estrés biótico y abiótico (Bertsch *et al.*, 2009; Batista *et al.*, 2015; McDonald *et al.*, 2001; Yañez *et al.*, 2018; Lovatt y Mikkelsen, 2006; Thao y Yamakawa, 2009).

1. Planteamiento del problema

Los países en vías de desarrollo viven constantemente con situaciones de inseguridad alimentaria y mal nutrición, y a pesar de los programas realizados por diferentes organizaciones, los progresos se pueden ver amenazados por conflictos, variabilidad climática y/o fenómenos meteorológicos extremos (FAO *et al.*, 2020). Actualmente en México se vive una de las peores temporadas de sequía, lo que constituye un reto complejo y urgente que enfrente el sector agrícola que depende de las temporadas de lluvia y, aunando a la crisis sanitaria y económica del país, resulta en un impacto irreversible que vulnera la seguridad alimentaria (SIAP, 2020).

En México, la producción de frijol en 2019 fue de 879,404 t, lo que representa una caída del 26 % en comparación al cierre del año agrícola 2018. Esto se debe a un decremento de casi el 40 % en la cosecha de frijol de temporal durante el ciclo primavera-verano, el cual aporta la mayor parte de la producción total del año agrícola (SIAP, 2020; FIRA, 2020). Lo anterior causó una tendencia al alza del precio al mayoreo del frijol; debido a una menor producción nacional, lo que confirma las proyecciones efectuadas, de la crisis que se viviría en la producción de granos por alteraciones climáticas en regiones tropicales y de sequía estacional (CATIE, 2017; IPCC, 2014), lo que provoca mayor incertidumbre a la seguridad alimentaria, de un producto básico en la alimentación de la población nacional.

El decremento en la producción de frijol de temporal durante el ciclo primavera-verano de 2019 se debió a la reducción del 16 % en la superficie de siembra en comparación con el ciclo primavera-verano del 2018, además, hubo un incremento del 152 % en la superficie siniestrada en comparación a 2018, debido al mal clima en diversas regiones del país (FIRA, 2020). Los factores de estrés abiótico, como las sequias, inundaciones, salinidad

y acidez en suelos, así como factores de estrés biótico como enfermedades, plagas y competencia con otras especies de plantas por los nutrientes del suelo, reducen de manera significativa la productividad de los cultivos. Siendo mayores los efectos adversos de los factores bióticos en las regiones tropicales, los cuales se presentan en mayor densidad y diversidad (Tadale, 2019).

Los cultivos huérfanos, como el frijol *Vigna unguiculata*, han sido considerados durante mucho tiempo como un cultivo de seguridad alimentaria de agricultores pequeños y marginales, así como una fuente de genes para la tolerancia al estrés biótico y abiótico, como la sequía (Arunava *et al.*, 2019). La seguridad alimentaria es un tema desafiante, particularmente en los países menos desarrollados y los cultivos huérfanos desempeñan un papel vital en el sustento de los agricultores y consumidores en estos países (Tadale, 2019b).

2. Justificación

Los fosfitos son compuestos químicos que ayudan al desarrollo de cultivos, mejoran la absorción de nutrientes e incrementan el rendimiento en plantas bajo condiciones de estrés ambiental (Veovides y Vázquez, 2018; Batista *et al.*, 2015). Se espera que los cultivos huérfanos se desempeñen mejor que los cultivos principales en un clima cambiante debido a su resistencia a las diversas limitaciones ambientales (Chivenge *et al.*, 2015). En general, los rasgos positivos de los cultivos huérfanos deberían alentar enfoques de investigación para menguar los rasgos indeseables asociados con los cultivos huérfanos hacia el desarrollo de cultivos de alto rendimiento, nutricionalmente superiores y resistentes.

La literatura reporta diversos efectos en la calidad de cultivos con la aplicación de fosfitos (Batista *et al.*, 2015; Veovides y Vázquez, 2018), por lo que es conveniente evaluar la capacidad que tienen para aumentar los rendimientos del cultivo de frijol caupí bajo condiciones del trópico del sureste de México. Debido a que se necesita con urgencia esfuerzos concertados para avanzar en la investigación y el desarrollo de variedades de frijol caupí que aporten calidad en la alimentación, el valor comercial y su conservación. Lo cual impactará en los agricultores marginales, y también ayudará a preservar los recursos genéticos aún por explorar de este cultivo.

Con la evaluación de las respuestas fisiológicas de los fosfitos en el cultivo de frijol caupí, se contribuirá a generar conocimiento, sobre la respuesta del frijol caupí a los fosfitos, con la intención de incrementar su rendimiento, para contribuir a la seguridad alimentaria. Es importante enfatizar la poca o nula evidencia bibliográfica de la acción de los fosfitos en cultivos secundarios como el frijol *Vigna unguiculata*, por lo que con esta investigación se tendrá información sobre métodos de estimulación que resulten en mejorar sus características

agronómicas. El resultado que tienen los fosfitos en el aprovechamiento de las plantas cambia de acuerdo al tipo de cultivo y componente mineral del fosfito que es aplicado, por eso es necesario evaluar su eficiencia, en consecuencia, se ha planteado determinar el efecto de la aplicación de cinco diferentes formas reducidas de fosfito en la producción de frijol caupí.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

3. Hipótesis

Los fosfitos pueden ser utilizados para mejorar rasgos agronómicos en la producción de frijol caupí.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

4. Objetivos

Objetivo General

Determinar el efecto de la aplicación de fosfitos en la producción de frijol caupí cv. Vaquita (*Vigna unguiculata* L. Walp).

Objetivos Específicos

- a) Evaluar las respuestas fisiológicas en frijol caupí cv. vaquita a aplicaciones de fosfitos.
- b) Comparar el rendimiento de grano obtenido bajo los diferentes tratamientos de fosfitos aplicados a las plantas de frijol caupí.
- c) Determinar el contenido mineral en granos de frijol caupí de los diferentes tratamientos de fosfito.
- d) Analizar los índices vegetativos mediante el uso del espectrómetro miniatura de hojas bajo los diferentes tratamientos de fosfitos aplicados a las plantas de frijol caupí.

5. Revisión de Literatura

El cultivo huérfano

El término cultivo huérfano u “orphan crops”, en inglés, se utiliza para denominar a cultivos marginales, de los cuales se tiene poco conocimiento científico, debido a que son cultivos que carecen de valor comercial importante, generan poco interés económico para la industria (Tadale, 2019b). En consecuencia, se encuentran desfavorecidos por la investigación y el desarrollo, pero este tipo de cultivos, es apreciado en comunidades por su “valor genético”, derivado de una persistencia y adaptación a nichos especiales en sistemas de producción de bajos insumos, sabor específico e importancia social, suministro de nutrientes esenciales y mejoras en la calidad del suelo (Tadale, 2019a).

Según Crops for the Future (CFF, 2019) los diversos nombres dados a estos cultivos reflejan las siguientes características: “descuidado” (por la ciencia y el desarrollo), “huérfano” (sin expertos en cultivos), “menor” (en relación en términos de producción con los cultivos globales), “prometedor” (para mercados emergentes, o debido a rasgos de valor previamente no reconocidos), “de nicho” (de importancia en sistemas de producción y economías marginales) y “tradicional” (utilizado durante siglos o incluso milenios). Los cultivos huérfanos se desenvuelven en un entorno socio-económico y dieta en las zonas marginales en países en vías de desarrollo, en parte a que este tipo de cultivo es fácilmente asociado con rasgos no deseables. Entre los que encontramos, un rendimiento o calidad nutrimental menor, debido a la falta de investigación y desarrollo, siendo los principales factores que afectan la productividad de estos cultivos la falta de mejoramiento genético, condiciones ambientales extremas y políticas desfavorables (Assefa *et al.*, 2011).

Dado que la mayoría de las tierras fértiles se utilizan para producir cultivos con mayor valor comercial, los cultivos secundarios se cultivan principalmente en suelos menos fértiles, los cuales se encuentran expuestos al estrés debido a factores bióticos y abióticos que merman su productividad (Tadale, 2019a). Los factores de estrés abiótico que prevalecen en países en vías de desarrollo son sequías, inundaciones, salinidad y acidez en suelos. Al mismo tiempo, factores de estrés biótico como patógenos, plagas y competencia con otras especies de plantas por los nutrientes del suelo, reducen de manera significativa la productividad de estos cultivos. Los efectos adversos de los factores bióticos son más frecuentes en regiones tropicales, los cuales se presentan en mayor densidad y diversidad. Por lo que, el alcance y el tipo de desafíos ambientales son más intensos en cultivos huérfanos (Tadale, 2019b).

Los cultivos huérfanos también están asociados con algunas propiedades favorables que les ha valido el título de “cultivos del futuro” (Li y Siddique, 2018), debido a que tienen características genéticas deseables que son útiles para impulsar su cultivo en un mayor nivel de producción. La compatibilidad de estos cultivos a la agro-ecología, así como su potencial de adaptación ante los cambios climáticos, son algunos ejemplos de la oportunidad para la investigación y producción de cultivos huérfanos. Se espera que los cultivos huérfanos se desempeñen mejor que los cultivos principales en un clima cambiante debido a su resistencia a las diversas limitaciones ambientales (Chivenge *et al.*, 2015). En general, los rasgos positivos de los cultivos huérfanos deberían alentar enfoques de investigación para abolir los rasgos indeseables asociados con los cultivos huérfanos hacia el desarrollo de cultivos de alto rendimiento, nutricionalmente superiores y resistentes (Assefa *et al.*, 2011).

Frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp)

El frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) es una leguminosa anual, originaria de África e India, ampliamente cultivada en zonas tropicales, se utiliza como fuente de proteína, calorías, fibra, minerales y vitaminas especialmente en los estratos de bajos ingresos económicos por su bajo costo de producción y acceso económico-social, además ocupa el segundo lugar después de los cereales como fuente de carbohidratos y proteínas en la dieta humana (Araméndiz *et al.*, 2015).

El frijol caupí proporciona alimento a millones de habitantes en África, donde se producen alrededor de 7,1 millones de toneladas, mientras que Nigeria, siendo el mayor productor y consumidor, representa el 48 % de la producción continental y el 46 % de la producción mundial (FAO, 2018). Aunque los granos son la parte principal de consumo de la planta del frijol caupí, las flores, vainas inmaduras y las hojas también se consideran comestibles en algunas partes del mundo (Jayathilakea *et al.*, 2018).

Las legumbres son consideradas como una rica fuente de energía y proteínas de origen vegetal. Por lo tanto, entre las comunidades marginadas de los países en desarrollo, el frijol caupí resulta un componente proteico de alta calidad de la dieta diaria. Nutricionalmente, el grano del frijol caupí es más o menos igual que otras legumbres, con un contenido de grasa relativamente bajo y alto contenido de proteína. Se considera un alimento rico en nutrientes con baja densidad energética (Jayathilakea *et al.*, 2018).

Tabla 1. Composición química proximal del frijol caupí crudo g/100 g (base seca) (López *et al.* 2008).

Proteína	Grasas	Cenizas	fibra	Carbohidratos	Humedad
24.43	2.21	4.20	5.79	51.69	11.68

Fosfitos en la agricultura

Los fosfitos empleados en la agricultura son compuestos que resultan de la reacción del ácido fosforoso con iones metálicos (potasio, calcio, magnesio, manganeso, cobre, zinc, aluminio, entre otros). Se forman en la naturaleza cuando el fósforo (P) reacciona espontáneamente con el oxígeno e hidrógeno que se encuentran en el ambiente, produciendo diversas formas reducidas del P (McDonald *et al.*, 2001). Desde la década de los cincuenta la Tennessee Valley Authority (TVA) en colaboración con el “Departamento de química” de la Universidad de Tennessee, en su afán por mejorar las condiciones de suelo y el mejorar el aprovechamiento de los cultivos en el área del sureste de la nación norteamericana, se dio a la tarea de evaluar fertilizantes de distintas formas reducidas de P como compuestos nutricionales, incluyendo entre ellos al ácido fosforoso y sus derivados los fosfitos (MacIntire *et al.*, 1950; TVA, 1948).

Dichos estudios se basaron en el posible efecto para suplementar las necesidades de fósforo y los efectos en rendimiento de algunos cultivos como trébol rojo y soya, dando como conclusión que el ácido fosforoso y el fosfito de calcio, como fuente edáfica de suplementación nutricional, fueron tóxicos para los cultivos iniciales, pero fueron beneficiosos a los cultivos sucesivos, exponiendo que esto se debe a la conversión biológica de los fosfitos a fosfatos en el suelo, afirmando que esta conversión es deficiente por la relación en el tiempo que esta ocurre (MacIntire *et al.*, 1950; TVA, 1948). Este acercamiento del potencial de las diferentes variantes de ácido fosforoso y fosfitos, dejó en claro que el ácido fosforoso y los fosfitos no son adecuados para la suplementación de fósforo en la necesidad nutricional de las plantas. Esto a pesar de que las raíces de las plantas rápidamente los transportan y concentran al interior de las células, de cualquier manera, estos compuestos

no pasan a formar parte de las vías metabólicas primarias y, por lo tanto, persisten en los tejidos durante largos periodos (McDonald *et al.*, 2001).

En las décadas de los setentas y ochentas se desarrollaron trabajos enfocados en la actividad fúngica de los fosfitos en el control de *Pythium* y *Phytophthora* spp. (Vo-Thi *et al.*, 1979; Saindrenan *et al.*, 1988; Smillie *et al.*, 1989). Siendo en 1977 la compañía francesa “Rhone-Poulenc” la que registra por primera vez en Francia, la patente de un derivado de etilfosfito con acción fúngica para uso agrícola (Rhone-Poulenc, 1977). En la década de los noventas aspectos sobre el beneficio de salud en las plantas de acciones no fúngicas de las sales del ácido fosforoso (fosfitos) fueron objeto de numerosas investigaciones que trajeron de vuelta la controversia acerca del potencial de los fosfitos para ser aprovechados como fuente nutrimental en plantas, para citar un ejemplo, Lovatt (1996) patentó productos de sales del ácido fosforoso neutralizadas usadas para vigorizar plantas y mejorar los rendimientos en frutales.

Esto se debe en parte, ya que los fosfitos actúan como promotores de resistencia, que ayudan a la planta a protegerse, estimulando la vía del ácido shikímico, además de sintetizar aminoácidos esenciales, ácido indolacético, ácido salicílico. Durante este proceso las plantas producen y acumulan fitoalexinas que habilitan a las plantas a fortalecer sus tejidos contra ataques de patógenos (Lovatt y Mikkelsen, 2006; Thao y Yamakawa, 2009). Su uso actual en la producción agrícola se basa en el rol que poseen como activadores de las defensas de las plantas y en el efecto antifúngico directo que tienen sobre algunos patógenos, así mismo también se comercializan como fertilizantes foliares para corregir deficiencias de nutrientes puntuales (Ca, Mg, Zn, Cu, K), además, cuentan con la ventaja de tener doble absorción en la planta (foliar y edáfica) (McDonald *et al.*, 2001).

Así también se ha encontrado evidencia acerca de la eficacia que tiene los fosfitos para control de protozoarios (*Plasmodiophora brassicae*) (Kammerich *et al.*, 2014). Del mismo modo los fosfitos fueron eficaces en inhibir el desarrollo de nematodos (*Heterodera avenae* y *Helicotylenchus spp.*) en cultivos de cereales y plántulas de plátano respectivamente (Oka *et al.*, 2002; Quintero y Castaño, 2012). Por otra parte, Lobato *et al.* (2011) reportaron la actividad directa bactericida contra *Erwina carotovora* en cultivos de papa, así como la inocuidad de los fosfitos al ser aplicados al suelo. Dado que las sales de fosfitos tienen niveles altos de solubilidad, también son un producto con capacidad de ser aplicado por vía de absorción foliar, a través del floema de las plantas, además, que en conjunto con una fuente nutricional de P inducen resistencia en cultivos, mejoran la respuesta de estos ante estrés ambiental y promueven efectos fungistáticos en fitopatógenos (Bertsch *et al.*, 2009; Batista *et al.*, 2015; McDonald *et al.*, 2001; Yañez *et al.*, 2018).

Fotosíntesis y pigmentos fotosintéticos

La fotosíntesis es un proceso de suma importancia para la biosfera porque convierte la energía de la radiación solar en energía química que puede ser usada por todas las formas de vida. Para la fotosíntesis la planta utiliza la radiación fotosintéticamente activa que está en el rango de 400 a 700 nm (Ascón & Talón, 2000). La fotosíntesis comprende dos reacciones globales diferenciadas, en la primera se realiza la transducción de energía, y en la segunda la reducción y fijación del carbono (Krauß, 2003). El estudio de la dinámica de los pigmentos fotosintéticos da una respuesta al comportamiento de las plantas, relacionado con la utilización de la energía lumínica, CO₂, agua y nutrientes durante su ciclo de desarrollo, lo que ayuda a diseñar sistemas de manejo eficientes. Además, establecen relaciones entre el

rendimiento de materia seca, la edad de la planta y los contenidos de pigmentos (Fortes *et al.*, 2010).

Los tejidos verdes de las plantas superiores contienen, por regla general, la misma secuencia de carotenoides, junto a las clorofilas a y b, estos pigmentos se encuentran localizados en los cloroplastos, mayoritariamente en los tilacoides. El β -caroteno aparece frecuentemente en cualquier especie, mientras que el α -caroteno, está presente en menor proporción (Goodwin, 1976). Los carotenoides en las plantas tienen al menos dos funciones fundamentales: a) actúan como agentes fotoprotectores de la clorofila, enzimas y lípidos; b) son pigmentos accesorios en la fotosíntesis, puesto que forman parte de los complejos clorofila-proteína, encargados de realizar el transporte electrónico y la conversión de la energía luminosa en biomasa (Monge *et al.*, 1984).

La cantidad de clorofila por unidad de área de las hojas constituye uno de los indicadores de la capacidad fotosintética de las plantas, ya que representa una medida de las dimensiones del sistema fotosintético y de su eficiencia (García *et al.*, 2005). El contenido de clorofila en las hojas es un parámetro útil para evaluar el estado fisiológico de las plantas. Todas las hojas verdes presentan mayor capacidad de absorción en el rango de 400 - 700 nm, en donde sucede la transmisión de electrones entre clorofilas y carotenos (Casierra *et al.*, 2012). En este sentido, los índices de vegetación se basan en la relación entre diferentes longitudes espectrales, así como del contenido de pigmentos y su correlación con la función fotosintética en plantas. Los índices de vegetación son cuantificaciones, producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un valor que proporcione información de la vegetación monitoreada (Sims *et al.*, 2002).

El contenido de pigmentos fotosintéticos puede cambiar como respuesta a factores causantes de estrés, a la capacidad fotosintética o al estado de desarrollo de la planta (Ustin *et al.*, 1999). Los espectrómetros son instrumentos que miden la radiación de luz entrante, así como la reflectancia y la transmitancia en un rango espectral, es decir, permiten medir la intensidad cuantitativa o absoluta en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Entre las aplicaciones de estos aparatos se encuentra la generación de firmas espectrales que caracterizan a un tipo de cobertura y de esta manera estructuran una biblioteca espectral. La variación en el patrón de absorción, reflexión y transmisión de estos espectros es generalmente única a cada material y la región en la cual los diferentes materiales absorben o reflejan la luz nos permite generar una firma única para cada material que se conoce como firma espectral (Sims *et al.*, 2002).

Dentro del área de investigación de las ciencias agroalimentarias, el espectrómetro se puede utilizar para cuantificar la concentración química, análisis de color, el estudio de reacciones fotoquímicas como la fotosíntesis y la cuantificación de propiedades físicas u ópticas como el espesor de la película, el índice de refracción y el coeficiente de extinción (Casierra *et al.*, 2012). Las mediciones se pueden utilizar para evaluar el estrés abiótico y biótico de las plantas. Algunos de los índices estudiados en la comunidad científica son:

Índice de pigmento intensivo de estructura (SIPI). Este índice maximiza la sensibilidad a la relación de carotenoides granel a clorofila mientras minimiza el impacto de la estructura variable del dosel. Es muy útil en áreas con alta variabilidad en la estructura del dosel o índice de área foliar. El valor de este índice varía de 0 a 2. El rango común para la vegetación verde es (0.8 a 1.8) (Peñuelas *et al.*, 1995).

Diferencia normalizada de reflectancia de la vegetación (NDVI). Está vinculado a la biomasa cuantitativa y puede usarse para monitorear el crecimiento vegetativo y determinar variables biofísicas como el área foliar (Rouse, *et al.*, 1973). El valor de este índice varía de -1 a 1. El rango común para la vegetación verde es de 0.2 a 0.8.

Reflectancia normalizada de clorofila de pigmento (NPCl). Evalúa la relación entre carotenoides y de pigmentos totales a clorofila *a* (Peñuelas *et al.*, 1993). Rango común (400-700 nm).

Índice de pigmento de proporción simple (SRPI). Sobre la base de la proporción de carotenoide y clorofila, Peñuelas *et al.* (1993) propusieron una técnica de medición de contenido ligeramente sensible al bajo contenido de clorofila ($<50 \text{ mg cm}^{-2}$), este índice es muy sensible a la estructura de la hoja.

Índice de Reflectancia de Antocianinas (ARI). La reflectancia es el factor de medición del sensor hiperespectral que capta el haz de luz reflejado por la muestra y se relaciona con la absorbancia según, dichos valores son utilizados para hallar el Índice de Reflectancia de Antociana que mide la presencia de antocianinas en una muestra (Gitelson *et al.*, 2001). Las bandas de 550, 700 y 800 (nm) del espectro electromagnético, son correspondientes al Índice de Reflectancia de Antocianinas.

Índice ancho de banda (WBI). Se introdujo por primera vez como un índice de agua de la planta (WBI) por Peñuelas *et al.*, (1993). Este índice es una medida de reflectancia que es sensible a los cambios en el estado del agua del dosel. Se considera que a medida que el contenido de agua de los doseles de vegetación aumenta, la fuerza de la absorción alrededor de 970 nm aumenta con respecto a la de 900 nm.

Las aplicaciones incluyen el análisis del estrés del dosel, la predicción y el modelado de la productividad, el análisis de la condición de riesgo de incendio, el manejo de tierras de cultivo y los estudios de la fisiología del ecosistema (Rodríguez, 2019).

Índice de Reflectancia de Carotenoides (CRI). Los principales desafíos al modelar el contenido de carotenoides a partir de índices espectrales es la gran superposición en las características de absorción de clorofila y carotenoides, junto con la concentración relativamente baja de carotenoides en las plantas, con la excepción de durante el estrés de la vegetación y la senescencia foliar (Gitelson, 2002), las bandas de 550 y 700 nm son las correspondientes a este índice.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

6. Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio: El proyecto se desarrolló bajo un sistema de producción protegido, en el área de vivero e invernaderos de la División Académica de Ciencias Agropecuarias (DACA) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) en el municipio de Centro, Tabasco, México (17,7907309, -92,9466737).

Siembra de semilla: La siembra del frijol caupí vaquita se llevó a cabo en 42 bolsas negras de polietileno con medidas 40 x 40 cm, se rellenaron con tierra negra, la cual se analizó sus propiedades físicas y químicas. Previo a la siembra se desinfectó el invernadero con amonio de cuaternarios al 12.3 % (Total 4G, MSAgros).

Tutoreo del cultivo de frijol: En el caso particular del sistema de producción en invernadero, el cultivo se condujo de manera vertical, para lo cual se dispuso de una guía de hilo de rafia, sujeta en la base de las macetas hasta un soporte de alambre recocido que se encuentra suspendido a 2 m de altura.

Manejo de cultivo: para el mantenimiento del cultivo se empleó el riego manual, el cual fue orientado a la necesidad hídrica de la planta para satisfacer el desarrollo de cada etapa de crecimiento, así como la adecuación a las variaciones en las condiciones de humedad y evapotranspiración del ambiente al interior del invernadero.

A partir del primer mes después de siembra, y una vez cada 15 días, se utilizó riego foliar con solución nutritiva utilizando un fertilizante para uso foliar, marca: micro-min 20-30-10, de la empresa: MEZFER Crown, esto con el fin de evitar deficiencias nutrimentales.

Diseño experimental: Se utilizó un diseño completamente al azar, en el que se incluyen seis tratamientos con siete repeticiones y dos plantas por repetición, los tratamientos consistieron en cinco productos de fosfitos (Ca, Cu, K, Mg, Zn) y un testigo.

Aplicación de los tratamientos de sales de fosfitos: Se aplicarán cinco tratamientos de sales de fosfitos, en forma de fosfito de K, Zn, Mg, Ca y Cu; para lo cual se utilizarán diferentes formas de iones de fosfito, de un producto, con nombre comercial: Phos-K, Phos-Zn, Phos-Mg, Phos-Ca, Phos-Cu; de la compañía Hortikem. Las dosis usadas fueron las recomendadas por el fabricante (4 L ha^{-1}), de acuerdo al cultivo de leguminosas.

La primera aplicación se hizo al primer mes después de siembra, posteriormente las siguientes se realizaron con un intervalo de 15 días entre aplicaciones, cada una consistía en destinar a la base de tallo 118 ml de solución, dando un total de 826 ml de tratamiento aplicado por planta durante los 102 días que tuvo duración el experimento, además de la aplicación edafológica, también se le administro vía foliar, 50 ml de tratamiento en las mismas dosis correspondientes, dando un total de 350 ml de solución de tratamiento de fosfito asperjada a cada unidad experimental.

Cosecha: La cosecha se realizó de forma manual, una vez que las vainas alcanzaron su madurez fisiológica. Las vainas se colectaron y se depositaron en bolsas de papel de estraza previamente etiquetadas.

Variables fenológicas: Durante el ciclo del cultivo se realizó la medición del grosor del tallo de planta, iniciando a los 30 días después de siembra (dds), con intervalo de 15 días entre medición, hasta alcanzar el periodo de floración y llenado de vaina (90 dds). Para efectos de medición de componentes de rendimiento, se determinó el número de vainas cosechadas por tratamiento, número de granos por vaina, largo de vainas, peso de vainas, peso de granos por vaina y el rendimiento total en peso de semilla cosechada por planta. Además de la determinación del ancho, largo y espesor de las semillas cosechadas y el peso total de 100 semillas.

La longitud de vaina, se determinó con cinta métrica, el grosor de tallo y el dimensionamiento de la semilla se realizó con un vernier digital, marca CAPRI (modelo: DC201-6); mientras que la determinación del peso de las semillas y vainas se realizó con una balanza gravimétrica.

Análisis de pigmentos fotosintéticos: los pigmentos se determinaron por métodos no destructivos con un espectrómetro miniatura de hojas (CI-710, CID BioScience), el tiempo de integración fue de 850 ms, con un Boxcar con dos puntos, el análisis de los datos de reflectancia de las hojas se realizó con el software “SpectraSnap”, versión 1.1.3.150 de CID BioScience. Al respecto el software permite analizar picos discretos múltiples en un espectro de 400-950 nm, y estima las propiedades de la vegetación (Alsina *et al.*, 2016).

Análisis del contenido mineral en las semillas de frijol caupí: Para el análisis de contenido mineral, se molieron 10 gramos hasta formar un polvo que se guardó en bolsas plásticas. Se determinó el contenido de nitrógeno total en la semilla con la técnica de micro Kjeldahl para tejido vegetal (Kjeldahl, 1883), en el laboratorio de suelos del Centro de Investigación de Ciencias Agropecuarias (CICA) ubicado dentro de las instalaciones de la UJAT-DACA. El análisis de contenido de macro y micronutrientes se realizó mediante una técnica de fluorescencia de rayos X, con un espectrómetro micro XRF (marca Bruker Modelo: Tornado M4).

Análisis de datos: Con los datos obtenidos se realizó un análisis de regresión, análisis de varianza y para determinar diferencia entre medias se utilizó la prueba de comparación de medias de Duncan ($P \leq 0.05$ %). Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el software InfoStat (versión 2020).

7. Resultados y Discusión

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis físico del suelo, en el que se observa que el suelo utilizado tiene una estructura franco-arcillosa.

Tabla 2. Resultados del análisis de contenido de nitrógeno, materia y carbono orgánico en suelo.

N	MO	CO
	%	
0.29	6.78	3.94

MO= Materia orgánica, CO= carbón orgánico.

Mientras que los resultados de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente del suelo (tabla 3), donde se observa que la capacidad de campo es del 35 % y del 23 % el punto de marchitez permanente, lo que indica que se tiene 10 % de agua útil o 10 mm de agua por cada 10 cm de suelo. De acuerdo a la literatura este tipo de suelo posee buen drenaje y una textura medianamente densa, dotándolo de una porosidad estructural, debida principalmente a la alternancia de ciclos de humectación-desección. Este proceso de fisuración natural resulta suficiente para asegurar un buen drenaje y facilitar el desarrollo radicular de las plantas, siempre y cuando el contenido de humedad se mantenga dentro de la capacidad de retención de agua, por lo cual es recomendado para cultivos tempranos, como hortalizas, legumbres y cereales de ciclo corto (Cerisola *et al.*, 2005).

Tabla 3. Resultado del análisis de capacidad de campo y punto de marchitez permanente en suelo.

Capacidad de campo		Punto de marchitez permanente	
%Hg	%Hv	%Hg	%Hv
35.16	26.05	23.91	19.29

Hg= humedad gravimétrica; Hv= humedad volumétrica.

El ciclo de cultivo fue de 113 dds. Durante la etapa de desarrollo de la planta se llevó a cabo el registro de grosor de tallo (Figura 1), del cual, cabe destacar el tratamiento de fosfito de Zn, el cual obtuvo la media más alta siendo esta de 4.58 mm, mientras el tratamiento de fosfito de Cu obtuvo la menor media de 4.41 mm.

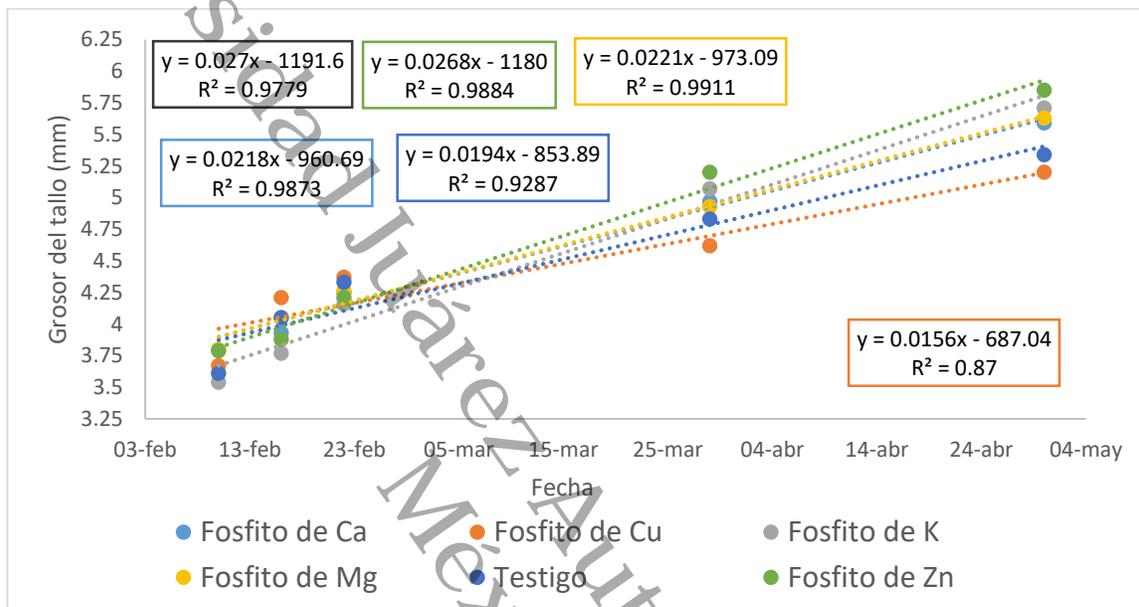


Figura 1. Dinámica de grosor de tallo en plantas de frijol *Vigna*.

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis de varianza para la variable de componentes de rendimiento. Donde se observa que al adicionar fosfito de Zn el rendimiento se incrementó 44.9 % en comparación con el rendimiento obtenido en el testigo, de igual manera, la adición de fosfito de Ca incrementó el rendimiento 41.3 % en comparación con el testigo. Mientras que la adición de fosfito de Cu y fosfito de K registraron un decremento de 17.5 y 28.8 % respectivamente, en comparación con el testigo. Al respecto, un estudio realizado por Samreen *et al.* (2013) destaca que la translocación del Zn en el metabolismo de las plantas propicia mayor crecimiento vegetal en frijol mungo (*Vigna radiata*), lo que coincide con lo reportado por Clark y Zeto (2000) sobre el efecto positivo del Zn en los

procesos de división y alargamiento celular. Además, el Zn está relacionado con la actividad fotosintética y se sabe que la cantidad de fotosintatos está relacionada positivamente con el crecimiento vegetal (Sharma *et al.*, 1990; Kaya *et al.*, 2005; Nadergoli *et al.*, 2011).

Los resultados del análisis de varianza para peso de 100 semillas y longitud de semilla (Tabla 5) están dentro de los rangos reportados en la literatura, al respecto, Morales-Morales *et al.* (2019) reportan valores en el peso de 100 semillas de entre 3.46 y 22.08 g, el largo de semilla entre 6.26 y 9.56 mm, el ancho de semilla entre 3.64 y 7.4 mm, y espesor de semilla entre 2.86 y 5.56 mm. De acuerdo con Ogle *et al.* (1987) las variedades de frijol caupí se pueden clasificar en cuatro categorías con base en el peso de 100 semillas, es decir, a) semillas pequeñas con peso menor a 15 g, b) semillas medianas de 15.1 a 20 g, c) semillas grandes de 20.1 a 25 g y d) semillas muy grandes con peso superior a 25 g. Lo que indica que la semilla obtenida de la variedad cultivada estaría clasificada en el rango de semilla mediana.

Los resultados obtenidos en cuanto a longitud de semilla varían entre 9.29 y 9.8 mm, lo que coincide con lo reportado por Kabas *et al.* (2007) quienes registraron valores entre 5.5 y 9.0 mm. Siendo el tratamiento de K el que obtuvo el valor significativamente más alto, incrementando su longitud en un 5.5 % con respecto al testigo. Por otra parte, el tratamiento con fosfito de Zn destacó en el contenido mineral de semilla (Tabla 6) con 11 % en el incremento del contenido de P, en comparación con el testigo. Mientras que el tratamiento fosfito de K registró un incremento en el contenido de Mg, Fe y Mn de 10.2, 131 % y 6.2 % respectivamente, con respecto al testigo.

El tratamiento de Zn registró un incremento de 14 % en el contenido de Zn en comparación con el testigo. Al respecto se sabe que la concentración de Zn en las semillas depende de la

disponibilidad del elemento en el suelo y está relacionado con el pH (Muranaka *et al.* 2015). El tratamiento fosfito de K registró la mayor concentración de Fe con 80.67 mg kg⁻¹, los cuales son suficientes para satisfacer los requerimientos de la población que consume esta especie como alimento básico; al respecto Timko y Singh (2008) mencionan que se requieren concentraciones de 48 a 79 mg kg⁻¹ de Fe en las semillas de frijol caupí para considerarse como alimento autosuficiente. El contenido de nitrógeno y proteína cruda incrementó un 8.6 %, en comparación con el testigo, al adicionar fosfito de Zn (Tabla 7).

Tabla 4. Análisis de varianza para componentes de rendimiento en vaina y granos.

Tratamiento	Número de vainas	Número de granos por vaina	Largo de vaina	Peso de vaina	Rendimiento	Peso de granos por vaina
			(cm)		(g)	
Testigo	3.71 ab*	8 a	13.51 ab	1.57 a	4.41 ab	1.29 a
Ca	4.14 ab	8.31 a	13.89 a	1.59 a	6.23 a	1.36 a
Cu	3.86 ab	6.15 b	11.81 b	1.15 a	3.64 b	0.94 a
K	2.86 b	5.95 b	11.65 b	1.25 a	3.14 b	1.05 a
Mg	4.57 a	8 a	13.18 ab	1.46 a	5.44 ab	1.19 a
Zn	4.71 a	8.21 a	13.83 a	1.61 a	6.39 a	1.35 a

*Valores con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo a la Prueba de Rangos Múltiples de Duncan (P>0.05).

Tabla 5. Análisis de varianza para el peso de 100 semillas, largo, ancho y espesor de semilla.

Tratamiento	Peso de 100 semillas	Largo	Ancho	Espesor
	(g)			
Testigo	18.1 a*	9.35 ab	6.75 a	4.91 a
Ca	17.8 a	9.42 ab	6.79 a	4.97 a
Cu	17.2 a	9.29 c	6.51 a	4.97 a
K	17.5 a	9.8 a	6.69 a	5.12 a
Mg	17.6 a	9.36 ab	6.59 a	4.94 a
Zn	18.2 a	9.64 ab	6.68 a	5.02 a

*Valores con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo a la Prueba de Rangos Múltiples de Duncan ($p > 0.05$).

Tabla 6. Análisis mineral de semilla de frijol caupí (*Vigna unguiculata*).

Tratamiento	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	ppm	cmol kg ⁻¹			mg kg ⁻¹			
Testigo	0.118 c	31.6 a	0.64 a	6.47 c	34.91 bc	12.74 bc	5.03 a	35.23 bc
Ca	0.119 c	32.2 a	0.67 a	7.09 ab	37.86 bc	12.09 c	4.39 a	33.96 c
Cu	0.125 b	32.01 a	0.76 a	6.78 bc	30.89 c	12.81 b	5.06 a	33.46 c

K	0.126 ab	31.24 a	0.78 a	7.13 a	80.67 a	13.53 a	3.58 a	36.36 b
Mg	0.126 ab	30.81 a	0.77 a	6.68 bc	40.54 b	12.6 bc	4.86 a	33.52 c
Zn	0.131 a	32.11 a	0.67 a	6.7 bc	35.26 bc	12.34 bc	4.30 a	40.17 a

*Valores con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo a la Prueba de Rangos Múltiples de Duncan ($P>0.05$).

Tabla 7. Contenido de nitrógeno y proteína cruda total en semillas de frijol caupí cv. vaquita.

Tratamiento	N	Proteína cruda total*
	ppm	%
Testigo	3.82	20.8
Ca	4.13	22.5
Cu	4.13	22.5
K	4.03	21.9
Mg	4.01	21.8
Zn	4.15	22.6

*De acuerdo con el factor de 5.45 para convertir el contenido de nitrógeno en proteína cruda de *V. unguiculata* (L.) (Muranaka *et al.*, 2016)

La respuesta espectral de los granos de frijol mediante la construcción de las firmas y el uso de índices espectrales, analizando aspectos fisiológicos y de la estructura de las hojas. La región del espectro visible y el infrarrojo cercano permitieron la descripción del contenido de pigmentos fotosintéticos (Figuras 2-8).

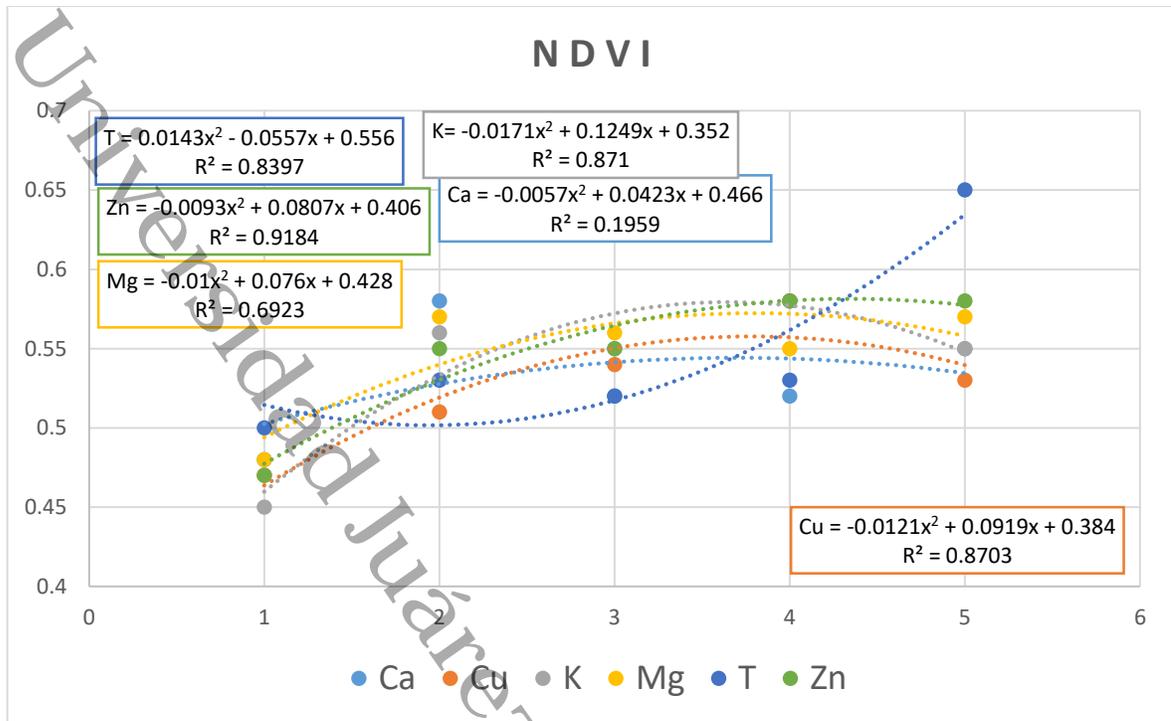


Figura 2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): Los valores obtenidos oscilaron entre 0.45 y 0.65, siendo el tratamiento de K el que obtuvo el valor más bajo y el testigo el valor más alto. Los tratamientos de fosfitos al tener un valor menor del NDVI, muestran menos signos de senescencia, esta estimación indica mayor calidad en la estructura foliar en las plantas que se les aplicó algún tratamiento de fosfito, lo cual conlleva una mayor actividad fotosintética, a comparación con los niveles encontrados en las plantas testigo (Zuzulova & Vido, 2018).

Con esto, se logra determinar la vigorosidad de las plantas relacionando la actividad fotosintética y la disposición de la estructura foliar de estas. De esta forma, se obtienen valores de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético (Diaz *et al.*, 2015).

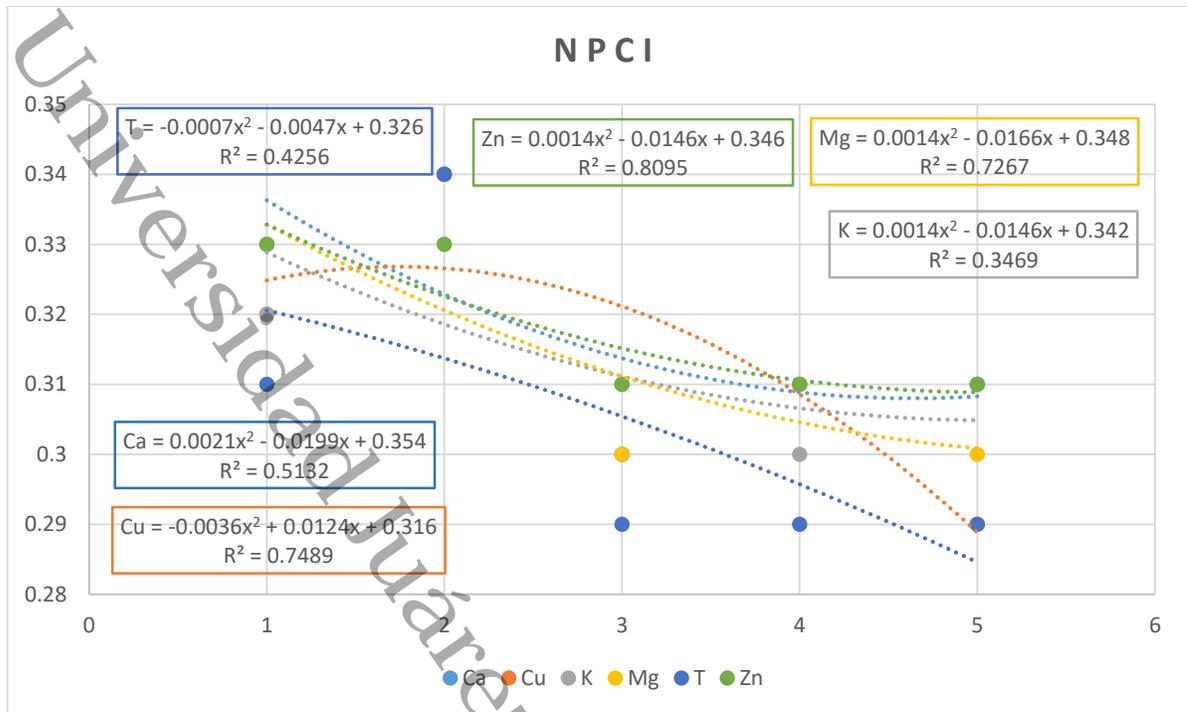


Figura 3. Índice Normalizado de Proporción de Pigmento a Clorofila a (NPCI).

Índice Normalizado de Pigmento total a Clorofila (NPCI): Permite obtener información de la senescencia de planta, relacionando el contenido de carotenoides totales y la clorofila *a* (Peñuelas *et al.*, 1995). Según Reynolds *et al.* (2001) este índice informa sobre el estado de desarrollo de las plantas. Los valores encontrados oscilaron entre 0.29 y 0.34, presentando mayor valor promedio los tratamientos de fosfitos de Zn, K y Ca, lo que indica una mayor estimulación en la producción de carotenoides que de clorofila (Barnes, 1992).

Con los datos obtenidos se puede evaluar la absorción de nutrientes, con lo que se puede hacer planes de fertilización, así como obtener una predicción del rendimiento (Hermanns *et al.*, 2020). Por lo tanto, el valor de este índice estaría indicando que los tratamientos de Zn, K y Ca se encuentran en un estado de desarrollo avanzado en contraste con los demás tratamientos.

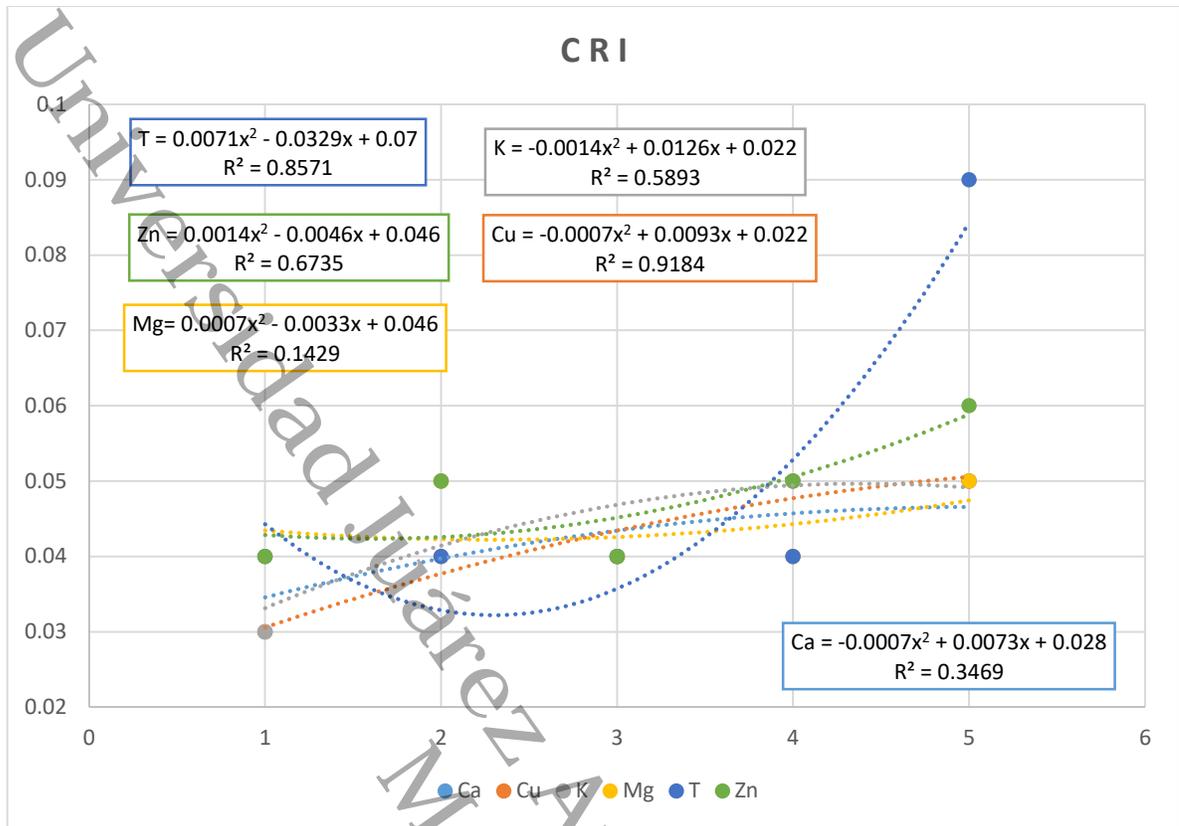


Figura 4. Índice de Reflectancia de Carotenoides (CRI).

Índice de Reflectancia de Carotenoides (CRI): Los valores obtenidos oscilaron entre 0.03 y 0.09, los tratamientos de Ca, Cu y K obtuvieron los valores más bajos y el testigo el valor más alto.

Kulmann *et al.*, (2023) relaciona la presencia de compuestos fosforados en el suelo con una mejor absorción de nutrientes por parte de las raíces, elevando en planta el contenido de carotenoides que regulan los procesos de absorción de la luz en las plantas, así como en la protección de las plantas contra los efectos nocivos de demasiada luz, por medio de este índice se puede monitorear el debilitamiento de la vegetación, por lo que este índice es una medida de vegetación estresada (Gitelson, 2002).

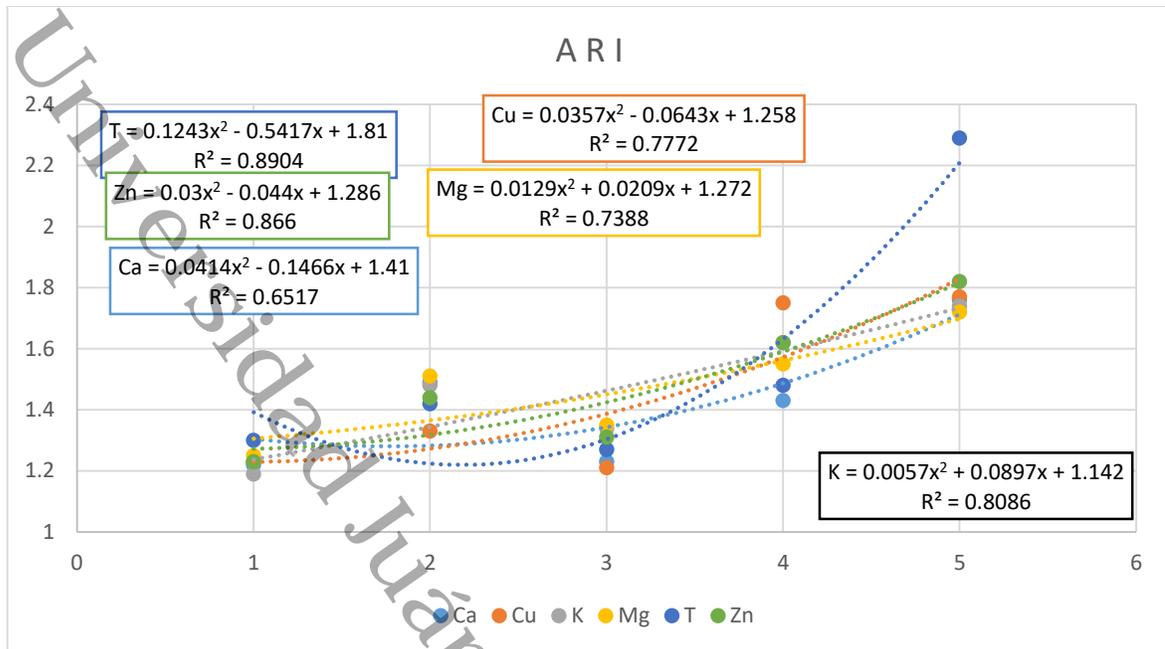


Figura 5. Índice de Reflectancia de Antocianinas (ARI).

Índice de Reflectancia de Antocianinas (ARI) (Figura 5): Los resultados obtenidos indican una diferencia en el contenido de antocianinas en las plantas tratadas con fosfitos, a diferencia del testigo el cual obtuvo el menor valor de contenido de antocianinas, con respecto a los demás tratamientos. Las antocianinas, poseen diferentes funciones en la planta como la protección de la planta contra los efectos de la radiación ultravioleta y contra la contaminación viral y microbiana (Garzón, 2008), por lo tal es posible detectar estrés en vegetación a través de contenido de antocianina en la planta. En algunas especies de plantas, la exposición in vitro a metales esenciales (Cu, Zn y Mn) y no esenciales (Pb y Hg) estimuló la síntesis de antocianinas (Baek et al. 2012). La aplicación de compuestos que incluyen metales pesados (cobre, zinc, hierro, níquel, cobalto), pueden causar cambios en el metabolismo y así modificar la concentración de antocianinas (Xing et al., 2010), lo cual corrobora porque existe una mayor concentración de antocianinas conforme el compuesto metálico del tratamiento se va acumulando en las plantas de frijol.

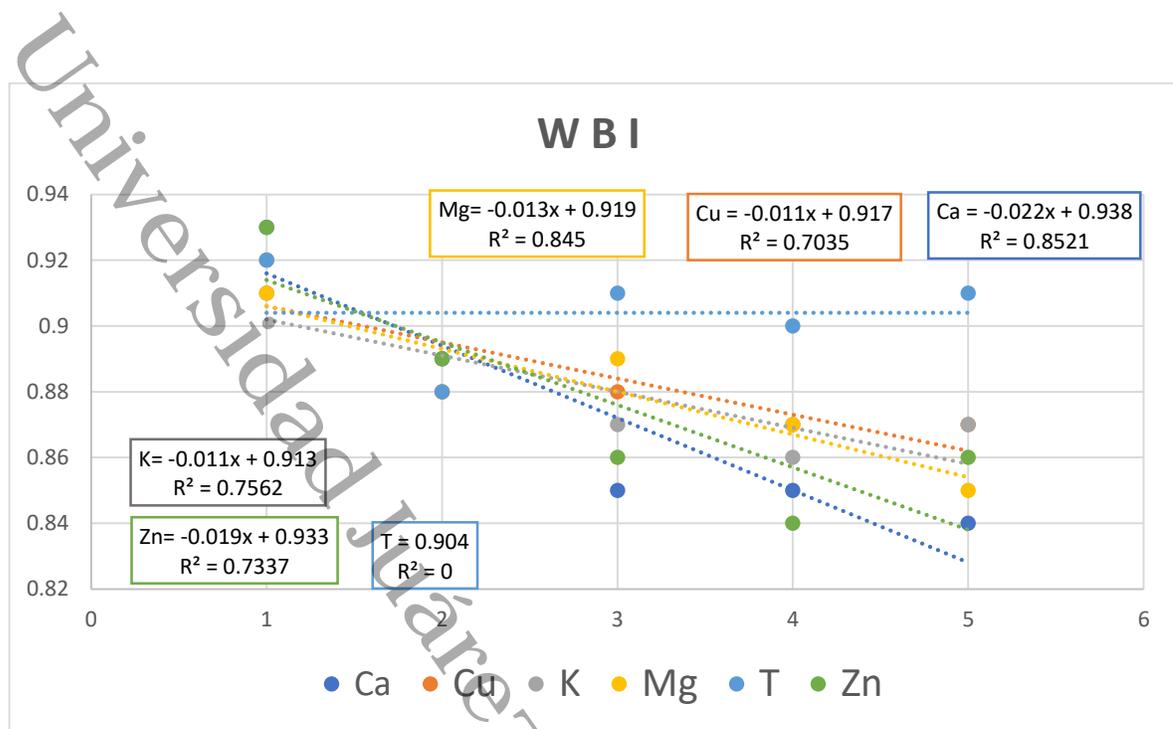


Figura 6. Índice de Ancho de Banda (WBI).

Índice ancho de banda (WBI): Los valores oscilaron entre 0.84 y 0.93, siendo los tratamientos de Ca, Mg y Zn los tratamientos que presentaron una mayor actividad en las bandas del espectro que toma el índice, lo que se traduce en una mayor capacidad de la planta para el transporte del recurso hídrico, similar a lo documentado por El-Hendawy *et al.*, en 2015, reportando valores entre 0.45 y 0.99 en su estudio con *triticum spp* bajo condiciones de sequía. Estos valores son una medida de reflectancia que es sensible a los cambios en el estado del agua del dosel (Claudio *et al.*, 2006). Se considera que a medida que el contenido de agua de los doseles de vegetación aumenta, también lo hace la fuerza de absorción. Al respecto, Claudio *et al.*, (2006) consideran que las respuestas particulares de la relación NDVI-WBI pueden proporcionar indicadores útiles sobre las diferencias estructurales y fisiológicas y, de una manera sutil pero potencialmente de gran alcance, identificar tipos de vegetación y respuestas a la sequía funcionalmente distintas.

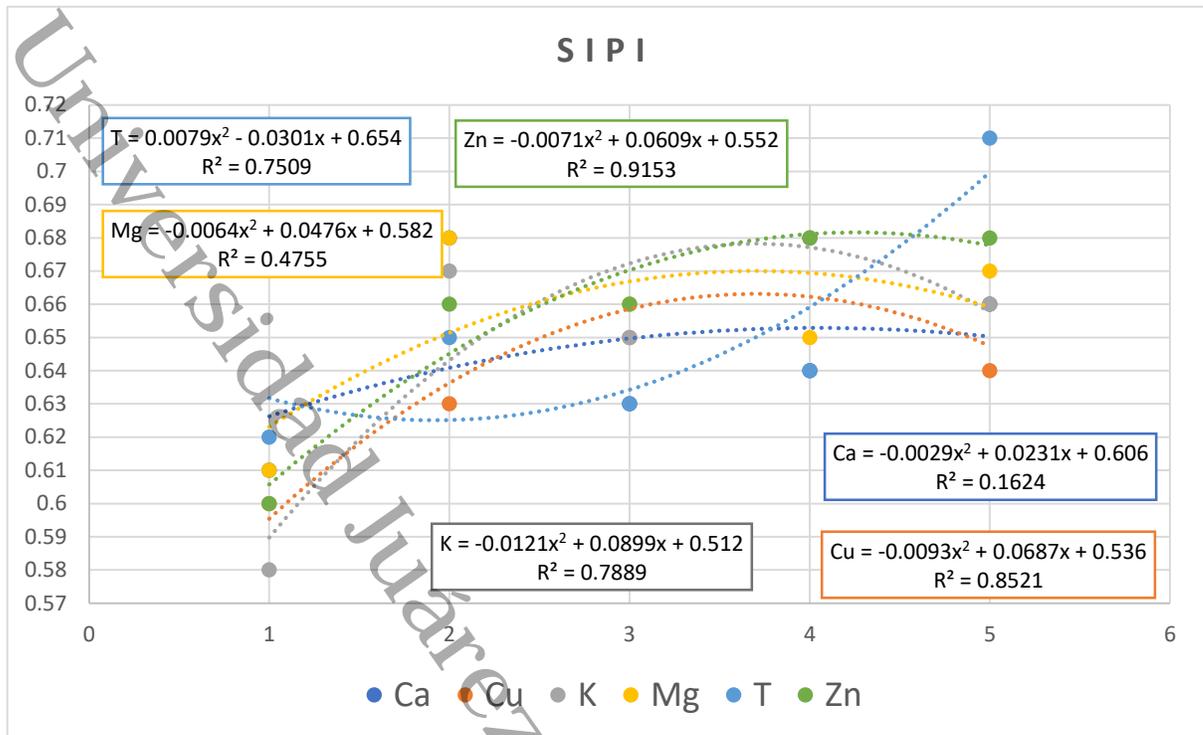


Figura 7. Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura (SIPI).

Índice de Pigmentación Estructural Independiente (SIPI): Los valores obtenidos se correlacionan con la relación carotenoides/clorofila a. También es útil para evaluar cambios en la pigmentación (Peñuelas et al. 1995). Además de que se correlaciona con el contenido relativo de agua, que indica un posible aumento progresivo de la relación entre carotenoides y clorofila, probablemente debido a la degradación de la clorofila durante el proceso de desecación (Young et al., 1990). Estos valores oscilaron entre 0.58 y 0.71, siendo los tratamientos de fosfitos, particularmente el de K, el cual obtuvo el valor más bajo, el testigo, a su vez, el valor más alto. Croft *et al.* 2014, reporta valores entre 0.37 y 0.77 en su estudio sobre determinación de clorofila sobre estructura foliar. Lo anterior indica que con los tratamientos de fosfito se logra, en una etapa más temprana, una mayor producción de carotenoides que de clorofila.

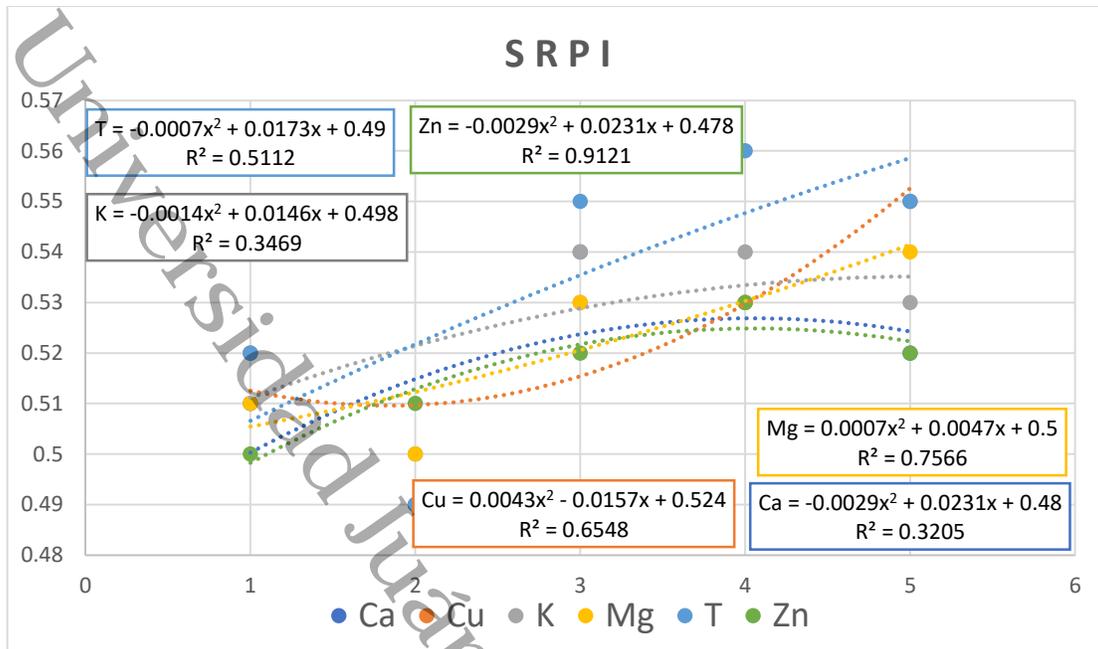


Figura 8. Índice De Pigmento De Proporción Simple (SRPI).

Índice De Pigmento De Proporción Simple (SRPI): Los valores obtenidos para este índice oscilaron entre 0.49 y 0.55, Bannari & Stenz, 2009 reportaron valores entre .20 y .50 en su estudio sobre índices de clorofila. En este caso en particular, no hubo diferencias en los parámetros obtenidos en las bandas espectrales de 430 nm y 680 nm entre los diferentes tratamientos evaluados. Lo que indica que este es un índice no reporta diferencias entre las bandas azules y rojas para evaluar la proporción de pigmentos totales en relación a la clorofila a (Peñuelas *et al.*, 1995).

8. Conclusiones

De acuerdo con los resultados los tratamientos de fosfitos, estimularon las respuestas fisiológicas, que no solo reflejaron en una mayor actividad fotosintética, sino que se tuvieron un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, esto determinado con base en los resultados obtenidos en el índice WBI, con el cual se logró determinar un estímulo con efecto en un desarrollo temprano del cultivo, así como una mayor longitud en semilla, incrementando así el rendimiento a diferencia del testigo.

La adición de fosfito de Zn, incrementó el rendimiento, número de vainas y número de granos por vaina en 44.9, 27 y 2.4 %, así como el contenido de N, P y Zn en el grano en 8.6, 11 y 14 %, respectivamente. La adición de fosfito de K, incrementó la longitud en grano un 5.5 %, así como un incremento en contenido mineral de Fe, Mg y Mn en 131, 10.2, 6.2 %, respectivamente. Los tratamientos de fosfito, estimulan la producción de carotenos, antocianinas y mejoraron el aprovechamiento de los recursos hídricos, con lo cual se obtuvo mayor medida en el largo de vaina y semilla, lo que se refleja en mayor peso de grano, mejorando el rendimiento, siendo el tratamiento de fosfito de K el que obtuvo mayor largo de semilla y el tratamiento de fosfito de Ca destacando en largo de vaina.

9. Literatura Citada

- Alsina I., Duma M., Dubova L., Senberga A., and Dagens S. (2016). Comparison of different chlorophylls determination methods for leafy vegetables. *Agronomy research*, 14(2): 309-316.
- Andersen P. (2012). Challenges for under-utilized crops illustrated by ricebean (*Vigna umbellata*) in India and Nepal. *International Journal Agriculture Sustain*, 10:164–174.
- Arunava P., Somnath R., Salej S., Banshanlang I., Amrita B., Sanjay G., Dinesh C. (2019). Rice bean: a lesser known pulse with well-recognized potential, *Planta* 250:873–890.
- AOCC. (2018). African orphan crops consortium: healthy Africa through nutritious, diverse and local food crops. <http://africanorphancrops.org/> - Accesado enero 2019
- Assefa K., Yu J. K., Zeid M., Belay G., Tefera H., Sorrells M. E. (2011). Breeding tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) trotter]: conventional and molecular approaches. *Plant Breed*, 130(1):1–9.
- Azcón-Bieto, J., Talón, M. (2000). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. McGrawHill-interamericana, Madrid.
- Baek, S. A., Han, T., Ahn, S. K., Kang, H., Cho, M. R., Lee, S. C., & Im, K. H. (2012). Effects of heavy metals on plant growths and pigment contents in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Pathology Journal*, 28(4), 446-452. doi: 10.5423/PPJ.NT.01.2012.0006
- Bajaj M. (2014). Nutrients and antinutrients in rice bean (*Vigna umbellata*) varieties as effected by soaking and pressure cooking. *Asian Journal Dairy Food Res*, 33:71–74.

- Bannari A., Staenz K. (2009). Soil Backgrounds Impact Analysis on Chlorophyll Indices Using Field, Airborne and Satellite Hyperspectral Data, Geoscience and Remote Sensing, Pei-Gee Peter Ho (Ed.), ISBN: 978-953-307-003-2.
- Batista-Sánchez D., Nieto-Garibay A., Alcaraz-Meléndez L., Troyo-Diéguéz E., Hernández-Montiel L., Ojeda-Silvera C.M., Murillo-Amador B. (2015). Uso del FitoMas-E® como atenuante del estrés salino (NaCl) durante la emergencia y crecimiento inicial de (*Ocimum basilicum* L.). Revista Electrónica Nova scientia,7(15).
- Barnes, J.D. (1992). A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher ciency plants. Environmental Experimental Botany. 2, pp. 85-100.
- Bear R., Rintoul D., Snyder B., Smith-Caldas M., Herren C., Horne E. (2018). Photosynthesis, Global Climate Change, and Food Production. Principle of Biology. OpenStax CNX; Rice University; 6100 Main St., Houston, TX., EEUU.
- Bepary R. H., Wadiker D. D., Neog S. B., Patki P. E. (2017). Studies on physico-chemical and cooking characteristics of rice bean varieties grown in NE region of India. J Food Sci Technol, 54:973–986.
- Bertsch F., Ramírez F., Henríquez C. (2009). Evaluación del fosfito como fuente fertilizante de fósforo vía radical y foliar. Agronomía Costarricense, 33(2):249-265.
- Bisht I. S., Singh M. (2013). Asian Vigna. In: Singh (eds) Genetic and genomic resources of grain legume improvement. Elsevier, Amsterdam, pp. 237–267.
- Broge N., Leblanc E. (2000). Comparing Prediction Power and Stability of Broadband and Hyperspectral Vegetation Indices for Estimation of Green Leaf Area and Canopy Chlorophyll Density. Remote Sensing of Environment, 76:156-172.

- Bort J., Casadesus J., Nachit M., Araus J. (2005). Factors affecting the grain yield prediction attributes of spectral reflectance indices in durum wheat: growing conditions, genotype variability and date of measurement. *Int. Journal Remote Sensing*, 26(11): 2337-2358.
- Carter G. A. (1994). Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing*. 15:697-703.
- Casierra-Posada F., Ávila-León O., Riascos-Ortíz D. (2012). Cambios diarios del contenido de pigmentos fotosintéticos en hojas de caléndula bajo sol y sombra. *Temas Agrarios*, 17(1):60 - 71.
- Cerisola C., García M., Filgueira R. (2005). Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Calles 60 y 119, CC 31 - (1900) La Plata-Buenos Aires, Argentina.
- Chandel K., Joshi B., Arora R., Pant K. (1978). Rice bean—a new pulse with high potential. *Indian Farming*, 18:19–22.
- Chivenge P., Mabhaudhi T., Modi A. T., Mafongoya P. (2015). The potential role of neglected and underutilised crop species as future crops under water scarce conditions in Sub-Saharan Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6):5685-5711.
- Clark R., Zeto S. (2000). Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition*, 23(7):867-902.
- Claudio H.C., Cheng Y., Fuentes D.A., Gamon J. A., Luo H., Oechel W., Qiu H-L., Rahman A.F., Sims D.A. (2006). Monitoring drought effects on vegetation water content and

- fluxes in chaparral with the 970 nm water band index. *Remote Sensorial Environment*, 103:304-311.
- Dawson I., Jaenicke H. (2006). Underutilised plant species: the role of biotechnology. International Centre for Underutilized Crops, Position Paper No. 1, Colombo.
- Diaz Garcia-Cervigón, Juan Jose. (2015). Universidad Complutense De Madrid. Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión.
- Duke J. A. (1981). Handbook of legumes of world economic importance. Plenum Press, New York, pp. 345.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1982). Legumes in human nutrition. FAO, Rome.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). Construyendo una visión común para la agricultura y alimentación sostenibles. ROMA.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). (2019). <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> - Accesado Enero 2020.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2020). Perspectivas 2020. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Enero, 2020. México.
- Fortes D., Herrera R. S., González S., García M., Romero A., Cruz A. M. (2010). Comportamiento de los pigmentos fotosintéticos, según la edad de rebrote después del pastoreo de *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-115 en la estación lluviosa. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 44(4):427-431.

- García X., García E., Rascón Q., Herrera L., Aguado, G.A. (2005). Chlorophyll accumulation is enhanced by osmotic stress in *graminaceous chlorophyllic* cells. *Journal Plant Physiology*, 162:650.
- Garzón G. A. (2008). Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos. *ACTA BIOL. COLOMB.*, 13(3):27-36.
- Gitelson A., Merzlyak M. (1994). Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus Hippocastanum* L. and *Acer Platanoides* L. leaves. *Journal of Plant Physiology*, 143:286-292.
- Gitelson A., Merzlyak, M. (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves, *International Journal of Remote Sensing*, 18(12):2691-2697.
- Gitelson, A. (2002). Evaluación del contenido de carotenoides en hojas de plantas con espectroscopía de reflectancia. *Photochemistry and Photobiology*, pp:272-281.
- Gitelson, A., M. Merzlyak, and O. Chivkunova. (2001). "Optical Properties and Nondestructive Estimation of Anthocyanin Content in Plant Leaves." *Photochemistry and Photobiology*, 71:38-45.
- Goodwin T. W. (1976). Distribution of carotenoids. *Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments* (T.W. Goodwin ed.), ed. Academic Press. London, 1:225-261.
- Gopinathan M. C., Babu C. R., Chatterjee S. R., Abrol Y. P. (1987). Nutritional potential of *Vigna minima* (Roxb.) Ohwi and Ohashi: I seed protein content and amino acid composition. *Plant Food Human Nutrition* 36:345–355.
- Hermanns A., Zhou X., Xu Q., Tadmor Y. (2020). Carotenoid Pigment Accumulation in Horticultural Plants. *Horticultural Plant Journal*. Volume 6, Issue 6, November 2020, 6:343-360.

- Jayathilakea C., Visvanathana R., Deena A., Bangamuwagea R., Jayawardanab B. C., Nammic C., Liyanagea R. (2018). Nutritional and Health Properties of Cowpea; doi: 10.1002/jsfa.9074
- Kabas O., Yilmaz E., Ozmerzi A., Akinci I. (2007). Some physical and nutritional properties of cowpea seed (*Vigna sinensis* L.). *Journal of Food Engineering*, 79:1405-1409.
- Kammerich J., Beckmann S., Scharafat I., Ludwig-Müller J. (2014). Suppression of the clubroot pathogen *Plasmodiophora brassicae* by plant growth promoting formulations in roots of two *Brassica* species. *Plant Pathology* 63:846- 857.
- Katoch R. (2013). Nutritional potential of rice bean (*Vigna umbellata*): an underutilized legume. *Journal Food Science*, 78:C8–C16.
- Katoch R., Singh S. K., Thakur N., Dutt S., Yadav S. K., Shukle R. (2014). Cloning, characterization, expression analysis and inhibition studies of a novel gene encoding Bowman-type protease inhibitor from rice bean. *Gene*, 546:342–351.
- Kaur D., Kapoor A. C. (1992). Nutrient composition and antinutritional factors of rice bean (*Vigna umbellata*). *Food Chemistry*, 43:119–124.
- Kjeldahl J. (1883). New Method for the Determination of Nitrogen. *Chemistry News*. 1883. 48(1240):101-2.
- Krauß N. (2003). Mechanisms for photosystems I and II. *Current Opinion in Chemical Biology*, 7(5):540-550.
- Kulmann M., Aguilar M., Tassinari A. Tabaldi L. (2023). Effects of increasing soil phosphorus and association with ectomycorrhizal fungi (*Pisolithus microcarpus*) on morphological, nutritional, biochemical, and physiological parameters of *Pinus taeda* L. *Forest Ecology and Management*. Volume 544, 15 September 2023, 121207.

- Li X., Siddique K. (2018). Future smart food rediscovering hidden treasures of neglected and underutilized species for zero hunger in Asia. Food and Agriculture Organization of the United Nations Bangkok, Rome.
- Lobato M. C., Olivieri F. P., González A. E., Wolski E. A., Daleo G. R., Caldiz D. O., Andreu A. B. (2011). Phosphite compounds reduce disease severity in potato seed tubers and foliage. *European Journal Plant Pathology*, 122:349-358.
- Lovatt C. J. (1996). Formulation of phosphorus fertilizer for plants. US Patent No. 5514200.
- Lovatt C. J., Mikkelsen R. L. (2006). Phosphite fertilizers: What are they? Can you use them? What can they do?. *Better Crops*, 90:11-13.
- MacIntire W. H., Winterberg S. H., Hardin L. J., Sterger A. J., Clements L. B. (1953). Fertilizer Evaluation of Certain Phosphorus, Phosphorous, and Phosphoric Materials by Means of Pot Cultures. *Agronomy Journal*, 42:543-549.
- Malhotra S., Malik D., Singh K. (1988). Proximate composition and antinutritional factors in rice bean (*Vigna umbellata*). *Plant Food Human Nutrition.*, 38:75-81.
- Mcdonald A., B. Grant C. Plaxton W. (2001). Phosphite (phosphorous acid): its relevance in the environment and agriculture and influence on plant phosphate starvation response. *Journal of Plant Nutrition*, 24(10):1505- 1519.
- Mohan V. R., Janardhanan K. (1994). Chemical composition and nutritional evaluation of raw seeds of six ricebean varieties. *Journal Indian Botanical Society.*, 73:259-263.
- Monge E., Val J., Heras L. (1984). Pigments identification in higher plants by reversed phase high performance liquid chromatography. *AN. AULA DEI.*, 17(1-2):33-43.
- Morales-Morales A., Adueza R., Marquez-Quiroz C., Benavides A., Tun J., Gonzales A., Alvarado C. (2019). Caracterización morfológica de semillas de frijol caupí (*Vigna*

- unguiculata L. Walp) de la Península de Yucatán. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios., 6(18):463-475.
- Muranaka, S.; Shono, M.; Myoda, T.; Takeuchi, J.; Franco, J.; Nakazawa, Y.; Boukar, O. and Takagi, H. (2016). Genetic diversity of physical, nutritional, and functional properties of cowpea grain and relationships among the traits. Plant Genetic Resources, 14(1):67-76.
- Ogle W., Witcher W., Barnett O.W. (1987). Descriptors for the southern peas of South Carolina. Bulletin/South Carolina Agricultural Experiment Station. USA., 659:23.
- Oka Y., Tkachi N., Mor M. (2007). Phosphite inhibits development of the nematodes *Heterodera avenae* and *Meloidogyne marylandi* in cereals. Phytopathology, 97:396-404.
- Padulosi S. (2017). Bring NUS back on the table. GREAT Insights 6(4):21–22.
- Quintero-Vargas C., Castaño-Zapata J. (2012). Evaluación de inductores de resistencia para el manejo de nematodos fitoparásitos en plántulas de plátano. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 36:575-586.
- Panorama Agroalimentario 2016. (2016). Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Frijol 2016. México.
- Panorama Agroalimentario 2020. (2020). Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Frijol 2020. México.
- Peñuelas J., Gamon J., Fredeen A., Merino J., Field, C. (1994). Reflectance index associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves. Remote Sensing of Environment, 48:135-146.

- Peñuelas J., Baret F., Filella I. (1995). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica* 1995, 31:221–230.
- Peñuelas J., Piñol J., Ogaya R. and Filella I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18(13):2869-2875.
- Reynolds M.P., Ortiz-Monasterio J. I., McNab A. (2001). *Application of Physiology in Wheat Breeding*. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- Rhone-Poulenc. (1977). First registered in 1977 in France. Patents FR 2254276.; U.S. Pat. Nos. 4075,324. (1985). Manufacturers: Cheminova, Dacheng, Isochem, Jiahua, Lanxi, Limin, Tide.
- Rodríguez A. (2019). Association between foliar phenology, stem growth and foliar spectral patterns in ten Mediterranean vegetation species. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. México.
- Rodriguez M. S., Mendoza E. M. (1991). Nutritional assessment of seed protein in ricebean [*Vigna umbellata (Thunb) Ohwi and Ohashi*]. *Plant Food Human Nutrition.*, 41:1-9.
- Rouse, J.W., Jr., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93p. (NTIS No. E73-106393).
- Saikia P., Sarkar C. R., Borua I. (1999). Chemical composition, antinutritional factors and effect of cooking on nutritional quality of rice bean [*Vigna umbellata (Thunb) Ohwi and Ohashi*]. *FOOD CHEM*, 67:347–352.

- Saindrenan P., Barchietto T., Avelino j., Bompeix G. (1988). Effects of phosphite on phytoalexin accumulation in leaves of cowpea infected with *Phytophthora cryptogea*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 32:425-435.
- Samreen, T., Humaira, Shah, H. U., Ullah, S., & Javid, M. (2017). Zinc effect on growth rate, chlorophyll, protein and mineral contents of hydroponically grown mungbeans plant (*Vigna radiata*). *Arabian Journal of Chemistry*, 10:1802-1807. doi:10.1016/j.arabjc.2013.07.005
- Sarma B. K., Singh M., Gupta H. S., Singh G., Srivastava L. S. (1995). Studies in rice bean germplasm: research bulletin No. 34. ICAR Research Complex for NEH Region, Barapani Meghalaya, India, pp. 35.
- Sarma B. K., Singh M., Pattanayak A. (1991). Evaluation of ricebean (*Vigna umbellata*) germplasm in upland terraces of Meghalaya. *INDIAN J AGRIL SCI.*, 61:182-184.
- Smillie R., Grant B. R., Guest D. (1989). The mode of action of phosphite: Evidence for both direct and indirect modes of action on three *Phytophthora* spp. in plants. *Phytopathology*, 79:921-926.
- Secretaria de Economía. (2012). Dirección general de Industrias Básicas; Análisis de la cadena de valor del frijol. México.
- Sims D., Gamon J. (2002). Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures, and Developmental Stages. *Remote Sensing of Environment*, 81:337-354.
- Tadele Z. (2019). Challenges of food security for orphan crops. *Encycl Food Secur Sustain*, 1:403–408.

- Tadele Z. (2019). Orphan crops: their importance and the urgency of improvement. *Planta*, 250:677–694.
- Tennessee Valley Authority (TVA) (1948). Development of Processes and Equipment for Production of Phosphoric Acid. Tennessee Valley Authority. Division of Chemical Engineering.
- Thao H. T. B., Yamakawa T. (2009). Phosphite (phosphorous acid): fungicide, fertilizer or bio-stimulator?. *Soil Science Plant Nutrition*, 55:228-234.
- Timko M.P., Singh B.B. (2008). Cowpea a multifunctional legume. In: More PM, Ming R (Eds.) *Genomics of tropical crops plants*. Springer. New York, USA, pp:227-258.
- Upadhayay M. P. (2010). Status of ricebean in Nepal. <http://www.ricebean.org/publication.htm>. Accessed 28 Aug 2018.
- Ustin S. L., Smith M. O., Jacquemoud S., Verstraete M. M., Govaerts, Y. (1999). *GeoBotany: Vegetation mapping for Earth sciences. Remote Sensing for the Earth Sciences, Manual of Remote Sensing*, Edited by Andrew N. Rencz, 3(01):189-248.
- Veobides A. H., Guridi I. F., Vázquez P. V. (2018). las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. Ministerio de Educación Superior. Cuba. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. *Cultivos Tropicales*, 39(4):102-109.
- Viguera, B., Martínez-Rodríguez, M.R., Donatti, C., Harvey, C.A. y Alpizar, F. (2017). Impactos del cambio climático en la agricultura de Centroamérica, estrategias de mitigación y adaptación. *Materiales de fortalecimiento de capacidades técnicas del proyecto CASCADA (Conservación Internacional-CATIE)*. 47 páginas.

- Vogelmann J., Rock B., Moss, D. (1993). Red Edge Spectral Measurements from Sugar Maple Leaves." *International Journal of Remote Sensing*, 14:1563-1575.
- Vo-Thi H., Bompeix G., Ravise A. (1979). Role du tris-O-ethyle phosphonate d'aluminium dans la stimulation des reaction de defense des tissus de tomato contre le *Phytophthora capsici*; *Comptes Rendus Academie des Sciences, Paris*, 288:1171-1174.
- Xing, W., Huang, W., & Liu, G. (2010). Effect of excess iron and copper on physiology of aquatic plant *Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid. *Environmental Toxicology*, 25(2), 103-112. doi: 10.1002/tox.20480.
- Yakhin O. I., Lubyaynov A. A., Yakhin I. A., Brown P. H. (2017). Biostimulants in Plant Science: A Global Perspective. *Frontiers in Plant Science.*, 7:2049. doi: 10.3389/fpls.2016.02049.
- Yáñez J. M., Ayala T. F., Partida R. L., Velázquez A. T., Godoy A. T., Medina L. R. (2018). Efecto in vitro de fosfito de potasio sobre *Athelia rolfsii* y *Pythium aphanidermatum*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7). <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.286>
- Young A., Britton G. (1990). Carotenoids and stress. In: Alscher, R. G., Cumming, J. R. (eds.) *Stress responses in plants: adaptation and acclimation mechanisms*. Wiley Liss, Inc., New York, pp. 87-112.
- Zuzulova V., Vido J. (2018). Normalized difference vegetation index (NDVI) as a tool for the evaluation of agricultural drought. *Ecocycles*, Vol. 4, No. 1, pp. 83-87 (2018); DOI: 10.19040/ecocycles.v4i1.124

10.Anexos

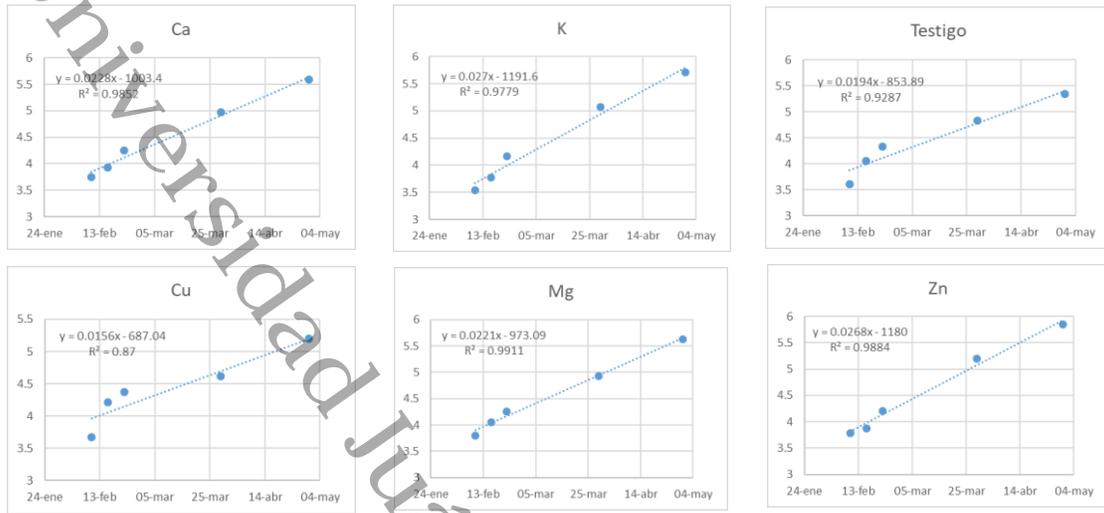


Figura 9. Tendencia lineal en crecimiento de tallo por tratamiento en función al tiempo.