



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**



Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la toxicidad por Al^{3+} y al uso de tecnologías agroecológicas en Villa Corzo, Chiapas

TESIS

**Que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA
TROPICAL**

Por

ROSA MARÍA MARTÍNEZ TAGUA L111030

Director de tesis

DR. FRANCISCO GUEVARA HERNÁNDEZ

Codirector de tesis

DR. LUIS ALFREDO RODRÍGUEZ LARRAMENDI

Villaflores, Chiapas, México,

Febrero 2021



Villaflores, Chiapas
09 de febrero de 2021
Oficio N° D/0033/2021

C. ROSA MARÍA MARTÍNEZ TAGUA
MAESTRANTE EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS CAMPUS V
P R E S E N T E.

En atención a que usted ha presentado los votos aprobatorios del Honorable Jurado, designado para su evaluación de posgrado, de la tesis titulada: **“Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la toxicidad por Al³⁺ y al uso de tecnologías agroecológicas en Villa Corzo, Chiapas”**, por este conducto le comunico que se le autoriza la impresión del documento, de acuerdo a los lineamientos vigentes de la Universidad.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”

M. C. CARLOS ALBERTO VELÁZQUEZ SANABRIA
ENCARGADO DE LA DIRECCIÓN

C. c. p. Archivo

CAVS*MARH.

Carretera Ocozacoautla-Villaflores Km. 84.5 C.P. 30470 Villaflores, Chiapas. Teléfono y Fax 01 (965) 65 2 14 77, 65 5 32 72
Correo electrónico: ip.agronomicas@gmail.com



Código: FO-113-09-05
Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Rosa María Martínez Tagua, Autor (a) de la tesis bajo el título de "Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la toxicidad por Al^{3+} y al uso de tecnologías agroecológicas en Villa Corzo, Chiapas", presentada y aprobada en el año 2021 como requisito para obtener el título o grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical, autorizo a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 23 días del mes de febrero del año 2021.

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por darme el don de la vida, haciendo posible lograr mis objetivos, porque me ha iluminado y ha estado siempre a mí a lado en cada momento.

A mis padres

Alfredo Martínez Pérez (†), porque sé, que siempre ha intercedido por mí desde donde él se encuentra y Flor de María Tagua Gutiérrez, por todo su amor, confianza, compañía y apoyo.

A mis hermanos

Alfredo (†), por estar espiritualmente conmigo. Hugo Gaudig y William, por todo el apoyo que me brindaron, principalmente en la ejecución del trabajo de investigación.

A mi abuelita

María Luteria Gutiérrez Hernández (†), por todo su amor, consejos, por creer y pedir a Dios por mí.

Institución y programa educativo

Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), Facultad de Ciencias Agronómicas y el programa de Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical (MCPAT), por abrir sus puertas y brindarnos la educación necesaria para lograr este objetivo.

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), sede Villa Corzo y las personas que lo conforman, gracias por recibirme y permitirme utilizar de sus instalaciones para la ejecución del trabajo de investigación.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme la beca y permitirme contribuir en el desarrollo científico y tecnológico de nuestro país.

Comité tutorial

Dr. Francisco Guevara Hernández (director), Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi (codirector), Dr. Deb Raj Aryal (asesor), Dr. Manuel Alejandro La O Arias (asesor), Franklin B. Martínez Aguilar (asesor), muchas gracias por todo el apoyo brindado en

mi desarrollo profesional y personal, gracias por la confianza, amistad y por compartir de sus experiencias y conocimientos.

Colaboradores

M.C. Julio César Gómez Castañeda, gracias por su confianza, por creer en mí, orientarme e impulsarme a seguir con los estudios de posgrados.

Jorge Luis Hernández Morales, a ti te agradezco por todo tu amor, apoyo, confianza y por tu valiosa compañía desde inicio a fin de esta maestría, principalmente en toda la ejecución, seguimiento y evaluación del proyecto de investigación.

Familias Martínez Aguilar, Martínez González, Cruz Tagua, Galdámez Tagua, León Cruz, Tagua Reyes, Contreras Tagua, Domínguez Cruz. Compañeros Emanuel Romero José, Emilio Herasto Aguilar Vázquez y César Yoshep Arroyo Aguilar, muchas gracias por estar cuando más necesité de ustedes, gracias por todo su apoyo y ser partícipes en los procesos del proyecto de investigación.

Es difícil poder expresar en tan breves palabras toda la gratitud que tengo hacia cada uno de ustedes.

¡Muchas gracias!



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL

Esta tesis titulada “**Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la toxicidad por Al^{3+} y al uso de tecnologías agroecológicas en Villa Corzo, Chiapas**”, forma parte del proyecto de investigación “Uso de microorganismos de montaña en el agroecosistema maíz (*Zea mays* L.) de la Región Frailesca, Chiapas” registrado en la Coordinación de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ciencias Agronómicas, financiado por Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del estado de Chiapas (ICTIECH), bajo la dirección del Dr. Francisco Guevara Hernández.

Se incluye en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento: Producción animal, ambiente e innovación local, del Cuerpo Académico Agroforestería Pecuaria.

Se incluye en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento: Manejo agroecológico de cultivos, del Programa de Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL

Esta tesis titulada "Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la toxicidad por Al^{3+} y al uso de tecnologías agroecológicas en Villa Corzo, Chiapas", fue realizada por la C. Rosa María Martínez Tagua, bajo la dirección y asesoría del Comité Tutorial indicado, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL.

COMITÉ TUTORIAL

DIRECTOR


DR. FRANCISCO GUEVARA HERNÁNDEZ

CODIRECTOR


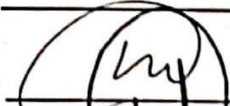


DR. LUIS ALFREDO RODRÍGUEZ LARRAMENDI (UNICACH)

ASESORES

DR. DEB RAJ ARYAL

DR. MANUEL ALEJANDRO LA O ARIAS

DR. FRANKLIN B. MARTÍNEZ AGUILAR



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA
TROPICAL**

Esta tesis titulada *Respuesta del maíz (Zea mays L.) a la toxicidad por Al³⁺ y al uso de tecnologías agroecológicas en Villa Corzo, Chiapas*, realizada por la Ing. Rosa María Martínez Tagua, ha sido aprobada por la Comisión Revisora indicada, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL.

COMISIÓN REVISORA

DR. FRANCISCO GUEVARA HERNÁNDEZ

DR. LUIS ALFREDO RODRÍGUEZ LARRAMENDI

DR. MANUEL ALEJANDRO LA O ARIAS

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivos específicos	16
1.2 Hipótesis.....	16
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
2.1 El maíz	17
2.2 El aluminio	19
2.2.1 El aluminio en el suelo	19
2.2.2 El aluminio en las plantas	21
2.3 Tecnologías agroecológicas	24
2.3.1 Microorganismos benéficos	24
2.3.1.1 Las bacterias	25
2.3.1.1.1 Mecanismos en el crecimiento vegetal.....	26
2.3.1.1.1.1 Fijación biológica de nitrógeno (FBN)	26
2.3.1.1.1.2 Solubilización de fosfatos.....	26
2.3.1.1.1.3 Producción de fitohormonas	27
2.3.1.1.1.3.1 Auxinas.....	27
2.3.1.1.1.3.2 Citocininas.	27
2.3.1.1.1.3.3 Giberelinas	28
2.3.1.1.1.3.4 Ácido abscísico	28
2.3.1.1.1.4 Controladores de estrés	29
2.3.1.2 Los hongos.....	29
2.3.1.2.1 Ectomicorrizas	30
2.3.1.2.2 Endomicorrizas	30
2.3.1.2.2.1 Orquideomicorrizas	30
2.3.1.2.2.2 Ericomicorrizas	31

2.3.1.2.2.3 Micorrizas arbusculares	31
2.3.1.2.3 Ectendomicorriza	32
2.3.2 Ácido salicílico	32
3. MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1 Ubicación del área de estudio	33
3.1.1 Características generales del área de estudio	33
3.2 Proceso metodológico	34
3.2.1 Fase I	34
3.2.1.1 Diseño experimental	34
3.2.1.2 Tratamiento de las semillas	34
3.2.1.2.1 Desinfección	34
3.2.1.2.2 Imbibición de las semillas en concentraciones de Al ³⁺	34
3.2.1.3 Establecimiento del experimento	35
3.2.1.4 Muestreo destructivo	35
3.2.1.5 Análisis estadístico	36
3.2.2 Fase II	36
3.2.2.1 Diseño experimental	36
3.2.2.2 Tratamiento de las semillas	36
3.2.2.2.1 Desinfección	36
3.2.2.2.2 Imbibición de las semillas en concentraciones de Al ³⁺	37
3.2.2.2.3 Imbibición de las semillas en ácido salicílico	37
3.2.2.2.4 Inoculación con microorganismo benéficos.....	37
3.2.2.3 Establecimiento del experimento	37
3.2.2.4 Muestreo destructivo	38
3.2.2.5 Análisis estadístico	39
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	40
4.1 Fase I	40
4.2 Fase II	46
5. CONCLUSIONES	49
6. LITERATURA CITADA.....	50
7. ANEXOS.....	58

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Concentraciones de Al^{3+} correspondiente a cada genotipo de maíz.	34
Cuadro 2. Arreglos de los tratamientos correspondientes a cada genotipo de maíz.	36
Cuadro 3. Cálculos para la preparación de la solución desinfectante con Hipoclorito de Sodio al 0.5 %	58
Cuadro 4. Cálculos para la preparación de la solución madre a 100 ppm de Al^{3+}	58
Cuadro 5. Cálculos para la preparación de las diluciones de Al^{3+} correspondiente a cada tratamiento.....	58
Cuadro 6. Propiedades físicas y químicas del suelo	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución porcentual de las formas de aluminio en una solución de acuerdo con el pH.	21
Figura 2. Localización del área de estudio	33
Figura 3. Efecto del Al ³⁺ en N° de hojas (A), área foliar (B), contenido de clorofila (C) y longitud de la raíz (D) en plántulas de maíz Tuxpeño. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05).....	40
Figura 4. Efecto del Al ³⁺ en N° de hojas (A), área foliar (B), contenido de clorofila (C) y longitud de la raíz (D) en plántulas de maíz P4082W. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05).....	41
Figura 5. Efecto del Al ³⁺ en la acumulación de materia seca aérea (A), materia seca de la raíz (B) y materia seca de la planta (C) en plántulas de maíz Tuxpeño. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05).	41
Figura 6. Efecto del Al ³⁺ en la acumulación de materia seca aérea (A), materia seca de la raíz (B) y materia seca de la planta (C) en plántulas de maíz P4082W. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05).	42
Figura 7. Efecto del Al ³⁺ en la fracción masa foliar (A), fracción masa de la raíz (B), longitud específica de la raíz (C) y razón masa de raíz/foliar (D) en plántulas de maíz Tuxpeño. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05).	43
Figura 8. Efecto del Al ³⁺ en la fracción masa foliar (A), fracción masa de la raíz (B), longitud específica de la raíz (C) y razón masa de raíz/foliar (D) en plántulas de maíz P4082W. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05).	43
Figura 9. Efecto del Al ³⁺ en la fluorescencia de la clorofila máxima (A), fluorescencia mínima (B) eficiencia máxima (C) y eficiencia mínima (D) en plántulas de maíz Tuxpeño. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05).	44
Figura 10. Efecto del Al ³⁺ en la fluorescencia de la clorofila máxima (A), fluorescencia mínima (B) eficiencia máxima (C) y eficiencia mínima (D) en plántulas de maíz P4082W. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05).....	45
Figura 11. Distribución de las variables y tratamientos en el plano formado por los componentes I y II. Experimento con maíz P4082W a diversas tecnologías agroecológicas y concentraciones de Al ³⁺	46

Figura 12. Distribución de las variables y tratamientos en el plano formado por los componentes I y II. Experimento con maíz Tuxpeño a diversas tecnologías agroecológicas y concentraciones de Al^{3+}47

RESUMEN

El maíz es uno de los cereales más cultivados en el mundo, sin embargo, para su producción presenta algunas limitantes. Una de ellas, es la toxicidad provocada por el Aluminio. En ese sentido, existen tecnologías agroecológicas que podrían mitigar los efectos que el Al^{3+} provoca. La presente investigación evaluó la respuesta del maíz Tuxpeño a la toxicidad causada por Al^{3+} y al uso de tecnologías agroecológicas. Las semillas se embebieron a 5 ppm de Al^{3+} , concentración tóxica determinada en investigaciones previas, posteriormente se embebieron con ácido salicílico e inocularon con Micorrizas y Azospirillum. Para el control del gusano cogollero, se aplicó Palgus™ y para la fertilización se aplicó 17-17-17 de forma enterrada. El muestreo destructivo se realizó a los 82 dds, las variables fueron: Altura de planta (AP), Fluorescencia de la clorofila (FC), Número de hojas (NH), Contenido de clorofila (CC), Materia Seca del Tallo, Hoja y Raíz (MST, MSH, MSR), relación materia seca de la raíz/foliar (R/F), fracción de la materia seca de la raíz (FMR) y foliar (FMF). El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo bifactorial. Se realizó un análisis factorial de componentes principales mediante análisis multivariado en STATISTICA versión 8.0. El análisis factorial de componentes principales permitió reducir la dimensionalidad de las variables a dos componentes que extrajeron el 68.4 y 71.9% de la varianza total. El componente I estuvo correlacionado con el CC, PSH, PST y PSP y el componente II con AP, Fo, FV/Fo, PSR y R/F. Los microorganismos benéficos presentan tendencias positivas para las variables AP, FC, MSR, R/F y FMR y en concentración de 5 ppm de Al^{3+} + ácido salicílico, se observan tendencias positivas en las variables de FMF y FC mínima. Las plántulas del genotipo local son más susceptibles a los efectos del Al^{3+} que las del genotipo híbrido. El Al^{3+} presenta toxicidad por encima de 5 ppm para el genotipo Tuxpeño y de 6 ppm para el genotipo P4082W. Reducir la dimensionalidad de las variables permite concluir que, las interacciones de las tecnologías agroecológicas tienen efectos sinérgicos para el crecimiento y desarrollo de las plantas mitigando los efectos del estrés causado por el Al^{3+} para ambos genotipos en condiciones semi controladas.

Palabras claves: Micorrizas, Azospirillum, ácido salicílico

ABSTRACT

Corn is one of the most cultivated cereals in the world, however, for its production it presents some limitations. One of them is the toxicity caused by Aluminum. In this sense, there are agroecological technologies that could mitigate the effects that Al^{3+} causes. The present investigation evaluated the response of Tuxpeño corn to the toxicity caused by Al^{3+} and to the use of agroecological technologies. The seeds were soaked at 5 ppm of Al^{3+} , a toxic concentration determined in previous investigations, later they were soaked with salicylic acid and inoculated with Mycorrhizae and Azospirillum. For the control of the fall armyworm, Palgus TM was applied and for fertilization 17-17-17 was applied buried. Destructive sampling was performed at 82 da, the variables were: Plant height (AP), Chlorophyll fluorescence (FC), Number of leaves (NH), Chlorophyll content (CC), Stem Dry Matter, Leaf and Root (MST, MSH, MSR), root / foliar dry matter ratio (R / F), root dry matter fraction (FMR) and foliar (FMF). The experimental design was completely randomized with a bifactorial arrangement. A principal component factor analysis was performed using multivariate analysis in STATISTICA version 8.0. The principal component factor analysis allowed reducing the dimensionality of the variables to two components that extracted 68.4 and 71.9% of the total variance. Component I was correlated with CC, PSH, PST and PSP and component II with AP, Fo, FV / Fo, PSR and R / F. The beneficial microorganisms present positive trends for the variables AP, FC, MSR, R / F and FMR and at a concentration of 5 ppm of Al^{3+} + salicylic acid, positive trends are observed in the variables of FMF and minimal FC. Seedlings of the local genotype are more susceptible to the effects of Al^{3+} than those of the hybrid genotype. Al^{3+} presents toxicity above 5 ppm for the Tuxpeño genotype and 6 ppm for the P4082W genotype. Reducing the dimensionality of the variables allows us to conclude that the interactions of agroecological technologies have synergistic effects for the growth and development of plants, mitigating the effects of stress caused by Al^{3+} for both genotypes under semi-controlled conditions.

Keywords: Mycorrhiza, Azospirillum, salicylic acid

1. INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cereales más cultivados en el mundo y es el más representativo de México por su importancia económica, social y cultural. A nivel mundial, México ocupa el sexto lugar en producción de maíz y a nivel nacional, Chiapas ocupa el octavo lugar (ASERCA, 2018). Sin embargo, para su producción actualmente presenta algunas limitantes. Una de ellas, sobre todo en suelos ácidos, es la toxicidad provocada por el aluminio. La toxicidad por aluminio es el primer factor que limita la producción de cultivos en suelos ácidos, conlleva a la disminución de la solubilidad del fósforo y del molibdeno, y al descenso de la concentración de macronutrientes en la solución del suelo y en la planta, causa una alteración del metabolismo general, especialmente inhibe el crecimiento radical, lo cual tiene como consecuencia una reducción en la toma de agua y nutrientes (Rivera *et al.*, 2016). En México hay más de 14 millones de hectáreas con suelos ácidos, siendo Chiapas, Veracruz, Tabasco y Campeche los estados donde se encuentra la mayor cantidad de suelo con esta problemática (FAO, 2016). El 20% de los suelos de la Frailesca Chiapaneca presentan problemas de acidez y alta saturación de Al^{3+} , principalmente por el uso inadecuado de fertilizantes nitrogenados de reacción ácida; fertilizantes que contienen o forman amonio como son: sulfato de amonio, nitrato de amonio y urea. Al aplicar estos fertilizantes al suelo el amonio se transforma en nitrato, es una reacción necesaria y se da de manera natural ya que mayor parte del nitrógeno que absorben las plantas es en forma de nitrato, lo que genera que los suelos se acidifiquen y presenten efectos negativos para las plantas (López *et al.*, 2016). En ese sentido, existen tecnologías agroecológicas que podrían mitigar los efectos que el Al^{3+} provoca en los suelos ácidos. Dos de ellas son el uso de microorganismos benéficos que incrementan la exploración de las raíces, y el ácido salicílico que contribuye en la regulación del crecimiento de las plantas (Grageda *et al.*, 2012).

1.1 Objetivos

Evaluar la respuesta de dos genotipos de maíz a la toxicidad causada por Al^{3+} y al uso de tecnologías agroecológicas, para mejorar la productividad del agroecosistema en Villa Corzo, Chiapas.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Determinar las concentraciones tóxicas del Al^{3+} y su efecto en plántulas de dos genotipos de maíz.
- b) Evaluar la respuesta de dos genotipos de maíz a la toxicidad causada por Al^{3+} y al uso de microorganismos benéficos y ácido salicílico.

1.2 Hipótesis

El grado de susceptibilidad o tolerancia al Al^{3+} en dos genotipos de maíz dependen del uso de microorganismos benéficos y su efecto tóxico podría atenuarse con el uso de ácido salicílico.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El maíz

El maíz junto al arroz y al trigo son considerados los tres cereales más cultivados en el mundo. Es originario del continente americano, y representa a nivel mundial uno de los aportes más valiosos a la seguridad alimentaria; puesto que, un grano de maíz está compuesto por aproximadamente 72 % de almidón, 10 % de proteína, 4 % de grasas, 6 % de fibra, 5.5 % de minerales, 2 % de otros azúcares y 0.5 % de vitaminas, sufriendo una densidad energética de alrededor de 365 Kcal/100 g (Ranum *et al.*, 2014).

Así mismo, la FAO (2017) menciona que el maíz, a nivel mundial, es el principal cereal más cultivado, resaltando que la producción promedio en los últimos cinco años ha superado a la producción media del cultivo de trigo hasta en un 23 %. Además, se puede considerar como la base de la alimentación de las culturas americanas. Este cereal, que posteriormente con el descubrimiento de América fue difundido a los otros continentes, hoy en día es indispensable como alimento básico en diferentes poblaciones y culturas.

García (2017), menciona que la importancia del maíz en el mundo no solo es por su volumen de producción. Es fundamental el papel que desempeña en la alimentación humana y animal, al ser materia prima para la elaboración de diversos productos como son la fabricación de harinas precocidas, aceites y de alimentos balanceados para la alimentación animal. También por ser componente importante en la elaboración de productos alimenticios e industriales, que van desde la fabricación de edulcorantes, bebidas refrescantes y alcohólicas, hasta la fabricación de etanol como combustible de vehículos y componentes importantes de las industrias automovilística, farmacéutica, cosmetología, diseño de ropa y calzados, entre otros.

En México, el maíz es el cultivo más representativo por su importancia económica, social y cultural. Su consumo promedio per cápita al año es de 196.4 kg de maíz blanco, especialmente en tortillas. La producción se divide en blanco y amarillo, el maíz blanco representa 86.94 % de la producción y se destina principalmente al consumo humano, mientras que la producción de maíz amarillo se destina a la industria o la fabricación de alimentos balanceados para la producción pecuaria (SIAP, 2018).

Gran parte del territorio nacional es propicio para la producción por lo que en los 32 Estados de la República Mexicana se produce maíz en grano, los principales Estados productores son: Sinaloa (22%), Jalisco (14%), México (8%), Michoacán (7%), Guanajuato (6%), Guerrero (5%), Veracruz (5%), Chiapas (5%), Chihuahua (4%) y el resto de los Estados representan el (20%) restante (SAGARPA, 2017).

En Chiapas, la región Frailesca, abarca oficialmente seis municipios: Villaflores, Villa Corzo, La Concordia, Ángel Albino Corzo, Montecristo de Guerrero y El Parral. Los dos primeros municipios mencionados son fundamentales para la producción agrícola. A escala regional, ambos contribuyen con el 59% de la superficie sembrada de maíz y el 65% del volumen de producción del grano (Pizaña *et al.*, 2019).

Al igual que en el resto del país, la población que habita en la región Frailesca mantiene como principal alimento de su dieta el consumo de tortilla a base de maíz, en cuya preparación se utilizan variedades nativas y mejoradas. Además, el grano se utiliza en un sinfín de platillos que son parte emblemática del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad de la cocina tradicional mexicana (UNESCO, 2010).

Aunado a lo anterior, Pizaña *et al.* (2019) mencionan que en los dos municipios principales de la región Frailesca (Villaflores y Villa Corzo), la superficie sembrada de maíz pasó de 143 503 hectáreas en 1982, a 99 027 hectáreas en 2003 y 34 914 hectáreas en 2017. Principalmente por las diversas limitantes entre factores bióticos y abióticos que este grano básico presenta como son los suelos ácidos, saturación de metales, plagas, enfermedades, entre otros.

En 2007 se reportó que el 40% (aproximadamente 33 500 hectáreas) de la superficie de la llanura de la región Frailesca, que incluye los municipios de Villaflores y Villa Corzo, está afectada por la acidez causando pérdidas en el rendimiento del grano de 800 a 1400 kilogramos por hectárea (Mendoza *et al.*, 2007).

López *et al.* (2018) mencionan que los rendimientos de maíz en la región Frailesca han disminuido, debido principalmente a la baja fertilidad generalizada de los suelos con alrededor del 25 % de los predios con acidez y alta saturación de aluminio, superior al 20 %. Esta situación es considerada como crítica para el cultivo de maíz, que aunado a la compactación subsuperficial, inadecuada nutrición del cultivo, el monocultivo de

maíz con quema de residuos de cosecha y la realización de prácticas inadecuadas de manejo agronómico; limitan el potencial productivo, ecológico y económico de los sistemas de producción de maíz.

La acidez, la saturación de aluminio y la baja proporción de materia orgánica afectan los rendimientos del maíz y conllevan a la aplicación de dosis más elevadas de fertilizantes nitrogenados, lo que incrementa los costos de producción (Bellante, 2017). Estrada (2014) menciona que el uso indiscriminado de agroquímicos ha acidificado los suelos, contaminado los ríos y mantos freáticos y presentan riesgos en la salud de los productores y la población en general.

2.2 El aluminio

El aluminio (Al) es el tercer elemento más abundante en la litosfera, constituyendo el 8.1 % de la corteza terrestre, normalmente bajo formas insolubles. Su abundancia litosférica sobrepasa los niveles reportados de elementos esenciales para la vida, mientras en los organismos vivos su concentración es muy baja por su poca o nula inclusión en procesos biológicos alcanzando concentraciones extremadamente bajas en la célula, las cuales son difíciles de medir acertadamente (Rondon *et al.*, 2007).

2.2.1 El aluminio en el suelo

Se ha estimado que entre un 30 % a un 40 % de los suelos agrícolas del mundo tienen problemas de acidez, limitando el crecimiento y desarrollo de los cultivos. En suelos con pH menor a 5, el (Al) es un elemento perjudicial al solubilizarse en formas iónicas. Estas formas iónicas han demostrado ser muy tóxicas para las plantas, provocando inicialmente la inhibición de la elongación de las raíces. La forma Al^{3+} y polímeros del elemento son los más tóxicos dentro del suelo, mientras que los complejos orgánicos e inorgánicos del elemento son menos fitotóxicos (INTAGRI, 2018).

Carreño y Chaparro (2013) señalaron que la toxicidad por aluminio es el primer factor que limita la producción de cultivos en suelos ácidos, debido a que el 50% de la tierra potencialmente arable es ácida. Más del 60% de los suelos ácidos en el mundo, están en países subdesarrollados, donde la producción de alimentos es crítica.

La acidez de los suelos limita el crecimiento de las plantas debido a una combinación de factores que incluyen a la baja disponibilidad de nutrientes esenciales,

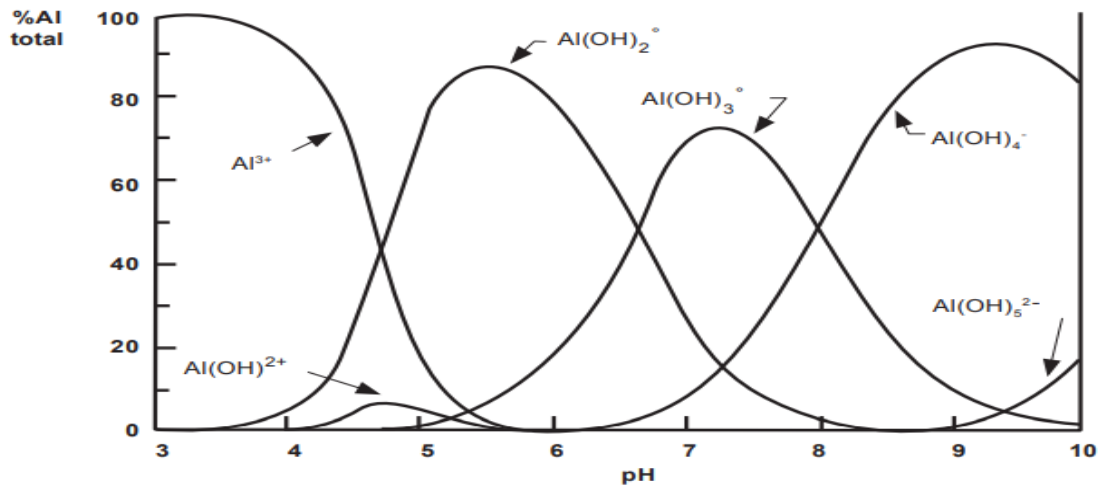
especialmente Calcio, Magnesio y algunos micronutrientes y/o la toxicidad de Manganeso o Aluminio. Sin embargo, es este último factor, en su forma Al^{3+} es el que más limita la producción agrícola principalmente cuando el pH es menor a 5 (Rivera *et al.*, 2016).

Los suelos ácidos pueden ser resultado de la mineralización de materiales parentales con bajo contenido de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+), de una disminución de pH ocasionada por la lixiviación de estos elementos, de prácticas agrícolas que incluyen la aplicación de fertilizantes amoniacales o de la lluvia ácida (Casierra y Aguilar, 2018).

INTAGRI (2018) menciona que también la flora y la fauna del suelo sufren consecuencias por la toxicidad del aluminio. En el rango de pH de 3.5 – 4.0, se encuentran por lo general pocas poblaciones de anélidos en el suelo y la cantidad de micorrizas disminuye, así también los grupos de bacterias y actinomicetos reducen su actividad y desarrollo cuando el pH del suelo está por debajo de 5.5.

Las reacciones químicas del aluminio en el suelo son extraordinariamente complejas y diversas. Están principalmente reacciones por hidrólisis, polimerización y reemplazo de elementos. Algunos monómeros resultantes de reacciones de hidrólisis de los compuestos de aluminio han sido reconocidos como fitotóxicos, sin embargo, los reportes sobre el efecto del hidróxido de aluminio en los vegetales son contradictorios (Casierra, 2001).

Rivera *et al.*, (2016) mencionan que el aluminio hace parte de los complejos aluminosilicato que liberan fácilmente el ion Al^{3+} a la solución del suelo. Según el pH, el aluminio puede estar de forma soluble, intercambiable y tóxica para las plantas (Al^{3+}), o de forma polimerizada como hidróxidos de aluminio o aluminatos. A un pH menor de 4.7 predomina el Al^{3+} , entre 4.7 y 6.5 el $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ y entre 6.5 y 8.0 el aluminio insoluble, $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Figura 1).



Fuente: Porta *et al.*, (2003)

Figura 1. Distribución porcentual de las formas de aluminio en una solución de acuerdo con el pH.

2.2.2 El aluminio en las plantas

La presencia de aluminio en el suelo constituye un factor responsable de estrés para las plantas, dado que altera muchos de sus procesos metabólicos; lo cual provoca una reducción del crecimiento y por tanto, en los rendimientos de los cultivos.

Para una mejor comprensión, Casierra y Cárdenas (2009) mencionan que “El estrés se puede describir como un estado en el cual se incrementan las demandas hechas sobre una planta, que conducen a una desestabilización de sus funciones, seguida por una normalización (de las mismas) y un incremento de la resistencia. Si se exceden los límites de tolerancia (del vegetal) y se sobrepasa su capacidad de adaptabilidad, pueden presentarse daños permanentes o incluso la muerte”. Dentro de lo antes mencionado, se puede ubicar los efectos que el aluminio causa en los vegetales, los que serán presentados en el desarrollo de esta tesis.

Ryan *et al.* (2011) mencionan que los mecanismos de absorción del aluminio aún no son bien conocidos. Por medio de inhibidores metabólicos se demostró que su absorción a través de la raíz es un proceso que no requiere energía. La posibilidad de que la absorción se produzca a través de los canales de calcio o magnesio es admisible ya que el aluminio inhibe la absorción de estos cationes.

Las probables vías de entrada del Al^{3+} incluyen: la simple permeabilidad a través de la membrana celular en forma de compuestos neutros, a través de estructuras micelares

lipídicas en forma de partículas cargadas o por medio de algún tipo de transportador unido a los fosfolípidos propios de la membrana u otro agente quelante (Rivera *et al.*, 2016).

La respuesta de las plantas a la toxicidad por Al^{3+} depende del grado de tolerancia o susceptibilidad de cada especie y de la concentración de este elemento en el medio. En general, el Al^{3+} interfiere con la división y elongación celulares, modifica la estructura y funcionamientos en las membranas plasmáticas, aumenta la rigidez de la pared celular, disminuye la respiración, reduce la toma de agua e interfiere con la toma y transporte de nutrientes. Las consecuencias del estrés por Al^{3+} se presenta a nivel bioquímico y fisiológico en las plantas (Casierra *et al.*, 2008).

Se han realizado estudios sobre los desórdenes causados por la toxicidad por Al^{3+} en las plantas, según Taylor (1990), Kochian (1995) y Jones *et al.* (1998) está relacionado con el tiempo en que aparece la sintomatología. Al respecto se definen dos categorías: 1) Las respuestas a largo plazo, las cuales pueden demorar varias horas en manifestarse; y 2) Las respuestas a corto plazo, cuya aparición puede tardar incluso un tiempo menor a un minuto. Las respuestas a largo plazo pueden corresponder a lesiones secundarias causadas por el Al^{3+} . Por otro lado, las respuestas a corto plazo, pueden ser lesiones primarias causadas por el elemento. La toxicidad por Al^{3+} puede ocurrir inicialmente fuera de la membrana plasmática, pero hasta el momento no ha sido posible esclarecer por completo los efectos de los mecanismos moleculares extracelulares de la toxicidad por aluminio a corto plazo.

Las plántulas jóvenes son más susceptibles que las plantas ya desarrolladas a la toxicidad causada por Al^{3+} . Aunque aparentemente el Al^{3+} no afecta la germinación de las semillas, se sabe que disminuye el crecimiento de las nuevas raíces y la estabilización de las plántulas (Casierra, 2008).

Sin embargo, con respecto a esta afirmación, los resultados varían mucho entre especies, e incluso entre cultivares. Estudios sobre el efecto de Al^{3+} en *Triticum aestivum* han demostrado la gran variabilidad en la respuesta de los diferentes cultivares de esta especie a la exposición al Al^{3+} (Gallardo *et al.*, 2005). Por otro lado, se encontró que, en semillas de arroz sin cáscara, tratadas con Al^{3+} , se modifica el peso, el contenido de proteína, de fécula y la actividad de la α -amilasa y de la proteasa

en el endospermo, mientras que en las semillas con cáscara no se observó cambios en las variables mencionadas, indicando que la cáscara del arroz puede actuar como barrera contra la acción de Al^{3+} sobre el endospermo (Wang y Kao, 2005). Además, Iqbal y Shafiq (2005) encontraron que el aluminio afecta tanto la germinación como el crecimiento inicial de dos cultivares de trigo.

El principal efecto de la toxicidad de Al^{3+} es la restricción del desarrollo radical, por lo cual la planta reduce el volumen de suelo que puede explorar, disminuyendo de este modo la absorción de nutrientes, de agua y reduciendo la producción de materia seca total (Gallardo, 2005).

Casierra (2002) menciona que los mecanismos de tolerancia a la toxicidad por aluminio desarrollados por los vegetales pueden agruparse en dos grandes categorías:

1. En primer lugar, las plantas pueden evitar la penetración del aluminio mediante su adsorción e inmovilización en los componentes de la pared celular y logrando un incremento del pH en la rizósfera con la consecuente polimerización y precipitación del Al^{3+} o la formación de complejos con los exudados orgánicos radiculares, y finalmente a través de una permeabilidad selectiva a nivel de la plasmalema.
2. En segundo lugar, las plantas pueden lograr una detoxificación del Al^{3+} presente en la célula como resultado de la formación de complejos en el citoplasma, la combinación del Al^{3+} con proteínas específicas, el almacenamiento del Al^{3+} en las vacuolas, y por último incrementando la actividad de ciertas enzimas específicas.

Para reducir el efecto tóxico del Al^{3+} en las plantas Casierra y Aguilar (2007) mencionan que se basa fundamentalmente en el aumento de pH y en la disminución de los niveles de aluminio intercambiables. Para ello, se emplean enmiendas o compuestos orgánicos a fin de desplazar al aluminio en la fase sólida del suelo y neutralizar por precipitación el ion Al^{3+} libre en la solución del suelo.

INTAGRI (2018) menciona que la inoculación con micorrizas es una práctica para reducir la toxicidad por aluminio, ya que permite incrementar la absorción de fósforo y reducir simultáneamente la de aluminio. Esquivel (2016) menciona que el ácido

salicílico mejora los cultivos principalmente cuando están sometidos a un tipo de estrés, por ejemplo, como respuesta a la toxicidad por aluminio. Barreto *et al.* (2016) mencionan que las bacterias rizosféricas poseen diversos mecanismos que estimulan el desarrollo vegetal, tales como la fijación del nitrógeno atmosférico, producción de fitohormonas. Además, pueden producir ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) desaminasa, una enzima que reduce los niveles de etileno en la raíz, incrementando su longitud y crecimiento, mejorando la tolerancia a la salinidad, sequía y toxicidad de metales, además de inducir resistencia a patógenos.

2.3 Tecnologías agroecológicas

2.3.1 Microorganismos benéficos

Los microorganismos de importancia agrícola representan una estrategia ecológica clave hacia el desarrollo integrado de prácticas tales como manejo de nutrientes, enfermedades y plagas, reducir el uso de productos químicos en la agricultura, así como para mejorar el rendimiento de los cultivos y disminuir el estrés por la toxicidad de metales pesados como el aluminio (Bhattacharyya *et al.*, 2016).

Juegan un papel importante en los sistemas agrícolas, particularmente los microorganismos promotores del crecimiento (Trabelsi *et al.*, 2013), que aumentan el desarrollo de las plantas y suprimen las enfermedades (Paramanandham *et al.*, 2017). Entre las influencias beneficiosas se incluyen la fijación de nitrógeno, la absorción de los nutrientes principales, la promoción del crecimiento de ramas y raíces, el control o la supresión de enfermedades; lo que disminuye los efectos de estrés por factores bióticos y abióticos y mejora la estructura del suelo (Vadakattu, 2012).

La interacción entre plantas y microbios puede contribuir a la salud y productividad de los cultivos (Laili *et al.*, 2017), a nivel mundial existe un interés permanente por conocer las bondades de los microorganismos sobre diferentes cultivos.

Los microorganismos son los componentes más importantes del suelo. Constituyen su parte viva y son los responsables de la dinámica de transformación y desarrollo. La diversidad de microorganismos que se encuentran en una fracción de suelo cumple funciones determinantes en la transformación de los componentes orgánicos e inorgánicos que se le incorporan. Esto permite comprender su importancia en la nutrición de las plantas al efectuar procesos de transformación hasta elementos que

pueden ser asimilados por sus raíces. La humificación de la materia orgánica es un proceso netamente microbiológico (Delgado, 2020).

INECOL (2020) menciona que la microflora del suelo está compuesta por bacterias, actinomicetos, hongos, algas, virus y protozoarios. Entre las funciones más importantes que cumplen en los procesos de transformación de forma asociada están:

- Suministro directo de nutrientes (Fijación de nitrógeno).
- Transformación de compuestos orgánicos que la planta no puede tomar a formas inorgánicas que si pueden ser asimiladas (Mineralización).
- Solubilización de compuestos inorgánicos para facilitar la absorción por las plantas. Ejemplo: Fosfato tricálcico a Fosfato monocálcico.
- Cambios químicos en compuestos inorgánicos debido a procesos de oxidación y reducción. Ejemplo: Oxidación del azufre mineral a sulfato, Oxidación del nitrógeno amoniacal a nitrato.
- Aumento del desarrollo radicular en la planta que mejora la asimilación de nutrientes, la capacidad de campo y el desarrollo.
- Reacciones antagónicas, parasitismo y control de fitopatógenos.
- Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.

2.3.1.1 Las bacterias

Las bacterias que manifiestan acciones benéficas son conocidas como rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal o PGPR (Plant Growth Promoting Rizobacteria), por sus siglas en inglés. Kloepper y Schroth (1978) definieron a un tipo de bacteria como PGPR, la cual mostró ser un organismo altamente eficiente para aumentar el crecimiento de las plantas e incrementar su tolerancia a otros microorganismos causantes de enfermedades. Entre las bacterias más estudiadas para su aplicación en semillas, se encuentran *Pseudomonas spp* y *Azospirillum spp* (Santos, 2014).

Hernández y Escalona (2013) mencionan que en años recientes se ha creado cierta controversia respecto de cuándo considerar a una rizobacteria como PGPR, por lo que se han establecido algunas características que definen a este grupo.

En primer lugar, que tengan una elevada densidad poblacional en la rizósfera después de su inoculación en las plantas, ya que una población que declina rápidamente tiene una baja capacidad competitiva con la microflora nativa del suelo. Después, que posean capacidad de colonización efectiva en la superficie de la raíz y, como consecuencia, puedan influir positivamente en el crecimiento de la planta. Además, que puedan controlar de manera natural y eficiente a otros microorganismos del suelo capaces de enfermar a las plantas; y, por último, que no produzcan daño en el hombre.

2.3.1.1.1 Mecanismos en el crecimiento vegetal

2.3.1.1.1.1 Fijación biológica de nitrógeno (FBN)

El nitrógeno (N) es uno de los nutrientes vitales para el crecimiento y la productividad de las plantas. Este elemento se encuentra presente en aminoácidos propios de proteínas, amidas, clorofila, hormonas, nucleótidos, vitaminas, alcaloides y ácidos nucleicos. En la tierra el N₂ constituye aproximadamente el 78% de los gases en la atmósfera, sin embargo, esta forma no es asimilable por las plantas. Los organismos que fijan el nitrógeno se clasifican generalmente en bacterias simbióticas fijadoras de N₂, en las cuales se encuentran los miembros de la familia Rhizobiaceae y del género Frankia (Ahemad y Kibret, 2014) y no simbióticas de vida libre, asociativa y endófitas, tales como cianobacterias, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Gluconoacetobacter diazotrophicus*, *Azocarus* (Bhattacharyya y Jha, 2012).

2.3.1.1.1.2 Solubilización de fosfatos

El fósforo (P) es el segundo nutriente más importante que interviene en el crecimiento y productividad de las plantas. Este elemento es esencial en la división celular, transducción de señales, biosíntesis macromolecular, fotosíntesis y respiración de plantas, siendo la adquisición, almacenamiento y uso de energía una de sus principales funciones (Razaq *et al.*, 2017). Algunas rizobacterias tienen la capacidad de solubilizar fosfatos a partir de compuestos inorgánicos u orgánicos, empleando distintas vías. De esta manera, las rizobacterias solubilizadoras de fosfatos representan una alternativa en la mejora de la aplicación de los fertilizantes fosfatados químicos y productividad agrícola, ya que tienen la capacidad de proporcionar formas disponibles de fósforo a las plantas (Khan *et al.*, 2007).

2.3.1.1.1.3 Producción de fitohormonas

Las fitohormonas son moléculas orgánicas que en pequeñas concentraciones (<1 mM) regulan la expresión de genes implicados en el crecimiento y desarrollo vegetal; éstas pueden ser sintetizadas en diferentes lugares de la planta y su acción varía en función de los cambios ambientales que modifican la expresión génica del organismo, por lo cual tienen un impacto prominente en el desarrollo y productividad de las plantas (Gouda *et al.*, 2018). Algunas rizobacterias tienen la capacidad de producir fitohormonas, siendo este uno de los mecanismos más estudiados que se asocian en la promoción del crecimiento vegetal, como *B. amyloliquefaciens* en cultivo de papa (Calvo *et al.*, 2010), *Azospirillum* y *Klebsiella* en cultivos de maíz (Carcaño *et al.*, 2006), *Bacillus*, *Lysinibacillus*, *Arthrobacter* y *Rahnella* en plantaciones de *Eucalyptus nitens* (Angulo *et al.*, 2014).

2.3.1.1.1.3.1 Auxinas

Las auxinas son un tipo de fitohormonas muy importantes en las plantas, éstas influyen en diversos eventos del desarrollo como la división celular, elongación, dominancia apical, formación de raíces adventicias y el fototropismo (Egamberdieva *et al.*, 2017). Una de las auxinas más conocidas y producidas por las rizobacterias es el ácido indol-3-acético (AIA) (Ali, 2015). El AIA liberado por las rizobacterias tiene efectos principalmente al sistema radicular, aumentando su tamaño, peso, número de ramificación y el área de superficie en contacto con el suelo. Todos estos cambios conducen a un aumento en su capacidad de explorar el suelo para el intercambio de nutrientes, de esta manera, mejoran la nutrición de la planta y su capacidad de crecimiento. Las rizobacterias utilizan L-triptofano que es secretado en la rizosfera para sintetizar el AIA principalmente a través de la vía del ácido indol-3-pirúvico (IPyA). Algunos géneros como *Azospirillum*, *Rhizobium* y *Bradyrhizobium* sintetizan la hormona por esta vía (Kang *et al.*, 2017).

2.3.1.1.1.3.2 Citocininas

Las citocininas son otro grupo importante de fitohormonas, su estructura generalmente derivada de adenina. Este tipo de hormonas promueven procesos como la división y diferenciación celular, el incremento del área de la raíz mediante la formación de raíces adventicias, formación de hojas, así como la prevención de la senescencia (Molina *et*

al., 2015). En la actualidad se han encontrado más de 30 diferentes compuestos de citocininas promotoras de crecimiento en las plantas producidas por microorganismos asociados a las plantas. Se han reportado una gran cantidad de especies productoras de esta fitohormona como: *Arthrobacter giacomelloi*, *Azospirillum brasilense*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus licheniformis*, *Paenibacillus polymyxa*, *Pseudomonas fluorescens* y *Rhizobium leguminosarum*, entre otros (Maheshwari *et al.*, 2015).

2.3.1.1.1.3.3 Giberelinas

Las giberelinas son un grupo de fitohormonas que regulan el crecimiento vegetal en diversos procesos metabólicos, incluidos la germinación de semillas, elongación del tallo, floración, formación del fruto y la altura de la planta (Kang *et al.*, 2017). Las giberelinas interactúan con otras fitohormonas, lo que provoca respuestas importantes que median la tolerancia al estrés (Egamberdieva *et al.*, 2017). Además, las giberelinas inducen la absorción eficiente de iones dentro de la planta, lo que aumenta el crecimiento y mantiene el metabolismo de las plantas bajo condiciones normales y condiciones de estrés. Las giberelinas producidas por las PGPR promueven el crecimiento de la planta y aumentan los rendimientos (Desai, 2017).

2.3.1.1.1.3.4 Ácido abscísico

El ácido abscísico (ABA) es una fitohormona con una estructura sesquiterpenoide que juega un rol muy importante en la fisiología de las plantas, principalmente en las respuestas adaptativas frente a estrés biótico y abiótico (Zhou *et al.*, 2017). El ABA participa en procesos como la dormancia de la semilla y la abscisión de órganos. Así mismo, se ha reportado que, bajo condiciones de estrés abiótico, ABA regula la expresión de genes sensibles al estrés, lo que conduce a un mejor desempeño en las respuestas de tolerancia (Shahzad *et al.*, 2017). El estudio relacionado con rizobacterias productoras de ABA y su metabolismo se ha visto un poco más limitado comparado con el de otras fitohormonas, sin embargo, existen algunas especies como: *Azospirillum brasilense*, *Arthrobacter koereensis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. licheniformis* que han demostrado la capacidad para producir esta fitohormona (Egamberdieva *et al.*, 2017; Shahzad *et al.*, 2017), contrarrestando los efectos negativos ocasionados por el estrés biótico y abiótico.

2.3.1.1.1.4 Controladores de estrés

El estrés es definido como cualquier factor que influya de manera negativa en el desarrollo de la planta (Foyer *et al.*, 2016). Las plantas son organismos sésiles y frecuentemente son sometidas a diversos tipos de estrés como: altas temperaturas, frío, sequía, salinidad, toxicidad por metales, alcalinidad, radiación UV e infección por patógenos. Estos factores suelen ser impredecibles y llegan a perjudicar considerablemente la productividad agrícola (Gouda *et al.*, 2018).

2.3.1.2 Los hongos

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son microorganismos del suelo que forman simbiosis con el 80% de las plantas terrestres, formando arbusculos, vesículas (en algunas especies) e hifas dentro de las células corticales de las plantas que colonizan (Arias *et al.*, 2019). Su distribución además de amplia, ya que se encuentran en todos los ecosistemas y suelos, puede ser muy heterogénea en un mismo sitio en cuanto a variedad y cantidad, lo que es un requisito importante para que la planta obtenga el máximo beneficio de la asociación (Medina, 2016). Esta asociación simbiótica entre el hongo y la planta actúa como un complemento de la raíz de la planta en la toma de nutrientes, especialmente en la absorción de fósforo, aumento de la tolerancia a condiciones de estrés abiótico, mejoramiento de la calidad del suelo, fijación de N₂ y aumento en la diversidad y productividad de las plantas en un ecosistema determinado (Barrer, 2009).

También es importante notar que el HMA permite a la planta usar de manera más eficiente los nutrientes del suelo, razón por la cual se pueden reducir los problemas de contaminación de este por el exceso de fertilizantes químicos, en el caso de que exista una reducción en la aplicación de estos (Cuesta, 2020).

Diversos estudios han evidenciado los efectos positivos de las inoculaciones de microorganismos solubilizadores de fósforo y HMA en tomate (Velázquez *et al.*, 2005), frijol (Zaidi y Khan, 2006), maíz (Serralde y Ramírez, 2014), garbanzo (Saxena *et al.*, 2015), lechuga (Velázquez *et al.*, 2017), *Coffea arabica* (Perea, 2019) y jitomate (Arias *et al.*, 2019).

Medina (2016), menciona que las micorrizas arbusculares han sido ampliamente descritas como favorecedoras del crecimiento vegetal. La colonización micorrízica

produce cambios físicos, bioquímicos y fisiológicos en las raíces que conducen a un mejor estado general de la planta y contribuyen a aliviar las situaciones de estrés de carácter abiótico (metales pesados, salinidad) y bióticos (ataques de patógenos, cambios microbianos en la rizósfera).

Se admiten en general cinco tipos de micorrizas (Harley y Smith, 1983):

1. Ectomicorrizas: Los hongos que las forman, Basidiomicetes y Ascomicetes, desarrollan una espesa capa de micelio sobre la zona cortical de las raíces nutricias de la planta. Se producen principalmente sobre especies forestales y leñosas.

2. Endomicorrizas: Los hongos que las producen se caracterizan por colonizar intracelularmente el córtex radical. Dentro de este grupo existen tres tipos característicos:

- Orquideomicorrizas (asociadas a Orquidiáceas).
- Ericomicorrizas (ligadas a la Familia Ericáceas y con muchas similitudes estructurales con las ectendomicorrizas).
- Micorrizas arbusculares: Caracterizadas por formar arbusculos intracelulares y sin duda las de mayor difusión e importancia económica y ecológica.

3. Ectendomicorrizas: Los hongos que las producen colonizan de forma dual las raíces, externamente formando un manto cortical e internamente penetrando intracelularmente en el córtex.

2.3.1.2.1 Ectomicorrizas

Se trata de una interacción en la que las hifas de un hongo penetran las raíces secundarias de la planta para desarrollarse, rodeando las células de la corteza radical, y forman una trama intercelular denominada red de Hartig, además de una capa de micelio (conjunto de hifas que constituyen el cuerpo o talo del hongo) en la parte exterior de la raíz, llamada manto. Como resultado de este proceso, se forma una nueva estructura que puede ser reconocida y clasificada, denominada morfotipo ectomicorrícico (Galindo *et al.*, 2015).

2.3.1.2.2 Endomicorrizas

2.3.1.2.2.1 Orquideomicorrizas

Es un subtipo de endomicorriza que se describió hace más de 100 años, en el que también se observa que el hongo penetra las células radicales y forma estructuras. Sin

embargo, se distingue de las demás endomicorrizas en que se presenta principalmente en las orquídeas. Además, en este caso la planta (orquídea) es muy dependiente del hongo, ya que éste estimula la germinación de sus semillas y el crecimiento inicial de la plántula. En su fase de plántulas las orquídeas son aclorófilas (no presentan clorofila) y por tanto saprobias (no producen su propio alimento), por lo que dependen directamente de las aportaciones de compuestos de carbono y nutrimentos que proporciona el hongo (Andrade, 2010).

2.3.1.2.2.2 Ericomicorrizas

El hongo también penetra las células radicales, pero se distingue porque la planta involucrada es generalmente del orden Ericales (comúnmente llamados brezos), aunque este tipo de micorriza se ha observado también en algunas briofitas (grupo de los musgos), y el hongo es del grupo *Ascomycotina* (no *Basidiomycotina*). Todas las especies de las familias *Ericaceae* (excepto por los géneros *Arbutus* y *Arctostaphylos*), *Epacridaceae* y *Empetraceae* forman micorrizas ericoide. En cuanto a los hongos, se han identificado especies de los géneros *Scytalidium*, *Hymenoscyphus* y *Oidiodendron*, aunque muchas de las especies aisladas no han sido aún identificadas (Triviño, 2017).

2.3.1.2.2.3 Micorrizas arbusculares

Primero clasificada como endomicorriza, a la micorriza arbuscular también se le ha conocido como micorriza vesículo-arbuscular. Es una asociación obligada para los hongos que la forman, pero no para las plantas. En este caso no se forma la red de Hartig ni el manto, y se caracteriza porque las hifas penetran la raíz, se introducen en las células y pueden formar dos tipos de estructuras. Su principal característica es la estructura denominada arbúsculo, la cual se origina cerca del cilindro vascular de la planta mediante numerosas ramificaciones dicotómicas sucesivas de una hifa, y tiene la función de transferir nutrimentos desde y hacia la planta. La segunda estructura es llamada vesícula, y puede o no estar presente, dependiendo del hongo. Es de forma ovalada a esférica; puede formarse entre o dentro de las células radicales, y funciona como almacén de nutrimentos (Quiñones, 2019).

2.3.1.2.3 Ectendomicorriza

Este tipo de micorriza es especial, pues presenta las características de las ectomicorrizas (red de Hartig y manto), pero simultáneamente presenta un cierto grado de penetración intracelular, como en las endomicorrizas. En algunos casos no se forma el manto, pero siempre la red de Hartig. Esta interacción se presenta principalmente entre hongos de los grupos *Basidiomycotina* y *Ascomycotina*, y plantas coníferas del género *Pinus*, aunque también se ha reportado para algunas angiospermas (plantas con flores) (López, 2019).

2.3.2 Ácido salicílico

El ácido salicílico (AS) forma parte de un amplio grupo de compuestos sintetizados en plantas denominados fenólicos, los cuales poseen en su estructura química un grupo hidroxilo unido a un anillo aromático. Los compuestos fenólicos participan en muchas funciones metabólicas en plantas, como son la síntesis de lignina, actividad alelopática, y en algunos casos en la biosíntesis de compuestos relacionados a la defensa como la fitoalexinas (Tavares *et al.*, 2014).

El AS participa en procesos como la germinación de semillas, crecimiento celular, respiración, cierre de estomas, expresión de genes asociados a la senescencia, repuesta a estrés abiótico y de forma esencial en la termogénesis, así como en la resistencia a enfermedades. Adicionalmente, se ha descrito que en algunos casos el efecto del AS dentro del metabolismo de las plantas puede ser de forma indirecta ya que altera la síntesis y/o señalización de otras hormonas que incluyen la vía del ácido jasmónico (AJ), etileno (ET) y auxinas (Fatima *et al.*, 2014).

En algunos cultivos de importancia agrícola como el tabaco, maíz y trigo la aplicación de AS regula la fotosíntesis (Wang *et al.*, 2010), el transporte de electrones del fotosistema II (Janda *et al.*, 2012), la transpiración y la conductancia estomática (Fahad y Bano, 2012). En otros cultivos también se ha reportado que incrementa la altura de la planta, diámetro del tallo, área foliar, biomasa fresca y seca, números de frutos o granos y acorta los días de floración (Taveres *et al.*, 2014) favoreciendo una mayor bioproductividad (Martín *et al.*, 2013). Por otro lado, varios autores señalan que el AS favorece la acumulación de nutrimentos en los tejidos de la planta en condiciones de estrés salino (Fahad y Bano, 2012) o de metales pesados (Singh *et al.*, 2015).

En gramíneas Gunes *et al.* (2007) encontraron que los valores para biomasa seca total en plantas de maíz son superiores a las plantas testigo cuando se suministran concentraciones de 0.1 mM de AS; en tanto que Fahad y Bano (2012) publicaron incrementos de 100 y 57% por encima del control en longitud y peso seco en la raíz de este cereal con aspersiones de 0.01 mM de AS bajo condiciones de salinidad.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del área de estudio

La investigación constó de dos fases. La fase I se realizó en el invernadero de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Facultad de Ingeniería. La fase II se realizó en la parcela “Fracción Veracruzana”, ambos ubicados en el municipio de Villa Corzo, Chiapas (Figura 2).

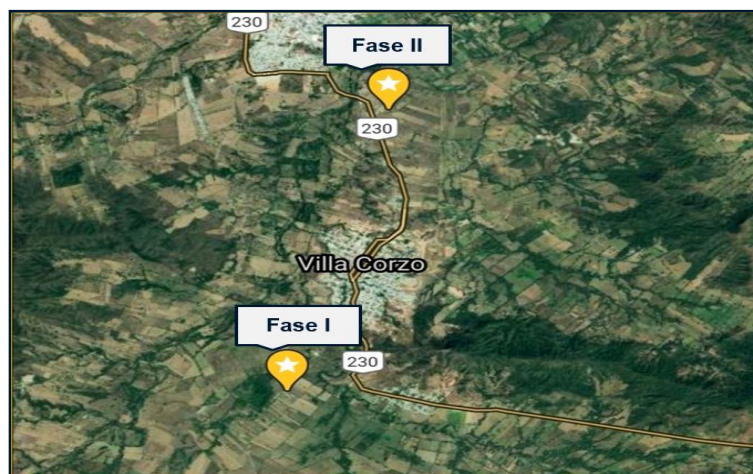


Figura 2. Localización del área de estudio

Fuente: Google maps (2020)

3.1.1 Características generales del área de estudio

Villa Corzo se localiza en los límites de la Sierra Madre y de la Depresión Central, predominando el relieve montañoso, sus coordenadas geográficas son 16° 11´ 7" N y 93° 16´ 6" W. Limita al norte con Chiapa de Corzo, al este con Venustiano Carranza y La Concordia, al sur con Pijijiapan y La Concordia, al oeste con Tonalá y Villaflores. Su extensión territorial es de 2,721.68 km², lo que representa el 48% de la región Frailesca y el 5.32 % de la superficie estatal. La altitud es de 580 m y el clima varía según la altitud: cálido subhúmedo (Aw2) con lluvias en el verano en las partes bajas y semicálido húmedo (ACw2) en la sierra (INAFED, 2010).

3.2 Proceso metodológico

3.2.1 Fase I

3.2.1.1 Diseño experimental

Se utilizaron dos genotipos de maíz (Tuxpeño y P4082W). Se establecieron dos experimentos, uno para cada genotipo, a diferentes concentraciones de Al^{3+} con un diseño experimental Completamente al azar con cinco tratamientos y seis repeticiones. Para determinar las concentraciones para ambos genotipos (Cuadro 1) se realizó al menos cinco ensayos previos.

Cuadro 1. Concentraciones de Al^{3+} correspondiente a cada genotipo de maíz.

Tratamiento	Concentraciones de Al^{3+} (ppm)	
	Tuxpeño	P4082W
1	0	0
2	3	4
3	4	5
4	5	6
5	6	7

3.2.1.2 Tratamiento de las semillas

3.2.1.2.1 Desinfección

Se seleccionaron y desinfectaron 180 semillas de cada genotipo de maíz (Tuxpeño y P4082W) con Hipoclorito de Sodio al 0.5 % durante 10 min. Es decir, para una solución desinfectante de 500 ml, se le agregó 25 ml de Hipoclorito de Sodio y 475 ml de agua. Luego de la esterilización, las semillas se lavaron con agua destilada y se secaron a temperatura ambiente.

3.2.1.2.2 Imbibición de las semillas en concentraciones de Al^{3+}

Se inició con la preparación de solución madre a concentración de 100 ppm, se diluyó 1.2350 g de Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) en 1 L de agua destilada con pH de 4.0. El pH se disminuyó con Ácido clorhídrico (HCl), con un medidor de pH/temperatura (Thermo Scientific 0230A0, model 230A) y se cuantificó hasta obtener el pH deseado. Posteriormente, se realizó la preparación de las diluciones correspondientes de cada tratamiento en ambos genotipos. Finalmente, se imbibieron

36 semillas por 24 h en cada concentración de Al^{3+} y el testigo en agua destilada con pH de 4.0.

3.2.1.3 Establecimiento del experimento

Se utilizaron 5 charolas germinadoras (68 cm x 20 cm x 4.8 cm) para cada genotipo, con 36 cavidades (4.9 cm x 3.7 cm x 4.8 cm) cada una. Como sustrato se utilizó peat moss y posteriormente se colocaron las 36 semillas por cada tratamiento. Las charolas se colocaron bajo condiciones de invernadero y los riegos se aplicaron cada dos días.

3.2.1.4 Muestreo destructivo

A los 15 días después de la emergencia de las semillas se realizó el muestreo destructivo. Se seleccionaron 15 plántulas; las más desarrolladas por cada tratamiento en ambos experimentos.

Las variables medidas fueron:

- Área foliar (AF): Estimación del área foliar por plántula, corte de las hojas y medición de estas con un medidor portátil (CI-202 Laser Área Meter).
- Número de hoja (NH): Contabilización de la aparición de las hojas desarrolladas por plántula.
- Longitud de raíz (LR): Medida con una regla milimétrica desde la base del tallo hasta la raíz más larga.
- Contenido de clorofila (CC): Medición de dos hojas por plántulas con un clorofilómetro portátil (modelo C-100).
- Fluorescencia de la clorofila (FC): Selección de cinco plántulas por tratamiento, y colocación de un clip cerrado en una de las hojas por plántula, después de 20 min se abrieron los clips y fueron medidos con un fluorímetro (Opti-sciences OS30p+).
- Materia seca aérea (MSA) y materia seca de la raíz (MSR): Separación y secado de las diferentes estructuras a 80 °C durante 72 h, en una estufa de ventilación forzada, y luego pesadas en balanza analítica de precisión (VE-204).

Con las dos últimas variables se estimó:

- Longitud específica de la raíz (LER): Relación de la longitud de la raíz y la acumulación de biomasa en la raíz.

- Relación materia seca de la raíz/foliar (R/F): Relación entre la biomasa de la raíz y la biomasa foliar.
- Fracción de la materia seca foliar (FMF): Relación de biomasa foliar y la biomasa total de la plántula.
- Fracción de la materia seca de la raíz (FMR): relación de biomasa de la raíz y la biomasa total de la plántula.

3.2.1.5 Análisis estadístico

Se realizó mediante análisis de varianza y comparación de medias a través de la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) en Statistica versión 8.0.

3.2.2 Fase II

3.2.2.1 Diseño experimental

Se utilizaron dos genotipos de maíz (Tuxpeño y P4082W). Se establecieron dos experimentos, uno para cada genotipo a concentraciones tóxicas de Al^{3+} , determinada en la Fase I, y con tecnologías agroecológicas (M.B: microorganismos benéficos y A.S: ácido salicílico) en un diseño experimental Completamente al azar con arreglo bifactorial con ocho tratamientos y diez repeticiones (Cuadro 2).

Cuadro 2. Arreglos de los tratamientos correspondientes a cada genotipo de maíz.

Tratamiento	Tuxpeño		P4082W	
	Concentración de Al^{3+}	Tecnología agroecológica	Concentración de Al^{3+}	Tecnología agroecológica
1	0	0	0	0
2	0	M.B	0	M.B
3	0	A.S	0	A.S
4	0	M.B + A.S	0	M.B + A.S
5	5	0	6	0
6	5	M.B	6	M.B
7	5	A.S	6	A.S
8	5	M.B + A.S	6	M.B + A.S

3.2.2.2 Tratamiento de las semillas

3.2.2.2.1 Desinfección

Se seleccionaron y desinfectaron 240 semillas por cada genotipo de maíz (Tuxpeño y P4082W) con Hipoclorito de Sodio al 0.5 % durante 10 min.

3.2.2.2.2 Imbibición de las semillas en concentraciones de Al³⁺

Para la preparación de solución madre a concentración de 100 ppm, se diluyó 1.2350 g de Sulfato de Aluminio (Al₂(SO₄)₃ 18H₂O) en 1 L de agua destilada con pH de 4.0. El pH se disminuyó con ácido clorhídrico (HCl), con un medidor de pH/temperatura (Thermo Scientific 0230A0, model 230A) y se cuantificó hasta obtener el pH deseado. Posteriormente, se realizó la preparación de las diluciones correspondientes de cada tratamiento en ambos genotipos. Se imbibieron 120 semillas por 24 h en cada concentración de Al³⁺ y el testigo en agua destilada con pH de 4.0.

3.2.2.2.3 Imbibición de las semillas en ácido salicílico

Se seleccionaron 60 semillas de ambos genotipos, 30 por cada concentración de Al³⁺. Posteriormente se imbibieron las semillas en ácido salicílico (0.01 mM), durante una hora. Para ello, se preparó una solución madre a concentración de 1 mM de ácido salicílico, se diluyó 0.1381 g en 1 L de agua destilada y se realizó la dilución de 0.01 mM con el uso de la fórmula: C1V1=C2V2.

3.2.2.2.4 Inoculación con microorganismo benéficos

Se seleccionaron e inocularon 60 semillas de ambos genotipos, 30 por cada concentración de Al³⁺. Se humedecieron las semillas con adherente, posteriormente, se les aplicó hongos micorrizicos arbusculares (*Rhizophagus irregularis*) y *Azospirillum brasilense* y se dejó reposar durante siete horas.

Se seleccionaron 60 semillas de ambos genotipos, 30 por cada concentración de Al³⁺. Las semillas se imbibieron en ácido salicílico e inocularon con microorganismos benéficos; el procedimiento fue el mismo que mencionó anteriormente. A las 60 semillas restantes no se les aplicó tecnologías agroecológicas.

3.2.2.3 Establecimiento del experimento

Se utilizaron 160 macetas de aproximadamente 15 kg de capacidad. Las macetas se rellenaron con suelo de la parcela "Fracción Veracruzana" y posteriormente se inició con la siembra. Se colocó tres semillas por macetas y a los 15 días después de la germinación se seleccionó la mejor plántula por maceta para dejarla crecer y desarrollarse. El resto se eliminó.

Se aplicó el ingrediente activo Spinetoram para el control del gusano cogollero, a los 15 y 50 días después de siembra (dds). Para ello se utilizó una mochila aspersora con la capacidad de 20 L donde se le adicionó 10 cm del producto químico. Para la fertilización se aplicó de forma enterrada el fertilizante con la formula química de 17-17-17, a los 25 dds (5 g por planta) y a los 50 dds (10 g por planta).

3.2.2.4 Muestreo destructivo

El muestreo destructivo se realizó a los 82 dds para el genotipo Tuxpeño y a los 83 dds para el genotipo P4082W.

Las variables medidas fueron:

- Altura de planta (AP): Medida con un flexómetro desde la base del tallo hasta la parte más alta de la planta.
- Diámetro del tallo (DT): Medida con Vernier (Electronic digital caliper) a 30 cm de la base del tallo.
- Número de hojas (NH): Contabilización de la aparición de las hojas desarrolladas por plántula.
- Contenido de clorofila (CC): Medición de dos hojas por plántulas con un clorofilómetro portátil (modelo C-100).
- Fluorescencia de la clorofila (FC): Selección de cinco plantas por tratamiento, y colocación de un clip cerrado en una de las hojas por planta, después de 20 min se abrieron los clips y fueron medidos con un fluorímetro (Opti-sciences OS30p+).
- Materia seca de hojas (MSH), materia seca de tallo (MSH) y materia seca de la raíz (MSR): Separación y secado de muestras vegetales en una estufa de aire forzado a 65°C hasta llegar a peso constante, y luego pesadas en balanza analítica de precisión (VE-204).

Con las dos últimas variables se estimó:

- Materia seca de la planta (MSP): Sumatoria de las estructuras de la planta (hojas, tallos y raíces).
- Razón de materia seca de la raíz/foliar (R/F): Relación entre la biomasa de la raíz y la biomasa foliar.

- Fracción de la materia seca foliar (FMF): Relación de biomasa foliar y la biomasa total de la plántula.

3.2.2.5 Análisis estadístico

Para cada experimento se realizó un análisis factorial de componentes principales mediante un análisis multivariado en Statistica versión 8.0.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Fase I

Para el genotipo Tuxpeño, las variables número de hojas, contenido de clorofila y longitud de la raíz, estadísticamente presentaron diferencias significativas, sin embargo, el área foliar no presentó diferencia. En las concentraciones de 4 a 6 ppm de Al^{3+} , el desarrollo de las hojas incrementó. El contenido de clorofila y longitud de la raíz, presentaron mejores resultados en las concentraciones de 3 a 5 ppm de Al^{3+} , es decir, que a concentraciones antes mencionadas el Al^{3+} , presenta efectos positivos (Figura 3).

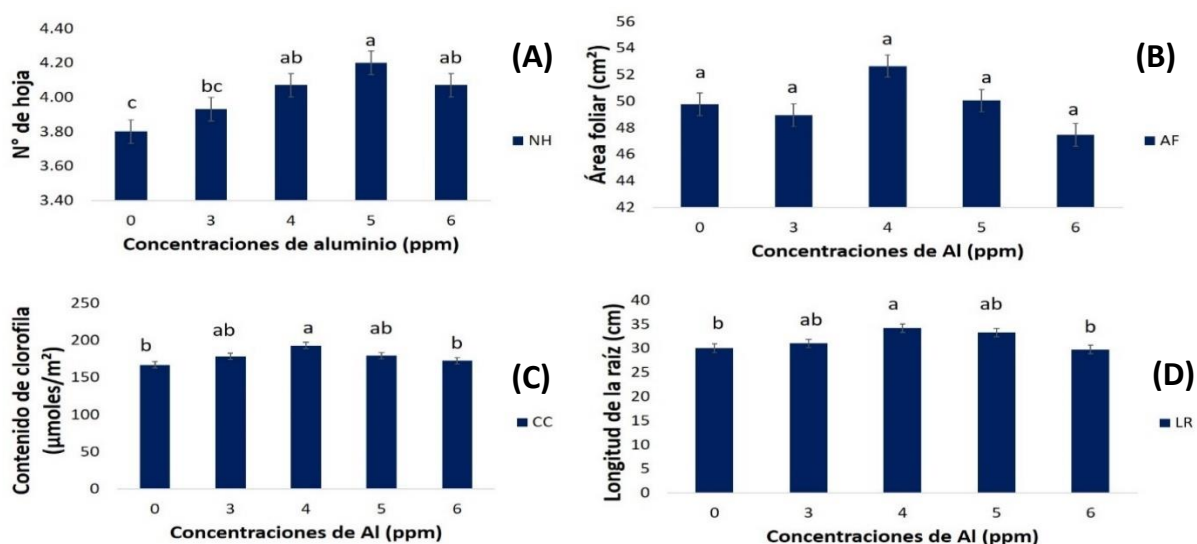


Figura 3. Efecto del Al^{3+} en N° de hojas (A), área foliar (B), contenido de clorofila (C) y longitud de la raíz (D) en plántulas de maíz Tuxpeño. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Para el genotipo P4082W, el contenido de clorofila y el N° de hojas, estadísticamente no presentaron diferencias significativas, es decir que, las plántulas se comportan de igual manera con las diferentes concentraciones de Al^{3+} y el testigo (0 Al^{3+}), sin embargo, las variables área foliar y longitud de la raíz, presentaron diferencias significativas. El área foliar, por encima de la concentración de 6 ppm de Al^{3+} tiende a disminuir. La longitud de la raíz aumenta en concentraciones de 4, 5 y 7 ppm de Al^{3+} , es decir, que por debajo de 4 ppm de Al^{3+} y por encima de 7 ppm de Al^{3+} la longitud de las raíces tiende a disminuir (Figura 4).

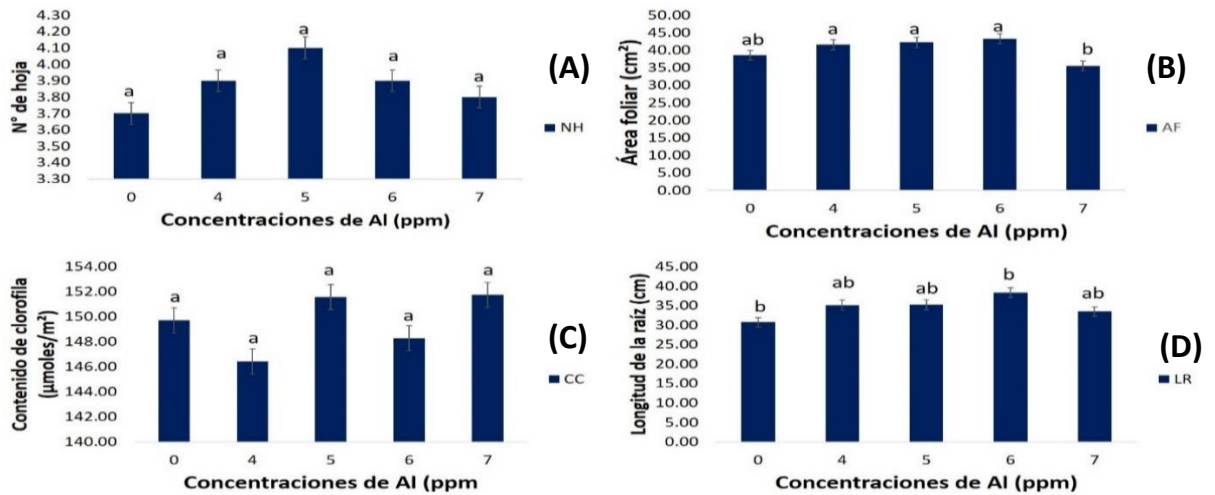


Figura 4. Efecto del Al³⁺ en N° de hojas (A), área foliar (B), contenido de clorofila (C) y longitud de la raíz (D) en plántulas de maíz P4082W. Letras diferentes indican diferencias significativas (p < 0.05).

Para el genotipo Tuxpeño, la acumulación de materia seca aérea y materia seca de la planta estadísticamente no presentaron diferencias significativas, sin embargo, en materia seca de la raíz sí presentó diferencias significativas, siendo las concentraciones de 0, 3 y 4 ppm de Al³⁺ donde presentaron los mejores resultados, es decir, que por encima de 4 ppm de Al³⁺ las raíces tienden a disminuir su desarrollo (Figura 5).

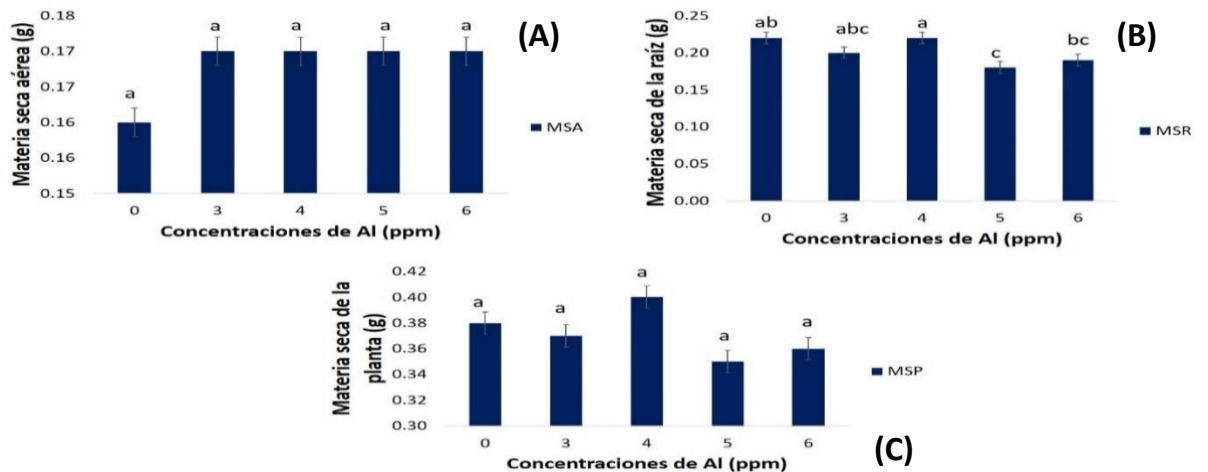


Figura 5. Efecto del Al³⁺ en la acumulación de materia seca aérea (A), materia seca de la raíz (B) y materia seca de la planta (C) en plántulas de maíz Tuxpeño. Letras diferentes indican diferencias significativas (p < 0.05).

Para el genotipo P4082W, la acumulación de materia seca aérea no presentó diferencias significativas, sin embargo, la acumulación de materia seca de la raíz y la materia seca de la planta presentaron diferencias significativas siendo los tratamientos de 0 a 6 ppm de Al^{3+} donde se obtuvieron los mejores resultados para ambas variables, es decir, que por encima de 6 ppm de Al^{3+} disminuye la materia seca de la raíz y de la planta (Figura 6).

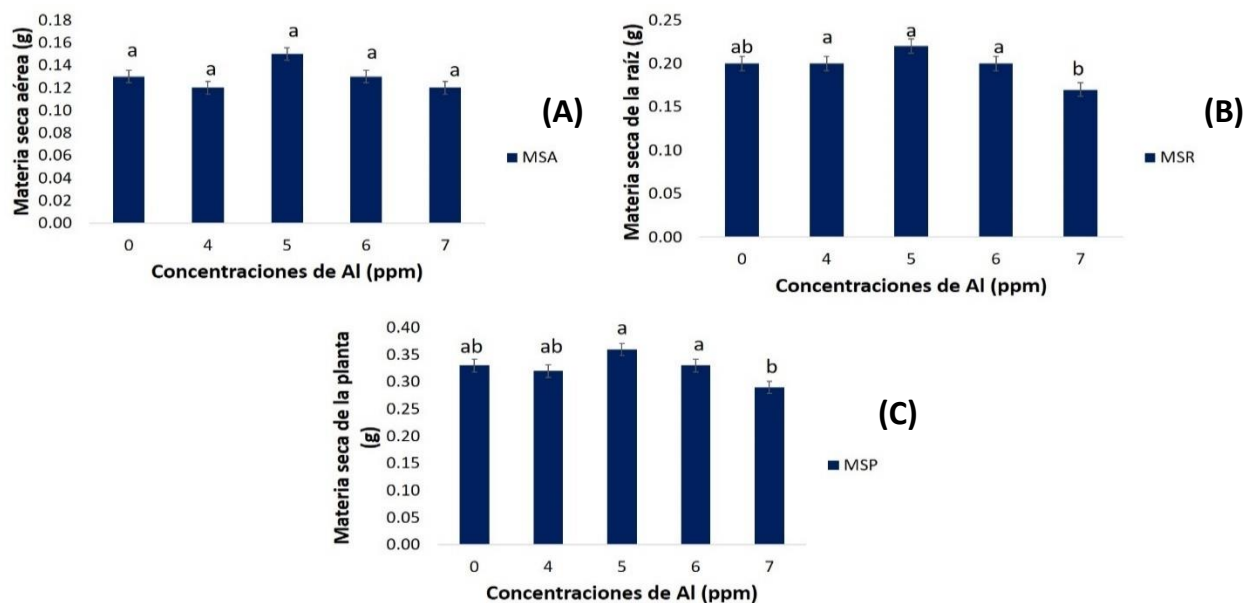


Figura 6. Efecto del Al^{3+} en la acumulación de materia seca aérea (A), materia seca de la raíz (B) y materia seca de la planta (C) en plántulas de maíz P4082W. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Para el genotipo Tuxpeño, la fracción de masa foliar presentó diferencia significativa, se estimó la mayor ganancia de biomasa foliar en las concentraciones de 5 y 6 ppm Al^{3+} , es decir, que el aluminio a concentraciones antes mencionadas contribuye a aumentar la ganancia foliar. En la fracción de masa de la raíz y la razón de la raíz/foliar, se estiman los mejores resultados en las concentraciones de 0 a 4 ppm de Al^{3+} . Para la longitud específica de la raíz, se estimó la mayor ganancia a concentraciones de 5 ppm de Al^{3+} (Figura 7).

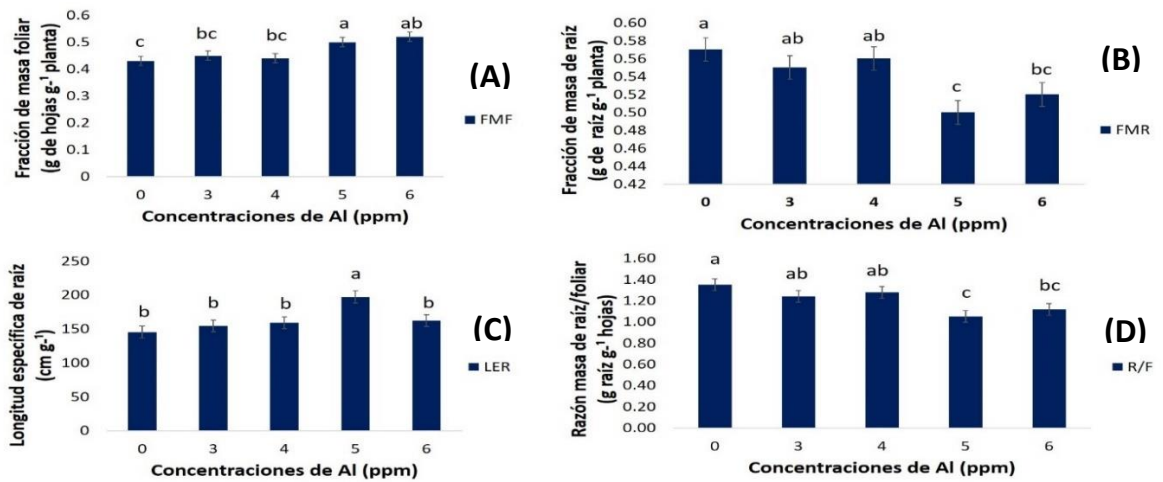


Figura 7. Efecto del Al^{3+} en la fracción masa foliar (A), fracción masa de la raíz (B), longitud específica de la raíz (C) y razón masa de raíz/foliar (D) en plántulas de maíz Tuxpeño. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Para el genotipo P4082W, la fracción de masa foliar, fracción de masa raíz y razón masa de raíz/foliar no presentaron diferencias significativas, es decir que, las plántulas se comportaron de igual manera en los cinco tratamientos evaluados. Sin embargo, la longitud específica de la raíz presentó diferencias significativas siendo los tratamientos de 4 a 7 ppm de Al^{3+} los que mostraron mejores resultados, es decir, que el Al^{3+} ha contribuido a obtener mejores resultados comparado con el testigo (Figura 8).

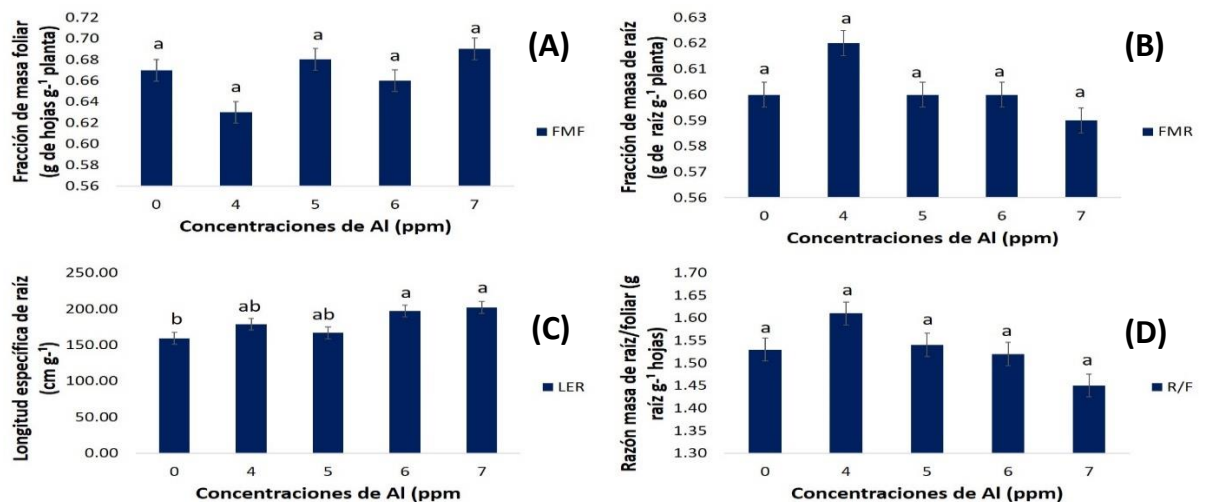


Figura 8. Efecto del Al^{3+} en la fracción masa foliar (A), fracción masa de la raíz (B), longitud específica de la raíz (C) y razón masa de raíz/foliar (D) en plántulas de maíz P4082W. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Para el genotipo Tuxpeño, la fluorescencia máxima se presentó en las concentraciones de 3 a 5 ppm Al^{3+} , sin embargo, la fluorescencia mínima se presentaron los mejores resultados en las concentraciones de 4 y 5 ppm. La máxima eficiencia fotosintética se registró en la concentración de 3 ppm de Al^{3+} , es decir, que el aluminio a bajas concentraciones contribuye a aumentar el rendimiento fotosintético, sin embargo, para la eficiencia máxima se registró en las concentraciones de 3 y 6 ppm de Al^{3+} (Figura 9).

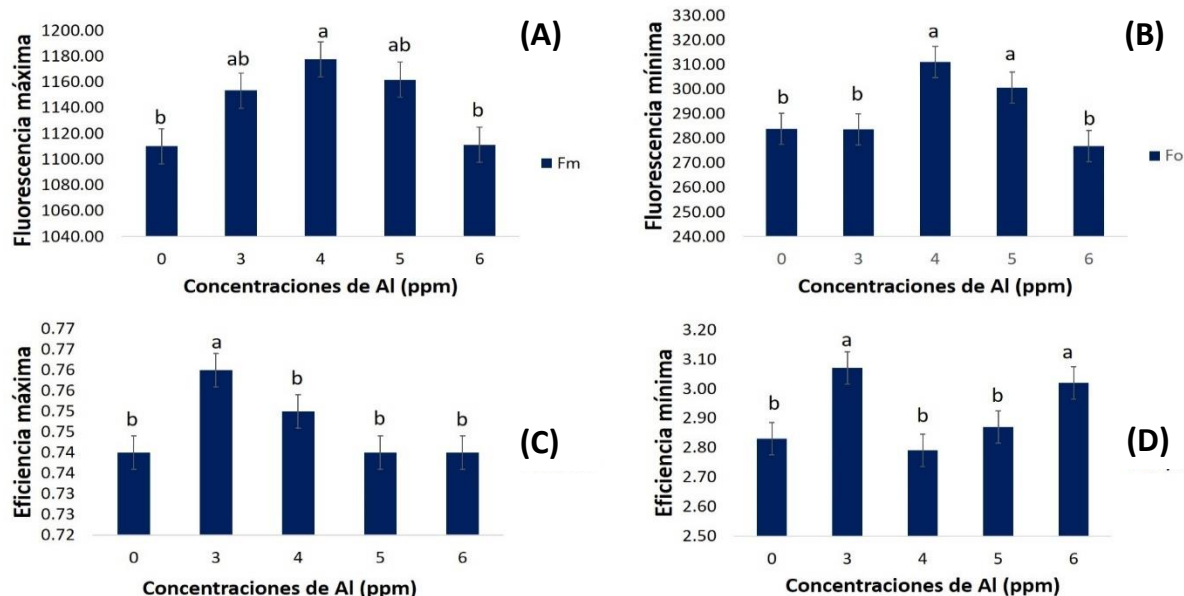


Figura 9. Efecto del Al^{3+} en la fluorescencia de la clorofila máxima (A), fluorescencia mínima (B) eficiencia máxima (C) y eficiencia mínima (D) en plántulas de maíz Tuxpeño. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Para el genotipo P4082W, la fluorescencia de la clorofila máxima y mínima, estadísticamente no presentaron diferencias significativas, es decir, que ambos tratamientos se comportaron igual. La máxima y mínima eficiencia fotosintética, presentaron diferencias significativas siendo los tratamientos 0 - 6 ppm de Al^{3+} donde se obtuvo los mejores resultados, es decir, que por encima de 6 ppm de Al^{3+} las plántulas de maíz disminuyen su eficiencia fotosintética (Figura 10).

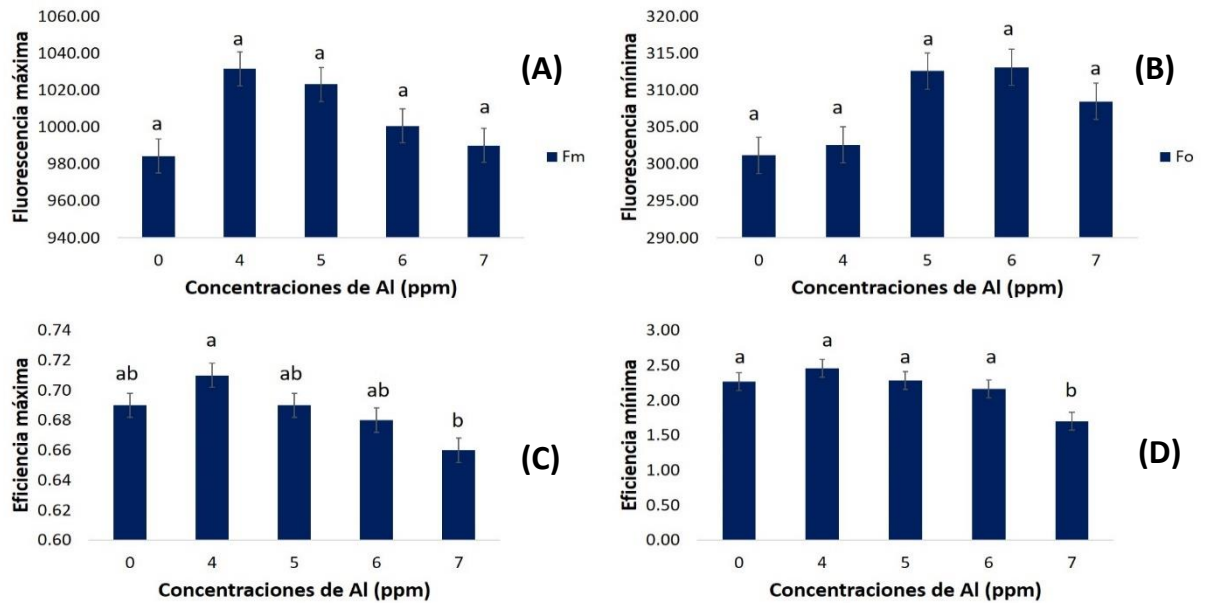


Figura 10. Efecto del Al^{3+} en la fluorescencia de la clorofila máxima (A), fluorescencia mínima (B) eficiencia máxima (C) y eficiencia mínima (D) en plántulas de maíz P4082W. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Los resultados obtenidos no concuerdan con Romero *et al.*, (2017) quienes mencionan que el Al^{3+} , cuando se aplica a las semillas a concentraciones que no superen la concentración de 1 ppm favorece el crecimiento foliar, la acumulación de masa seca en las raíces, así como la concentración de clorofilas en plántulas de maíz. Sin embargo, concuerdan con Casierra *et al.*, (2008) quienes mencionan que, la respuesta de las plantas a la toxicidad por Al^{3+} depende del grado de tolerancia o susceptibilidad de cada especie y de la concentración de este elemento en el medio. Así mismo, los resultados obtenidos en la investigación no coinciden con Gallardo (2005) quien menciona que el principal efecto de la toxicidad de Al^{3+} es la restricción del desarrollo radical, por lo cual la planta reduce el volumen de suelo que puede explorar, disminuyendo de este modo la absorción de nutrientes, de agua y reduciendo la producción de materia seca total. Chaffai *et al.*, (2005) mencionan que el Al^{3+} en general, reduce la producción de materia fresca y seca de la planta, en los tallos, la toxicidad por Al^{3+} disminuye el crecimiento de los brotes, siendo las plantas jóvenes más susceptibles que las plantas adultas, lo cual fue demostrado en arroz (*Oryza sativa*), café (*Coffea arabica*) y cebada (*Hordeum vulgare*) por lo que no concuerdan con los resultados obtenidos en la presente investigación.

4.2 Fase II

El análisis factorial de componentes principales permitió reducir la dimensionalidad de las variables en ambos experimentos a dos componentes que extrajeron el 68.4 y 71.9% de la varianza total.

Para el genotipo P4082W, el componente I estuvo caracterizado por las variables: fluorescencia mínima, máxima fluorescencia fotosintética, mínima fluorescencia fotosintética, materia seca de la raíz, fracción masa de la raíz, fracción masa foliar y relación y razón masa raíz/foliar. Mientras que el componente II estuvo caracterizado por las variables fluorescencia máxima, materia seca del tallo y materia seca de la planta.

Las variables número de hojas desarrolladas, altura de planta y fluorescencia máxima de clorofila tienden a aumentar con el uso de los microorganismos benéficos. La imbibición con ácido salicílico e inoculación con microorganismos benéficos y sin concentraciones de Al^{3+} , presentan una tendencia positiva para las variables de diámetro del tallo, fracción masa de raíz, razón masa raíz/foliar y materia seca de la raíz. La interacción de ácido salicílico y microorganismos benéficos presentan efectos positivos para las variables de contenido de clorofila, materia seca del tallo y materia seca de la planta (Figura 11).

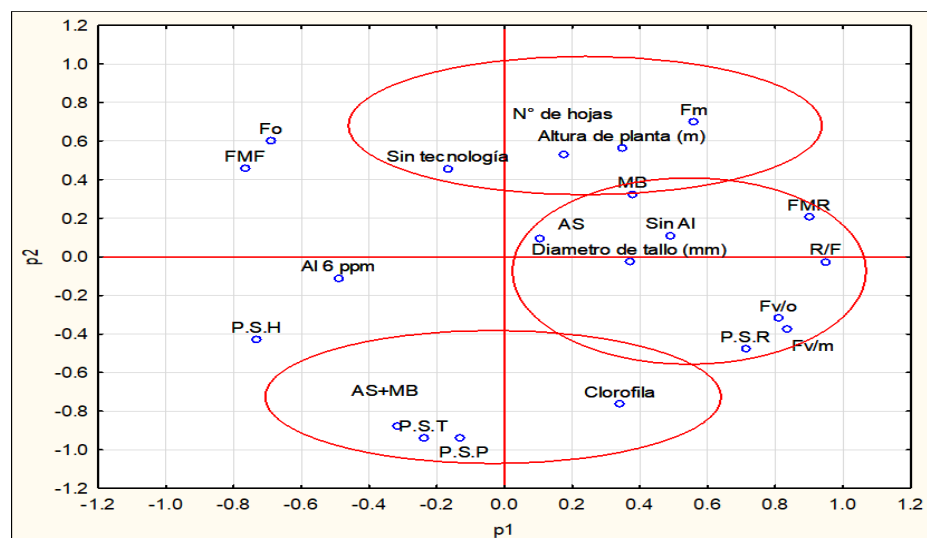


Figura 11. Distribución de las variables y tratamientos en el plano formado por los componentes I y II. Experimento con maíz P4082W a diversas tecnologías agroecológicas y concentraciones de Al^{3+} .

Para el genotipo Tuxpeño, el componente I estuvo correlacionado con el diámetro del tallo, contenido de clorofilas, materia seca foliar, materia seca del tallo y materia seca de la planta, el componente II estuvo caracterizado con altura de planta, fluorescencia mínima, eficiencia mínima fotosintética, materia seca de la raíz y razón masa raíz/foliar. Sin concentraciones de Al^{3+} , los microorganismos benéficos (Micorrizas y *Azospirillum*) presentan tendencias positivas para las variables altura de planta, fluorescencia de la clorofila, materia seca de raíz, razón masa raíz/foliar y fracción masa de la raíz. En el tratamiento con concentración de 5 ppm de Al^{3+} + AS, se observan tendencias positivas en las variables de fracción masa foliar y fluorescencia mínima de la clorofila (Figura 12).

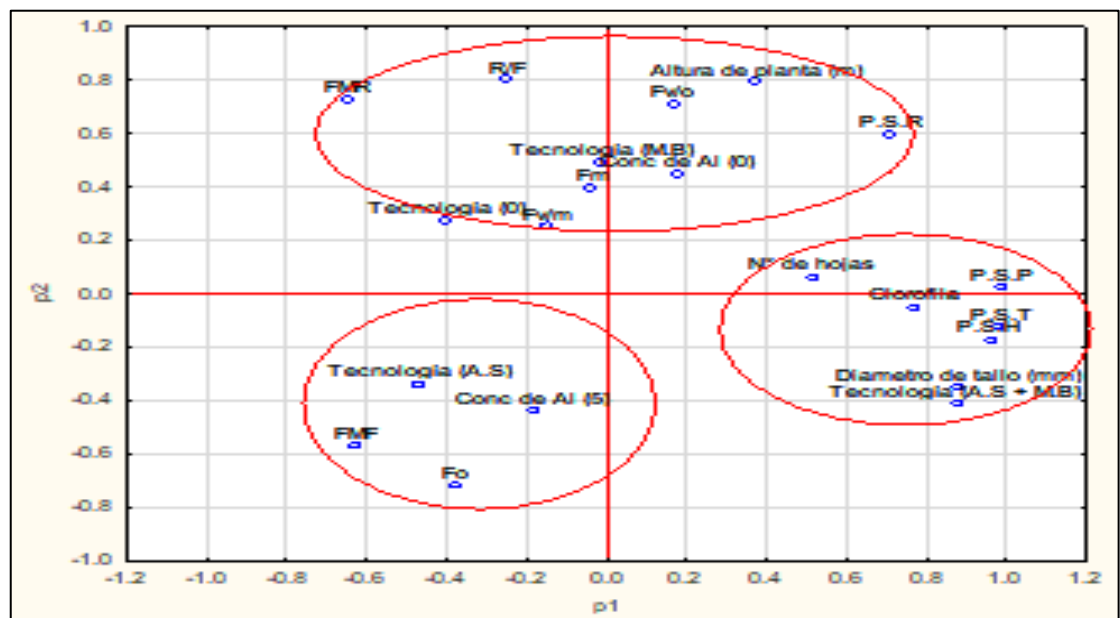


Figura 12. Distribución de las variables y tratamientos en el plano formado por los componentes I y II. Experimento con maíz Tuxpeño a diversas tecnologías agroecológicas y concentraciones de Al^{3+} .

Los resultados obtenidos concuerdan con Aguilar (2018) quien menciona que las micorrizas ayudan a mejorar el crecimiento de las plantas y el *Azospirillum* potencia este desarrollo. Así también, con Hhodary (2004) quien reportó que aplicaciones de

AS al maíz aumenta la actividad fotosintética, incrementa la biomasa seca y fresca de la parte aérea de la planta.

Casierra (2007) menciona que la colonización con micorrizas es un componente importante en la adaptación de las plantas a los suelos minerales ácidos con baja disponibilidad de fósforo y concentración alta de aluminio intercambiable, por lo que concuerda con los resultados obtenidos. Barrer (2009) presenta resultados similares en *Pinus rígida* inoculadas con micorrizas se encontraron niveles altos de fósforo y bajos de aluminio en las hojas, en comparación con plantas no micorrizadas.

5. CONCLUSIONES

Fase I. Las plántulas del genotipo local son más susceptibles a los efectos del Al^{3+} que las del genotipo híbrido. El Al^{3+} presenta toxicidad por encima de 5 ppm para el genotipo Tuxpeño y de 6 ppm para el genotipo P4082W.

Fase II. Reducir la dimensionalidad de las variables permite concluir que, las interacciones de las tecnologías agroecológicas tienen efectos sinérgicos para el crecimiento y desarrollo de las plantas mitigando los efectos del estrés causado por el Al^{3+} para ambos genotipos en condiciones semi controladas.

6. LITERATURA CITADA

- Ahemad, M. and M. Kibret. (2014). Mechanisms and applications of plant growth Promoting rhizobacteria: Current perspective. *J. King Saud Univ. Sci.* 26: 1-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>.
- Ali, B. (2015). Bacterial auxin signaling: Comparative study of growth induction in *Arabidopsis thaliana* and *Triticum aestivum*. *Turk J. Bot.* 39:1-9. doi: <https://doi.org/10.3906/bot1401-31>.
- Andrade. A. (2010). Micorrizas: antigua interacción entre hongos y plantas. *Revista Ciencia*. Recuperado de: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_4/PDF/11_MICORRIZAS.pdf
- Angulo, V. C., E. A. Sanfuentes, F. Rodríguez, and K. E. Sossa. (2014). Characterization of growth-promoting rhizobacteria in *Eucalyptus nitens* seedlings. *Rev. Argent. Microbiol.* 46: 338- 347. doi: [https://doi.org/10.1016/S0325-7541\(14\)70093-8](https://doi.org/10.1016/S0325-7541(14)70093-8).
- Arias, R. M., Romero, A. J., Bañuelos, J. y De La Cruz, Y. (2019). Inoculación de hongos solubilizadores de fósforo y micorrizas arbusculares en plantas de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 1747-1755. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.155>
- ASERCA (Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios). (2018). Maíz grano cultivo representativo de México. El portal único del gobierno. Recuperado de <https://www.gob.mx/aserca/articulos/maiz-grano-cultivo-representativo-de-mexico?idiom=es>
- Barrer, S. A. (2009). El uso de hongos micorrizicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*. 7(1). Pp. 123-132.
- Barreto, M., Bonifacio, A., Cerqueira, A. y De Araujo, F. (2016). Plant growth-promoting rizobacteria: Key mechanisms of action. *In: Choudhary y Varma (eds.). Microbial Mediated Induced Systemic Resistance in Plants*. Springer Science, Singapore. pp. 23-37. Recuperado de: [Microbial-mediated Induced Systemic Resistance in Plants - Google Libros](#)
- Bhattacharyya, P., Goswami, M. y Bhattacharyya, L. (2016). Perspective of beneficial microbes in agriculture under changing climatic scenario: A review. *Journal of Phytology* 8: 26-41. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/306253628_Perspective_of_beneficial_microbes_in_agriculture_under_changing_climatic_scenario_A_review_P_N_Bhattacharyya1_M_P_Goswami2_L_H_Bhattacharyya3_1Department_of_Mycology_and_Microbiology_Tocklai_Tea_Research

- Bhattacharyya, P. y Jha. D. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 28: 1327-1350. doi: <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>.
- Bellante, Laurel. (2017). "La doble exposición de los campesinos: políticas públicas y cambio climático". *La Jornada Ecológica* 212. <https://www.jornada.com.mx/2017/05/28/ecologica212.pdf>
- Casierra, F. (2001). Fundamentos fisiológicos, bioquímicos y anatómicos del estrés por aluminio en vegetales. *Revista Comalfi.* 28(2), pp. 8-19. Recuperado de: <file:///C:/Users/R/Downloads/Fundamentosanatomicosy fisiologicosaluminio.pdf>
- Casierra, F. (2002). Alteraciones inducidas por aluminio en el citoesqueleto de las plantas. *Revista Comalfi.* 29(2), pp. 23-30. Recuperado de: <file:///C:/Users/R/Downloads/Alteraciones por aliminio en el citoesqueleto.pdf>
- Casierra, F. y Cárdenas, J.F. (2007). Influencia del aluminio sobre el crecimiento de la raíz en coliflor (*Brassica oleracea* L., var. *Botrytis*, Hib. 'Nevada F1'). *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica.* 10(1), pp. 149-157.
- Casierra, F., Cárdenas, J. y Roa, H. (2008). The effect of aluminium on wheat (*Triticum aestivum* L.) and corn (*Zea mayz* L.) seed germination. *Orinoquia.* 12(1). Pp. 45-56. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=896/89612105>
- Casierra, F. y Cárdenas, J. (2009). Crecimiento de plántulas de maíz (*Zea mays* L. var. *Porva*) en solución nutritiva con baja relación (Ca+Mg+K)/Al. *Revista de Ciencias Agropecuarias y Biológicas,* 12 (2): 91-100.
- Casierra, F., & Aguilar, O. (2018). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas,* 1(2), 246-257. <https://doi.org/10.17584/rcch.2007v1i2.8701>
- Chaffai, R., Tekitek, A., & El Ferjani, E. (2005). Aluminum toxicity in maize seedling (*Zea mays* L.): Effects on growth and lipid content. *Journal of Agronomy,* 4(1), 67-74.
- Cuesta, J. (2020). Hongos micorrícicos. Ecología y hábitat de los hongos. Recuperado de: http://www.amanitacesarea.com/guia_ecologia3.html
- Delgado, M. (2020). Los microorganismos del suelo en la nutrición vegetal. Orius Biotech USA. Recuperado de: <https://www.oriusbiotech.com/escrito?nom=Los microorganismos del suelo en la nutri%C3%B3n vegetal>.
- Desai, S. A. (2017). Isolation and characterization of gibberellic acid (GA3) producing rhizobacteria from sugarcane roots. *Biosci. Discov.* 8: 488-494.

- Egamberdieva, D., Wirth, A., Alqarawi, E., Abd-Allah, F. y Hashem, A. (2017). Phytohormones and beneficial microbes: Essential components for plants to balance stress and fitness. *Front. Microbiol.* 8: 1-14. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02104>.
- Estrada, M. (2014). "Sustentabilidad y seguridad alimentaria en el sistema productivo de maíz en Chiapas". *Ciencia, Tecnología e Innovación para el Desarrollo en México* 153.
- Esquivel, L. Y. (2016). Participación de la enzima superóxido dismutasa y la producción de peróxido de hidrogeno en la tolerancia del aluminio en las suspensiones celulares de *Coffe arábica* L. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida Yucatán, México. Pp. 81. Recuperado de: [PCB_M_Tesis_2017_Chan_Campos_Julieta.pdf \(repositorioinstitucional.mx\)](http://repositorioinstitucional.mx/PCB_M_Tesis_2017_Chan_Campos_Julieta.pdf).
- Fahad, S. y Bano, A. (2012). Effect of salicylic acid on physiological and biochemical characterization of maize grown in saline area. *Pak. J. Bot.* 44(4). Pp. 1433-1438
- Fatima, R. N., Javed, F. y Wahid, A. (2014). Salicylic acid modifies growth performance and nutrient status of rice (*Oryza sativa*) under cadmium Stress. *Int. J. Agric & Biol.* 16(6) pp. 1083-1090
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS). Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). Base de datos de producción agropecuaria FAOSTAT. Disponible en <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>.
- Foyer, C., Rasool, J., Davey, W y Hancock, R. (2016). Cross-tolerance to biotic and abiotic stresses in plants: A focus on resistance to aphid infestation. *J. Exp. Bot.* 67: 2025-2037. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/erw079>.
- Gallardo A.F., Pino, B.M., Alvear, Z. M. y Borie B.F. (2005). Efecto del aluminio en la producción de materia seca y en la actividad nitrato reductasa de dos variedades de trigo, creciendo en soluciones nutritivas. *R C Suelo Nutr Veg.* 5(1): 30-36. Recuperado de: [file:///C:/Users/R/Downloads/vol5\(1\)30-31.pdf](file:///C:/Users/R/Downloads/vol5(1)30-31.pdf)
- García, J.M. (2018). ¿Qué efecto tiene en las pasturas la presencia de Aluminio en el suelo y en la planta? *De frente al campo*. <https://www.defrentealcampo.com.ar/que-efecto-tiene-en-las-pasturas-la-presencia-de-aluminio-en-el-suelo-y-en-la-planta/>
- García, P. J. (2017). El cultivo del maíz en el mundo y en Perú. *Revista De Investigaciones De La Universidad Le Cordon Bleu*, 4(2), 73-79. <https://doi.org/10.36955/RIULCB.2017v4n2.005>
- Galindo, G., Castillo, C., Campos, A. y Lara, C. (2015). Caracterización de las ectomicorrizas formadas por *Laccaria trichodermorphora* y *Suillus tomentosus* en *Pinus*

- montezumae. *Botanical Sciences*, 93(4), 855-863. Recuperado de: <https://doi.org/10.17129/botsci.200>
- Gouda, S., Kerry, G., Das, S., Paramithiotis, H., Shin, S. y Patra, J. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiol. Res.* 206: 131-140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
- Grageda, H., Díaz, A. y Vera, J. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3 (6). Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000600015.
- Gunes, A., Inal A., Alpaslan, M., Eraslan, F., Bagci, E. G. y Cicek, N. (2007). Salicylic acid changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. *J. Plant Physiol.* 164(6). Pp. 728-736.
- Hernández, L. G. y Escalona, M. A. (2003). Microorganismos que benefician a las plantas: las bacterias PGPR. *Revista de divulgación científica y tecnológica de la universidad veracruzana.* 16 (1). Recuperado de: <https://www.uv.mx/cienciahumano/revistae/vol16num1/articulos/microorganismos/micro.htm>
- INAFED (2010). Villa Corzo. Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Chiapas (versión electrónica). Chiapas, México: Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México., <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM07chiapas/municipios/07107a.html#:~:text=Limita%20al%20norte%20con%20Chiapa,oeste%20con%20Tonal%C3%A1%20y%20Villaflores.&text=Su%20extensi%C3%B3n%20territorial%20es%20de,altitud%20es%20de%20580%20m>.
- INECOL (El instituto de la ecología). (2020). Los microbios de las plantas, una mirada a la biotecnología. Recuperado de: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/699-los-microbios-de-las-plantas-una-mirada-a-la-biotecnologia>
- INTAGRI (2018). El aluminio y el desarrollo radical de los cultivos. Serie Nutrición Vegetal Núm. 49. Artículos técnicos de INTAGRI. México. 4 p. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/el-aluminio-y-el-desarrollo-radical-de-los-cultivos>.
- Iqbal, M. Z. y Shafiq M. (2005). Effects of aluminium on germination and growth of two different wheat cultivars. *Acta Bot Hung.* 49 (3). pp 315-321. Recuperado de: <http://real.mtak.hu/78028/>.

- Janda, K., Hideg, E., Szalai, G., Kovács, L. y Janda, T. (2012). Salicylic acid may indirectly influence the photosynthetic electron transport. *J. Plant Physiol.* 169(10). Pp. 971-978.
- Jones, D.L., Kochian, L.V. Y Gilroy, S (1998). Aluminum induces a decrease in cytosolic concentration in BY-2 tobacco cell cultures. *Plant Physiol.* 116. pp 81- 89.
- Kang, S. M., Waqas, M., Hamayun, S., Asaf, A. L., Khan, A., Kim, Y., Park, G. y Lee, J. (2017). Gibberellins and indole3-acetic acid producing rhizospheric bacterium *Leifsonia xyli* SE134 mitigates the adverse effects of copper-mediated stress on tomato. *J. Plant Interact.* 12: 373-380. doi: <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1370142>.
- Khan, M. S., Zaidi, A. y Wani, P. (2007). Role of phosphatesolubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A review. *Agron. Sustain. Dev.* 27: 29-43. doi: <https://doi.org/10.1051/agro:2006011>.
- Kloepper, J. W. y Schroth, M. N. (1978). Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. pp. 879-882. In: Proc. 4th Int. Conf. Plant Path. Bact. Vol. 12. Angers, France.
- López, W., Castro, M.I., Salinas, C.E., Reynoso, S.R y López, Jaime. (2016). Propiedades de los suelos cafetaleros en la Reserva de la Biósfera El Triunfo, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3). 607-618.
- López, M. (2019). “Evaluación de complejos micorrízicos asociados al cultivo de plántulas de café (*Coffea canephora*)” (Tesis de pregrado). UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO. Los ríos, Ecuador.
- López, W., Reynoso, R., López, J., Camas, R., Tasistro, A. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9 (1). Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007>
- Laili, N., Radziah, O. y Zaharah, S. (2017). Isolation and characterization of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and their effects on growth of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.). *Bangladesh Journal of Botany* 46(1): 277-282. Recuperado de: http://www.bdbotsociety.org/journal/journal_issue/2017%20March%20Supplementary/04.pdf
- Maheshwari, D., Dheeman, S. y Agarwal, M. (2015). Phytohormone-producing PGPR for sustainable agriculture. pp. 159-182. In: D. K. Maheshwari (ed.). *Bacterial metabolites in sustainable agroecosystem. Sustainable development and biodiversity*. Vol. 12. Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24654-3_7.
- Martín, R., Nexticapan, A. y Larqué, A. (2013). Potential benefits of salicylic acid in food production. In: Salicylic acid. Hayat, S.; Ahmad, A. and Alyemeni, M. N. (Eds.). *Springer publishers, Dordrech, The Netherlands*. Pp. 299-313.

- Mendoza, S., Aguilar, C., Galdámez, J., Gutiérrez, A. y Martínez, F.B. (2007). “Los suelos ácidos en la producción agrícola de la región Frailesca, Chiapas, México”. En Actas del I seminario de cooperación y desarrollo en espacios rurales iberoamericanos. Sostenibilidad e indicadores, editado por Alfredo Tolón Becerra y Xavier Lastra, 301-308. Almería: Universidad de Almería.
- Medina, L. R. (2016). La agricultura, la salinidad y los hongos micorrízicos arbusculares: una necesidad, un problema y una alternativa. *Cultivos Tropicales*. 37 (3). pp.42-49. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193246976004>
- Molina, D., Bustillos, O., Rodríguez, Y., Morales, Y., Santiago, M., Castañeda, L. y Muñoz, J. (2015). Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biológicas* 17: 24-34.
- Paramanandham, P., Rajkumari, J., Pattnaik, S. y Busi, S. (2017). Biocontrol Potential Against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and *Alternaria solani* and Tomato Plant Growth Due to Plant Growthpromoting Rhizobacteria. *International Journal of Vegetable Science* 23: 294-303.
- Perea, Y. C., Arias, R. M., Medel, R., Trejo, D., Heredia, G. y Rodríguez, Y. (2019). Effects of native arbuscular mycorrhizal and phosphate-solubilizing fungi on coffee plants. *Agroforestry Systems* 93. Pp. 961-972. DOI: [https://doi.org/10.1007/s10457-018-0190-](https://doi.org/10.1007/s10457-018-0190-0)
- Pizaña, H.A., Fletes, H.B. y González, A. A. (2019). Agronegocios y campesinos maiceros en la Frailesca: vulnerabilidad y resistencias* Agribusiness and maize peasants in Frailesca: vulnerability and resistances. *Revista de Desarrollo Económico Territorial*. Recuperado de: <https://revistas.flacsoandes.edu.ec/eutopia/article/download/3865/2702?inline=1>
- Porta, J., López, M., & Roquero, C. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid: Mundi-Prensa. Recuperado de: EDAFOLOGIA PARA LA AGRICULTURA Y EL MEDIO AMBIENTE (3ª ED.) | JAIME PORTA CASANELLAS | Comprar libro México 9788484761488 (casadellibro.com).
- Quiñones, E. E., Hernández, L. V., López, L. y Rincón, G. (2019). Efectividad de hongos micorrízicos arbusculares nativos de rizósfera de Agave como promotores de crecimiento de papaya. *Terra Latinoamericana*, 37(2), pp.163-174. Recuperado de: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.397>
- Ranum, P.; Peña, J.P y García, M.N. (2014). Global maize production, utilization, and consumption. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1312(2014). 105–112. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nyas.12396/epdf>.
- Razaq, M., Zhang, p., Shen, H. y Salahuddin. (2017). Influence of nitrogen and phosphorous on the growth and root morphology of Acer mono. *PLoS ONE* 12: 1-13. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171321>.

- Rivera, Y., Moreno, L., Herrera, M., & Romero, H. M. (2016). La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Palmas*, 37(1), 11-23.
- Rondon, I. S., Ramírez, W. F., Barato, P., & Eslava, P. R. (2007). Importancia del ciclo biogeoquímico del aluminio (Al) con relación con la acidez de los suelos en la producción piscícola y la salud pública ¿cuál sería el caso de la Orinoquia?. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*. 11(2). Pp. 81-94. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=896/89611209>
- Ryan, P., Tyerman, S., Sasaki, T., Furuichi, T., Yamamoto, Y., Zhang, W., & Delhaize, E. (2011). The identification of aluminium-resistance genes provides opportunities for enhancing crop production on acid soils. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 9-20.
- SAGARPA (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256429/B_sicoMa_z_Grano_Blanco.pdf
- Santos, P. (2014). Bacterias benéficas: Promotores biológicos de crecimiento para el cultivo de trigo. *Agricultureros Red de Especialistas en la Agricultura*. Recuperado de: <https://agricultureros.com/bacterias-beneficas-promotores-biologicos-de-crecimiento-para-el-cultivo-de-trigo>
- Saxena, J., Saini, A., Ravi, I., Chandra, S. y Garg, V. (2015). Consortium of Phosphate-solubilizing Bacteria and Fungi for Promotion of Growth and Yield of Chickpea (*Cicer arietinum*). *Journal of Crop Improvement* 29. Pp. 353-369. DOI: <https://doi.org/10.1080/15427528.2015.102797>
- Serralde, A. y Ramírez, M. (2014). Análisis de poblaciones de micorrizas en maíz (*Zea mays*) cultivado en suelos ácidos bajo diferentes tratamientos agronómicos. *Revista Corpoica*, 5(1). Pp. 31-40.
- Shahzad, R., Khan, A., Bilal, S., Waqas, M., Kang, S. y Lee, I. (2017). Inoculation of abscisic acid-producing endophytic bacteria enhances salinity stress tolerance in *Oryza sativa*. *Environ. Exp. Bot.* 136: 68-77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.010>
- SIAP. (2018). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Producción agrícola.
- Tavares, L. C., Araújo, R. C., De Oliva, S., Pich, B. A. y Amaral, V. F. (2014). Treatment of rice seeds with salicylic acid: seed physiological quality and yield. *J. Seed Sci.* 36(3). Pp. 352-356.
- Trabelsi, D. y Mhamdi, R. (2013). Microbial Inoculants and Their Impact on Soil Microbial Communities: A Review. *BioMed Research International Article ID 863240*: 1-11. Recuperado de:

https://scholar.google.com.mx/scholar?q=Microbial+Inoculants+and+Their+Impact+on+Soil+Microbial+Communities:+A+Review&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart.

- Triviño, A. L. (2017). Evaluación de los productos comerciales huxtable® y micorrizar® como biofertilizantes en el cultivo de fréjol caupí (*Vigna unguiculata* L.) en la finca experimental “La Cantaleta” Majua-Esmeralda (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Esmeraldas, Ecuador.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). (2010). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Intergovernmental committee for the safeguarding of the intangible cultural heritage, fifth session. Nairobi, 15-19 de noviembre.
- Vadakattu, G. (2012). Beneficial microorganisms for sustainable agriculture. *Official Journal of the Australian Society for Microbiology INC* 33(3): 113- 115. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/265511476_Beneficial_microorganisms_for_sustainable_agriculture
- Velázquez, M. S., Elíades, L., Irrazabal, G., Saparrat, M. y Cabello, M. (2005). Micobización con *Glomus mosseae* y *Aspergillus niger* en plantas de *Lycopersicon esculentum*. *Journal of Agricultural Technology* 1. Pp.315-326.
- Velázquez M. S., Cabello, M. N., Elíades, L. A., Russo, M. L., Allegrucci, N. y Schalamuk, S. (2017). Combinación de hongos movilizadores y solubilizadores de fósforo con rocas fosfóricas y materiales volcánicos para la promoción del crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista Argentina de Microbiología* 49. Pp. 347-355. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ram.2016.07.005>
- Wang J.W. y Kao C.H. (2005). Effect of aluminium on endosperm reserve mobilization in germinating rice grains. *Biol Plantarum*. 49 (3): 405-409. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/226990582_Effect_of_aluminium_on_endosperm_reserve_mobilization_in_germinating_rice_grains
- Wang, L., Fan, L., Loescher, W., Duan, W., Liu, G., Cheng, J. y Luo, S. L. (2010). Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. *BMC Plant Biology*. 10(34). Pp. 1-10
- Zaidi, A y Khan, M. S. (2006). Co-inoculation effects of phosphate solubilizing microorganisms and *Glomus fasciculatum* on green gram-*Bradyrhizobium*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 30. Pp. 223-230

7. ANEXOS

Cuadro 3. Cálculos para la preparación de la solución desinfectante con Hipoclorito de Sodio al 0.5 %

Formula: $C_1 V_1 = C_2 V_2$	
Cálculos:	
$C_1 = 100 \%$	$V_1 = \frac{(C_2)(V_2)}{C_1}$
$V_1 = 25 \text{ ml}$	$V_1 = \frac{(5 \%)(500 \text{ ml})}{100 \%}$
$C_2 = 05 \%$	$V_1 = 25 \text{ ml}$
$V_2 = 500 \text{ ml}$	

Cuadro 4. Cálculos para la preparación de la solución madre a 100 ppm de Al^{3+}

Sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)				
Elemento	Símbolo	Peso atómico	Moléculas	Total
Aluminio	Al	(26.9815)	(2)	53.9630
Azufre	S	32.0650	3	96.1950
Oxígeno	O	15.9994	20	479.9820
Hidrógeno	H	1.0079	36	36.2862
			Peso molecular	666.4262
$100 \text{ ppm}/666.4262 = 1.2350 \text{ g}$				

Cuadro 5. Cálculos para la preparación de las diluciones de Al^{3+} correspondiente a cada tratamiento

Concentración de Al^{3+}	Solución madre		Agua destilada
3 ppm	30 ml	+	970 ml
4 ppm	40 ml	+	960 ml
5 ppm	50 ml	+	950 ml
6 ppm	60 ml	+	940 ml
7 ppm	70 ml	+	930 ml

Cálculos:

Formula: $C_1 V_1 = C_2 V_2$

$C_1 = 100 \text{ ppm}$	$V_1 = \frac{(C_2)(V_2)}{C_1}$	$C_1 = 100 \text{ ppm}$	$V_1 = \frac{(C_2)(V_2)}{C_1}$
$V_1 = 30 \text{ ml}$		$V_1 = 40 \text{ ml}$	
$C_2 = 3 \text{ ppm}$	$V_1 = \frac{(3 \text{ ppm})(1000 \text{ ml})}{100 \text{ ppm}}$	$C_2 = 4 \text{ ppm}$	$V_1 = \frac{(4 \text{ ppm})(1000 \text{ ml})}{100 \text{ ppm}}$
$V_2 = 1000 \text{ ml}$	$V_1 = 30 \text{ ml}$	$V_2 = 1000 \text{ ml}$	$V_1 = 40 \text{ ml}$
$C_1 = 100 \text{ ppm}$	$V_1 = \frac{(C_2)(V_2)}{C_1}$	$C_1 = 100 \text{ ppm}$	$V_1 = \frac{(C_2)(V_2)}{C_1}$
$V_1 = 50 \text{ ml}$		$V_1 = 60 \text{ ml}$	

$$C_2 = 5 \text{ ppm}$$

$$V_2 = 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = \frac{(5 \text{ ppm})(1000 \text{ ml})}{100 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = \mathbf{50 \text{ ml}}$$

$$C_2 = 6 \text{ ppm}$$

$$V_2 = 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = \frac{(6 \text{ ppm})(1000 \text{ ml})}{100 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = \mathbf{60 \text{ ml}}$$

$$C_1 = 100 \text{ ppm}$$

$$V_1 = 70 \text{ ml}$$

$$C_2 = 7 \text{ ppm}$$

$$V_2 = 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = \frac{(C_2)(V_2)}{C_1}$$

$$V_1 = \frac{(7 \text{ ppm})(1000 \text{ ml})}{100 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = \mathbf{70 \text{ ml}}$$

Cuadro 6. Propiedades físicas y químicas del suelo

Propiedades Físicas		Propiedades Químicas	
Clase Textural	Franco Arcillo Arenoso	pH	5.04
Punto de Saturación	30.0 %	Carbonatos Totales	0.01 %
Capacidad de Campo	15.8 %	Salinidad	0.24 ds/m
Punto March. Perm	9.40 %		
Cond. Hidráulica	6.70 cm/hr		
Densidad aparente	1.29 g/cm ³		