



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL

**EVALUACIÓN DE MICROORGANISMOS BENÉFICOS
EN EL CULTIVO DE MAÍZ**

REPOSITORIO

Que presenta:

Walther Jesus Torres Cab

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable

Director de tesis:

Dr. Arturo Reyes Ramírez

Conkal, Yucatán, México.

Diciembre, 2023



TecNM

Conkal, Yucatán, México, a 12 de Diciembre de 2023

El comité de tesis del candidato a grado: Walther Jesus Torres Cab, constituido por los CC. Dr. Arturo Reyes Ramírez, Dr. Esaú Ruiz Sánchez, Dr. Horacio Salomón Ballina Gómez, Dr. Gabriel A. Lugo-García, y Dr. Ismael Tucuch-Hass. Habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: **Evaluación de microorganismos benéficos en el cultivo de maíz**, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable, según lo establece el Capítulo 2, inciso 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentada en el examen de grado correspondiente.

ATENTAMENTE



Dr. Arturo Reyes Ramírez
Director de Tesis



Esaú Ruiz Sánchez
Codirector de Tesis



Dr. Horacio Salomón Ballina
Gómez
Asesor de Tesis



Dr. Gabriel A. Lugo-García
Asesor de Tesis



Dr. Ismael Tucuch-Hass
Asesor de Tesis



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Conkal
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Conkal, Yucatán, México, a 12 de diciembre de 2023

DECLARATORIA DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de materiales y métodos, resultados y discusión de este documento, es producto del trabajo de investigación realizado durante mi estudio de posgrado y con base en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Conkal. En virtud de lo manifestado reconozco que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de lo correspondiente a dicha información son propiedad de la citada institución educativa.

Walther Jesus Torres Cab

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por brindarme el apoyo económico para mis estudios de Doctorado.

Al Dr. Arturo Reyes Ramírez y al Dr. Esaú Ruiz Sánchez por sus puntuales contribuciones a este trabajo, su paciencia, su dedicación, su disponibilidad, por la motivación con base en su ejemplo. Pero sobre todo por brindarme su confianza y buen consejo en los momentos que más los necesité.

Al comité de tesis conformado por el Dr. Horacio Salomón Ballina Gómez, el Dr. Gabriel A. Lugo-García, y el Dr. Ismael Tucuch-Hass, por sus aportaciones, conocimientos, objetividad, por su tiempo y honestidad durante el desarrollo de este trabajo.

A los profesores y personal de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Nacional de México, campus Conkal, por su calidad humana, abrirme las puertas y brindarme sus valiosos conocimientos, apoyo y consejo para la realización de la presente investigación.

Sobre todo, a mis amigos de toda la vida, a mi familia y a aquellas personas que compartieron conmigo este viaje. A todos les agradezco.

A mi esposa Gabriela porque siempre ha estado en cada una de las etapas de este proceso principalmente por el apoyo incondicional y motivarme a seguir adelante gracias por nuestro hermoso bebé "Adonay".

A mi hijo por ser mi motivación día a día para seguir adelante mejorar en lo personal y profesionalmente.

V. INDICE DE CONTENIDO

VI. ÍNDICE DE CUADROS Y/O FIGURAS.

I.....	CAPÍTULO
Introducción.....	9
Figura 1. Estrategia experimental basada en dos regiones de la península de Yucatán, con la aplicación de entomopatógenos y HMA. Así como la descripción de la aplicación de los productores.	21
2.3	
II.CAPÍTULO 2. Field evaluation of microbial insecticides against Fall armyworm, <i>Spodoptera frugiperda</i> (Boddie) and Ear worm, <i>Heliothis zea</i> (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae), in maize.	29
Table 2. Maize growth and development stages (Espinoza 2001).....	35
Table 3. Leaf damage induced by the fall army worm <i>Spodoptera frugiperda</i> in maize treated with microbial insecticides in Becal, Campeche.	37
Table 4. Leaf damage induced by the fall army worm <i>Spodoptera frugiperda</i> in maize treated with microbial insecticides in Muna, Yucatan. Two treatments were applied, the first at V3 growth stage and the second at V7 growth stage of maize.	37
Table 5. Percentages of ears damaged by the ear worm <i>Helicoverpa zea</i> in maize treated with microbial insecticides in two sites of the Yucatan Peninsula.	39
Table 6. Grain yield in maize treated with microbial insecticides against fall armyworm <i>Spodoptera frugiperda</i> and ear worm <i>Helicoverpa zea</i> in two sites of the Yucatan Peninsula.....	40
III.CAPÍTULO 3. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth, yield, and damage by the Fall Armyworm (<i>Spodoptera frugiperda</i> Smith Lepidoptera: Noctuidae).....	48
Table 1. Characteristics and macro and micronutrient content of the soil.....	51
Table 2. Description of the AMF treatments applied to seeds of maize variety Chichen Itza.	52
Table 3. Effect of seed inoculation with commercial AMF on the percentage of root colonization and the density of colonization by AMF (visual scale 0-5) in maize at 35 days after sowing (V6 growth stage).	54
Table 4. Effect of seed inoculation with commercial AMF on biomass	

accumulation at 35 days after sowing (V6 growth stage), grain yield and grain weight in maize.	55
Table 5. Effect of seed inoculation with commercial AMF on the percentage of damaged plants and the degree of leaf damage to maize leaves by <i>Spodoptera frugiperda</i> in two strata of the plants.	56
Table 6. Effect of seed inoculation with commercial AMF on leaf thickness and leaf toughness in maize at R1 growth stage.	57
IV.CAPÍTULO 4. Efecto de hongos micorrícicos arbusculares en la fisiología y contenido mineral del cultivo de maíz.	65
Tabla 1. Características y contenido de macro y micronutrientes del suelo.	68
Tabla 2. Descripción de los HMA como tratamiento de semillas de maíz variedad Chichén Itzá.	69
Tabla 3. Efecto de la inoculación de semillas con HMA comerciales sobre el intercambio de gases en maíz a los 35 días después de la siembra (etapa de crecimiento V6).	71
Tabla 5. Efecto de la aplicación de micorrizas en el contenido de microelementos en el follaje del maíz.	73
Tabla 6. Efecto de la aplicación de micorrizas en el contenido de macroelementos minerales en el grano de maíz.	74
Tabla 7. Efecto de la aplicación de micorrizas en el contenido de microelementos minerales en el grano de maíz.	75
V CONCLUSIONES GENERALES.	85

VII. Resumen.

En el cultivo de maíz, las plagas, especialmente del orden Lepidóptera, como el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y el gusano elotero (*Helicoverpa zea*), causan considerables pérdidas económicas. Aunque su daño se centra en el maíz, su capacidad polífaga afecta otros cultivos. Para abordar estas plagas de manera eficiente y sostenible, es crucial comprender sus dinámicas poblacionales y desarrollar estrategias de control. El uso de microorganismos entomopatógenos y promotores del crecimiento, como hongos, bacterias y virus, se destaca como alternativa, denominados 'biopesticidas', presentando beneficios para la salud, el medio ambiente y la seguridad alimentaria.

Esta investigación parte de la hipótesis de que los insecticidas microbianos en condiciones de campo ofrecen protección comparable al benzoato de emamectina para controlar *S. frugiperda* y *H. zea* en el cultivo de maíz. Además, se evalúa el efecto de microorganismos benéficos (hongos y bacterias) en crecimiento, desarrollo, productividad y control de plagas en el maíz. El estudio se divide en tres etapas experimentales. La primera evalúa organismos entomopatógenos en el cultivo, observando su impacto en la supresión del daño causado por los gusanos. La segunda etapa, en campo, examina el efecto de estos organismos en la supresión de plagas y su influencia en el rendimiento. La tercera sección se centra en hongos micorrícicos arbusculares (HMA) inoculados en semillas, analizando sus beneficios en parámetros fotosintéticos y la acumulación de elementos en el follaje y granos de maíz.

Esta estrategia no solo busca controlar las plagas, sino también mejorar la productividad del cultivo de manera beneficiosa para la salud de las plantas, el medio ambiente y la seguridad alimentaria. La investigación subraya el potencial de los biopesticidas y los HMA como prácticas sostenibles en la producción de maíz.

VIII. Abstract.

In corn cultivation, pests, especially from the Lepidoptera order, such as the fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) and the corn earworm (*Helicoverpa zea*), cause considerable economic losses. Although their damage primarily targets corn, their polyphagous nature affects other crops. To address these pests efficiently and sustainably, it is crucial to understand their population dynamics and develop control strategies. The use of entomopathogenic microorganisms and growth promoters, such as fungi, bacteria, and viruses, stands out as an alternative, referred to as 'biopesticides,' offering benefits for plant health, the environment, and food security.

This research is based on the hypothesis that microbial insecticides under field conditions provide protection comparable to emamectin benzoate for controlling *S. frugiperda* and *H. zea* in corn cultivation. Additionally, the study evaluates the effect of beneficial microorganisms (fungi and bacteria) on the growth, development, productivity, and pest control in corn. The study is divided into three experimental stages. The first assesses entomopathogenic organisms in the crop, observing their impact on suppressing damage caused by the worms. The second stage, conducted in the field, examines the effect of these organisms on pest suppression and their influence on yield. The third section focuses on arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculated in seeds, analyzing their benefits on photosynthetic parameters and the accumulation of elements in the foliage and corn grains.

This strategy aims not only to control pests but also to enhance crop productivity in a manner beneficial to plant health, the environment, and food security. The research emphasizes the potential of biopesticides and AMF as sustainable practices in corn production.

I. CAPÍTULO Introducción

En el cultivo de maíz existen diferentes plagas que causan pérdidas económicas considerables, sin embargo se ha caracterizado al orden Lepidóptera como el que presenta la plagas de mayor importancia a nivel mundial y nacional como son el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith)) y el gusano elotero (*Helicoverpa zea*) del maíz sin embargo el daño casado por estas plagas se limita a el maíz ya que se ha reportado causantes de daños a otros cultivos de cereales y vegetales (Andrews, 1980) esto se debe a las características polífagas que presentan a estos insectos (Goergen *et al.*, 2016; Prassana *et al.*, 2018).

El control químico es el método utilizado para disminuir el daño causado por las plagas, pero este método trae como consecuencias contaminación ambiental, daño a la salud humana, reducción de los enemigos naturales, entre otros factores (Cao *et al.*, 2011). En la búsqueda de alternativas eficientes y sustentables es importante conocer la dinámica poblacional de las plagas para cada región y posteriormente realizar estrategias de control por medio del uso de microorganismos entomopatógenos y promotores del crecimiento y desarrollo, aumento de la productividad y de la resistencia a plagas en los cultivos de importancia económica; ya que este tipo de técnicas puede ser una opción viable para ayudar a las plantas en su productividad con benéficos hacia la salud, el medio ambiente además de aumentar la producción y así contribuir a la seguridad alimentaria. (Carballo 2002; García *et al.*, 2012; Ruther, 2014).

En varias regiones de México, se han realizado estudios en el control de lepidópteros con agentes de control microbiano, principalmente de hongos (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*) y bacterias (*Bacillus thuringiensis*) (Alatorre *et al.*, 2000; Rodríguez y Arredondo, 2007; Hernández *et al.*, 2011). También se han desarrollado estudios de caracterización morfológica y molecular de microorganismos nativos (García

et al., 2011; Andrade *et al.*, 2020) destacando su importancia como agentes de control biológico, contribución al conocimiento en la diversidad de estos grupos y a la importancia en el equilibrio ambiental.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Origen del maíz

Existe diferentes granos de suma importancia a nivel mundial entre ellos se encuentra el maíz descrito nativo de América, cuyo centro original de domesticación fue Mesoamérica, el cual se distribuye en todo el continente. Existen diferentes puntos de vista sobre cuándo se empezó a domesticar el maíz, sin embargo, los indígenas mexicanos dicen que esta planta representa, para ellos, diez mil años de cultura (Casanova-Pérez, et al 2019).

Se menciona que el maíz presenta una historia de hace aproximadamente 9,000 años en el continente americano, al sur del altiplano Central y norte del Balsas Central entre Teloloapan, Arcelia y Valle de Bravo a una altitud de entre 900 y 1,400 msnm (Lazos y Chauvet, 2011). Uno de los puntos importantes referente a este grano es la modificación genética de las características que ocurrió entre los 7,000 y 8,000 años, ya que al principio el teosinte conocido como el ancestro del maíz, se consumían las cañas jóvenes a través de la masticación o fermentación para obtener su azúcar (Anderson y Cutler, 1942).

Existen diferentes nombres con los que se conoce al maíz que depende de la cultura y el idioma que se maneje en cada sitio determinado; por ejemplo, pueblos indígenas de Cuba lo conoce como mahís, para el caso del nombre maya de este cereal es x-im o xiim, y a las mazorcas se las denomina naal. En quichua se llama sara (Asturias, 2004) esto se debe a las bondades que presenta, una gran área de adaptación bajo diversas condiciones ecológicas y edáficas como lo demuestra el hecho de cultivarse desde Canadá hasta Argentina, o sea prácticamente en todos los países de América, además que tiene

amplio aprovechamiento en el consumo humano y animal, así como en la industria. Se le puede explotar para uno u otro aspecto, o en varios, en forma de producto principal y subproductos.

1.2.2 Parientes silvestres del maíz

El género *Zea* perteneciente a la familia Gramínea o Poaceas al cual pertenece el maíz, se ha caracterizado que sus parientes silvestres son el teosinte (también, teocinte, teocintle o teosintle) además en esta familia se clasifican a importantes cultivos agrícolas como el trigo, arroz, avena, sorgo, cebada y caña de azúcar. La clasificación botánica que se ha dado al género *Zea* los ha dividido en dos secciones el cual hace referencia en caracteres la espiga o inflorescencia masculina (Doebley e Iltis, 1980).

La sección Luxuriantes agrupa cuatro especies, los teocintles perennes (*Z. diploperennis* y *Z. perennis*) y los anuales *Z. luxurians* y *Z. nicaraguensis* (Iltis -Benz, 2000); y la sección *Zea* que se circunscribe a una sola especie (*Z. mays*), dividida en cuatro subespecies: el maíz (*Z. mays* subsp. *mays*) y los teocintles anuales (*Z. mays* subsp. *Mexicana*, *Z. mays* subsp. *parviglumis* y *Z. mays* subsp. *huehuetenanguensis*). A excepción del *Z. nicaraguensis* y el *Z. mays* subsp. *huehuetenanguensis*, los teocintles son endémicos a México, aunque algunos con distribución muy restringida, como los teocintles perennes que sólo están presentes en algunos sitios de la Sierra de Manantlán en Jalisco (Sánchez *et al.*, 2000).

1.2.3 Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica del maíz lo ubica como una planta monocotiledónea, cultivada a lo largo de todo el mundo, que se utiliza como uno de los alimentos de consumo básico en muchas poblaciones y regiones. Perteneciente a la familia de las Poáceas, de la tribu Maydeas (Sánchez, 2014).

Reino: Vegetal

División: Tracheophyta

Clase: Angiosperma

Subclase: Monocotiledonea

Orden: Graminales

Familia: Graminae

Género: *Zea*

Especie: *Z. mays*

1.2.4 Importancia del cultivo de maíz

México es el centro de origen y domesticación del maíz este cultivo es de importancia por el valor cultural, social y económico que representa para la sociedad, además esta gramínea presenta una capacidad de adaptación a diversas condiciones geográficas y climáticas esta característica lo ha posicionado como uno de los alimentos más importantes que existen a nivel mundial (Wellhausen *et al.*, 1952; Ortega, 2003; Lazos y Chauvet, 2011).

Existen reportes sobre la cantidad de diferentes materiales de el género *Zea* por casi 50 razas, los cuales presentan características especiales de uso y adaptación a las diferentes factores bióticos , abióticos y sistemas de producción Benz (1993). Otros autores señalan que son 41 las razas puras de maíz (Ortega et al. 1991) en tanto que Sánchez et al., (2000) menciona que son 59 razas de maíz, Louette (1996) destaca que la diversidad genética del maíz en México es un proceso dinámico, existiendo miles de variedades de más de 30 razas que se transportan e intercambian constantemente entre localidades y regiones a veces separadas por grandes distancias (Altieri y Masera 1993).

Estas características presentes en el maíz ha desatacado la intensa interacción genética ambiental, que le ha permitido adaptarse a ambientes sumamente diferentes, a temperaturas que fluctúan los 26 C° hasta los 12.5 C° otra característica es la capacidad de cultivarse en alturas que varían entre el nivel del mar y 4000 m de altitud, la alta capacidad de adaptación a distintos tipos de suelos, con ciclos de crecimiento que varían entre tres y doce meses.

También ha contribuido eficazmente a aumentar el rendimiento del maíz sembrado en las zonas altas de las regiones templadas, así como la resistencia a la sequía e incrementos del contenido proteínico del grano.

La diversidad ambiental de las regiones montañosas mexicanas abarca una riquísima diversidad de espacios productivos. Los productores de maíz han aprendido a identificar los diferentes parámetros a esta diversidad de sistemas agroecológicos (Nadal, 2000).

En cuanto a su descripción la planta del maíz es de porte robusto de fácil desarrollo, de producción anual, el tallo es simple y erecto, de elevada longitud, pudiendo alcanzar los cuatro metros de altura, sin ramificaciones, por su aspecto recuerda al de una caña, no presenta entrenudos y sí una medula esponjosa, si se realiza un corte transversal (SIAP, 2018).

Las características del ciclo vegetativo tiene un rango muy amplio según las variedades, encontrado algunas tan precoces con alrededor de 80 días, hasta las más tardías con alrededor de 200 días desde la siembra hasta la cosecha. Sin embargo se ha caracterizado a las variedades de mayor rendimiento de 100 a 140 días; menos de 100 días se limita la producción de grano y/o de forraje verde o en base a materia seca; más de 140 días de ciclo vegetativo hay una afectación porque esas variedades ocupan demasiado tiempo el terreno de cultivo. Del rango de más o menos 80 a casi 200 días, lo óptimo, considerando todos los factores que intervienen en la producción y la convivencia económica para el agricultor (Robles, 1982).

La reproducción de este cultivo se efectúa mediante una espiga o inflorescencia masculina que presenta una panícula (vulgarmente denominada espigón o penacho) de coloración amarilla que posee una cantidad muy elevada de polen en el orden de 20 a 25 millones de granos, en cada florecilla que compone la panícula se presentan tres estambres donde se desarrolla el polen. La mazorca o inflorescencia femenina marca un menor contenido en granos de polen alrededor de los 800 o 100 granos y se forman en unas estructuras vegetativas denominadas espádices que se disponen de forma lateral, las hojas son largas de gran tamaño, lanceoladas, alternas; se encuentran abrazadas al tallo y por el haz presentan vellosidades, los extremos de las hojas son muy afiladas y cortantes, las raíces son fasciculadas y su misión es la de aportar un perfecto anclaje a la planta, en algunos casos sobresalen unos nudos de las raíces a nivel del suelo (SIAP, 2018).

El maíz se siembra en más de 8 millones de hectáreas, que representa 39 % de la superficie agrícola nacional y 63 % de la superficie sembrada con granos y oleaginosas; esto nos da a conocer la importancia económica acerca de este cultivo, y que a su vez contribuye con 8 % del producto interno de la agricultura.

Por otra parte, cabe resaltar que es fuente de empleo por la cantidad de fuerza de trabajo que se necesita para su desarrollo y manejo. Cabe mencionar que en 2006 y 2010 se importaron 8 y 10 millones de toneladas de grano de maíz, lo que pone a este alimento a la cabeza de las importaciones de productos agrícolas de México (Luna *et al.*, 2012).

1.2.5 Importancia de los lepidópteros plagas en maíz

El orden lepidóptero es un grupo de insectos conocidos como mariposas, o palomillas. Son considerados fitófagos de importancia en el cultivo de maíz ya que afectan el desarrollo y crecimiento de las plantas (Reséndiz *et al.*, 2016), una de las plagas más importantes de este grupo es el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* Smith) por

el daño que causan al atacar a la planta principalmente desde etapas tempranas de desarrollo, sin embargo, esta especie puede estar presente en el maíz durante todo su ciclo biológico (Rangel *et al.*, 2014).

Por otra parte, se ha mencionado *Helicoverpa zea* como una plaga que se presenta en la última etapa de desarrollo del maíz alimentándose de las mazorcas y espigas inmaduras, sin embargo, su daño no se limita al maíz ya que se describe como una especie polifitófaga, debido a que las larvas han sido señaladas atacando hojas y frutos de más de 100 especies. La característica principal de esta plaga es el daño directo que causan las larvas al alimentarse de los estigmas de la mazorca por consecuencia favorece el ingreso de patógenos y otros insectos. Por tal motivo es considerada la plaga de mayor ocurrencia en maíz y causa pérdidas de hasta 15 % en el rendimiento (Capinera, 2008).

1.2.6 Biología y daños de lepidópteros del maíz

Spodoptera frugiperda y *Helicoverpa zea* son dos plagas que pertenecen a la familia Noctuidae esta es considerada una de las familias con mayor diversidad, ya que se han estimado alrededor de 35 000 especies en el mundo (Poole, 1989; Yela y Kitching, 1999); el Neótrópico cuenta con una gran diversidad de especies debido a eso se han descrito que contiene alrededor de 8 539 especies (Brown, 1996; Lamas, 2000).

Los caracteres principales del gusano cogollero son que presenta seis instar. Las larvas causan daños al consumir follaje. Inicialmente los primer instar consumen tejido foliar desde un lado, dejando intacta la capa epidérmica opuesta.

En el segundo o tercer estadio, las larvas comienzan a hacer agujeros en las hojas y comen desde el borde de las hojas hacia adentro. La alimentación en la espiral de maíz a menudo produce una fila característica de perforaciones en las hojas. Las densidades de las larvas generalmente se reducen a una o dos por planta cuando las larvas se alimentan muy cerca unas de otras, debido al comportamiento caníbal. Las larvas más viejas causan

una defoliación extensa, a menudo dejando solo las costillas y los tallos de las plantas de maíz, o una apariencia irregular y rasgada (Marenco *et al.*, 1992).

Para el caso del gusano elotero los huevos se depositan, generalmente en pelos de hojas y maíz. Al eclosionar, las larvas deambulan por la planta hasta encontrar un sitio de alimentación adecuado, normalmente este es la parte reproductiva del maíz la mazorca. Las larvas jóvenes no son caníbales, así que varias larvas pueden alimentarse juntas inicialmente. Sin embargo, cuando se van desarrollando se vuelven muy agresivos, asesinos y caníbales otras larvas. En consecuencia, es muy común encontrar solo una larva en cada mazorca de maíz. Normalmente, pasa por seis estadios de desarrollo sin embargo no es raro encontrar cinco o siete estadios (Capinera, 2000).

1.2.7 Problemática del uso de insecticidas químicos para el control de lepidópteros

Un punto importante en esta práctica, además de implicar en sí misma severos daños al ambiente y a la salud humana, es que ha contribuido indiscutiblemente al desarrollo de poblaciones resistentes a diferentes clases de insecticidas, incluidos organofosforados, carbamatos, piretroides y benzoilureas (Yu, 1992; Díez-Rodríguez y Omoto, 2001; Yu *et al.*, 2003).

Por otra parte, la utilización de estos productos se encuentra limitada por las características y hábitos que presentan las larvas, ya que estas se encuentran protegidas dentro del cogollo y pistilos del maíz, y de este modo se dificulta el control con aplicaciones de insecticidas (Burtet *et al.*, 2017).

Por último, cabe resaltar un factor muy importante es la gran cantidad de áreas dedicadas al cultivo de maíz, lo que ha llevado a tener tasas elevadas de infestación de *Spodoptera frugiperda* y *Helicoverpa zea* debido a eso una mayor pérdida económica esto ha generado el uso generalizado y a veces indiscriminado de insecticidas químicos para su control (Carvalho *et al.*, 2013).

1.2.8 Insecticidas microbiales para el manejo de larvas de lepidóptera

A lo largo de la historia se describió las consecuencias y daños que causan las plagas de importancia agrícola sin embargo con la aparición de los insecticidas químicos se logró controlar numerosos insectos plaga (Téllez-Jurado *et al.*, 2009). Esto se incrementó por la eficacia en el control que ejercían sobre dichas plagas sin tomar en cuenta el grave daño que estos productos ocasionaban al medioambiente y a los seres vivos (Asaff *et al.*, 2002). Por tal motivo a principios del siglo pasado surgió una nueva forma de combate de plagas con la ventaja de ser eficaz y no causar daños al medioambiente, fue el control biológico, que se basa en la utilización de enemigos naturales y sus productos para reducir las poblaciones de plagas.

Dentro esta estrategia de control, se encuentran las aplicaciones de bioinsecticidas que se componen de ingredientes naturales. Sin embargo, dicho compuesto debe ser una combinación correcta de materiales o ingredientes de tal manera que el ingrediente activo, junto con los otros componentes, dé como resultado un producto estable, seguro y fácil de aplicar (Sawicka y Couch, 2002). Según los reportes que se han realizado el organismo más empleado como ingrediente activo en los diseños de estas formulaciones por su alta efectividad en los insectos plaga, principalmente pertenecientes al orden Lepidóptera son *Bacillus thuringiensis*, los hongos *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae*.

Estos agentes microbianos presentan la ventaja de ausencia de toxicidad en los seres humanos, en muchos de los enemigos naturales de diversas plagas, en otros vertebrados y en las plantas, así como un espectro de acción reducido, lo que indica que puede ser altamente específico para una plaga determinada (Santiago-Álvarez y Quesada-Moraga, 2001).

Una de las alternativas que ha presentado mucho auge es el manejo de microorganismos entomopatógenos que se presentan en los cultivos de manera natural como reguladores de insectos estos son los hongos, bacterias, virus, nematodos, pesticidas

biológicos, también conocidos como 'biopesticidas' (Glare *et al.*, 2012). Estos tipos de productos presentan bondades al no ser nocivos para la salud además en función de su perfil toxicológico y tienen menores requisitos de registro en comparación con pesticidas químicos (Leahy *et al.*, 2014).

Esta característica los posiciona como una de las alternativas de control de plagas ya que como se ha mencionado anteriormente no causan perjuicios de salud humana y ambiental, resistencia insecticida; otra de las bondades es que cumplen con los estándares para los mercados de exportación y por eso actualmente se ha desencadenado un crecimiento global del control biológico y otros productos no químicos (Bale *et al.*, 2008; Czaja *et al.*, 2015).

En el transcurso del tiempo se han realizado numerosos trabajos con los diferentes tipos de microorganismos benéficos que se utilizan para el control de biológico de plagas uno de los más recientes es el realizado por (Viteri *et al.*, 2019) en donde tuvo como objetivo evaluar la eficacia de dos agentes de control biológico, y sus tratamientos para controlar *Heliothis virescens* (Lepidóptera: Noctuidae) en 2017 y 2018 en donde reportan una eficiencia en el rendimiento por parte de los agentes de control biológico. Por su parte León *et al.*, (2018) evaluaron la acción del hongo *Metarhizium anisopliae*, la bacteria *Bacillus thuringiensis*, y sus interacciones en el control de *Spodoptera frugiperda*. Donde obtuvieron resultados favorables en la aplicación al mostrar su efecto controlador en poblaciones de larvas de *S. frugiperda*.

1.2.9 Características de los hongos micorrízicos arbusculares

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son biótrosos obligados, que viven en simbiosis en las raíces de aproximadamente el 80 % de las especies de plantas. La mayoría de los HMA forman esporas en el suelo que son capaces de germinar y crecer desde un estado de reposo en respuesta a diferentes condiciones edáficas y ambientales, pero son incapaces de producir micelio extenso y completar su ciclo de vida sin establecer

una simbiosis funcional con una planta huésped (Mosse, 1959; Hepper y Smith, 1976).

Los cambios clave en el desarrollo que ocurren en el organismo fúngico, desde la germinación de una espora individual hasta la formación de una extensa red de hifas en el suelo, involucran una secuencia de eventos morfogénicos representados por: germinación de esporas y crecimiento micelial pre-simbiótico, diferenciación de hifas patrón de ramificación en presencia de raíces hospederas, formación de apresorios, colonización de raíces, desarrollo de arbusculos, crecimiento extraradical del micelio y producción de esporas (Giovannetti 2000).

1.2.10 Respuesta entre plantas y HMA

Los HMA son organismos que se han reportado diferentes respuestas entre las combinaciones de especies de plantas y de HMA, la morfología, fisiología, estado nutricional de las plantas, la eficiencia simbiótica de HMA, así como la expresión de genes relacionados a la nutrición, son algunos de los parámetros que se ven modificados (Bucher, 2006; Smith *et al.*, 2011; Hong *et al.*, 2012). Particularmente, las proteínas transportadoras de la familia Pht1 ha mostrado participar en múltiples roles de adquisición y translocación de Pi durante diferentes condiciones de crecimiento y etapas de desarrollo en las plantas, así como durante la simbiosis con HMA (Loth-Pereda *et al.*, 2011).

1.2.11 Uso de HMA en el cultivo de maíz

En *Z. mays* L. han sido recientes los estudios dirigidos a investigar la respuesta del crecimiento vegetal, los cambio en la modificación fisiológica, las variables de respuestas microbiológicas y/o la expresión de genes Pht1, desplegada entre plantas asociadas a HMA y desarrolladas bajo diferentes concentraciones de Pi (Wright *et al.*, 2005; Hao *et al.*, 2014; Augé *et al.*, 2016). Sin embargo, mucho de los patrones de diversidad funcional entre cultivares aun no son del todo elucidados, principalmente aquellos relacionados con los cambios a nivel transcripcional de genes Pht1 que son inducidos por HMA o por condiciones deficientes de P en los suelos, así como su posible efecto en el desarrollo

morfo/fisiológico de sus plantas hospederas.

1.3 Hipótesis

H1. Los insecticidas microbianos en condiciones de campo ofrecen una protección similar a la del benzoato de emamectina para el control *Spodoptera frugiperda* y *Helicoverpa zea* en el cultivo de maíz.

H2. Las plantas de maíz inoculadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) (*Glomus* spp.) tienen un mayor crecimiento y rendimiento que las plantas no inoculadas, además ofrecen una mejor respuesta al daño de *S. frugiperda*.

H3. La aplicación de HMA mejora la actividad fotosintética, transpiración, uso eficiente del agua y contenido de clorofilas, así como aumenta la absorción mineral (micro y macro elementos) de las plantas de maíz.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Evaluar el efecto de los microorganismos benéficos (hongos y bacterias) en el crecimiento, desarrollo productividad y control de plagas en el cultivo de maíz.

1.4.2 Específicos

1. Evaluar bacterias y hongos entomopatógenos comerciales en el control de *Spodoptera frugiperda* y *Helicoverpa zea* en el cultivo de maíz.
2. Evaluar hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la acumulación de biomasa, productividad y daño por *Spodoptera frugiperda* en maíz.
3. Evaluar hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la acumulación de elementos minerales y fisiología del cultivo de maíz.

1.5 Procedimiento experimental

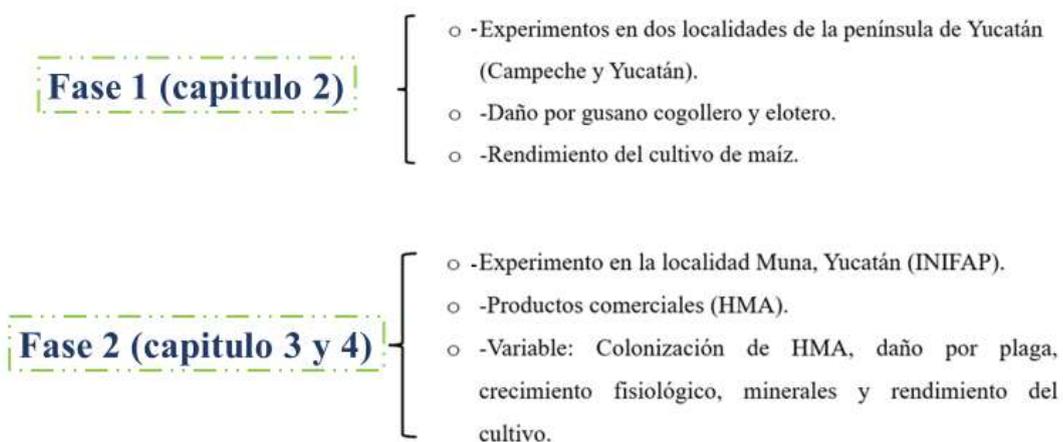


Figura 1. Estrategia experimental basada en dos regiones de la península de Yucatán, con la aplicación de entomopatógenos y HMA. Así como la descripción de la aplicación de los productores.

1.6 Literatura citada

- Andrade, L. F. E., A. C. J. Rabanales., E. S. Royano y M. D. J. A. Chávez (2020). Evaluación bactericida de metabolitos de *Bacillus* spp. aisladas de muestras de suelo. *Journal of Basic Sciences*, 5(15).
- Alatorre R., Bravo H., Leyva J., y Huerta A. (2000). Manejo Integrado de Plagas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. pp 12
- Anderson, E.F., Cutler, H.C., 1942. Races of *Zea mays*: I. their recognition and classification. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 29, 69–88.
- Asturias, Miguel A. 2004 “Maíz de alimento sagrado a negocio del hambre”. Ecuador – Quito: HIVOS. Benz, B. F. 2001 “Archaeological evidence of teosinte domestication from Guilá Naquitz”. *PNAS*, 98 (4): 2104-2106
- Asaff, TA., VY. Reyes., VE, López L., y MM. De la Torre. 2002. Guerra entre insectos y microorganismos: una estrategia natural para el control de plagas. *Avance y Perspectiva*, México 21: 291-295.
- Andrews, K. L. 1980. The whorlworm, *Spodoptera frugiperda*, in Central America and neighboring areas. *Fla. Entomol.* 63 (4): 456-467.
- Augé, R.M., H.D. Toler, A.M. Saxton. 2016. Mycorrhizal stimulation of leaf gas exchange in relation to root colonization, shoot size, leaf phosphorus and nitrogen: A quantitative analysis of the literature using meta-regression. *Front. Plant. Sci.*7:1084.
- Bucher, M. 2007. Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytol.* 173(1):11-26.
- Bale, J., J. Van Lenteren & F. Bigler. 2008. Biological control and sustainable Food production. 2008. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 363: 761-776.
- Brown Jr, K. S., 1996. Diversity of brazilian *Lepidoptera*: history of study, methods for

- measurement, and use as indicator for genetic, specific and system richness, pp. 221-253. En: Bicudo C. E. de M.; Menezes, N. A. (Eds.). Biodiversity in Brazil. A first approach. São Paulo
- Burtet, L., Bernardi, O., Melo, A., Pes, M., Strahl, T., & Guedes, J. (2017). Managing fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), with Bt maize and insecticides in south Brazil. *Pest Management Science*, 73(12), 2569–2577.
- Casanova-Pérez, L., Martínez-Dávila, J. P., López-Ortiz, S., y Rosales-Martínez, V. (2019). Mercantilización del maíz en un contexto político y de cambio climático en el trópico subhúmedo mexicano. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 16(83). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr16.83.mmcp>
- Capinera, J. L., 2000. Corn earworm, *Helicoverpa* (= *Heliothis*) *zea* (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae). Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. EENY-145 (IN302).
- Capinera, J. L. 2008. Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). En: *Encyclopedia of Entomology*. Editorial Board, USA. Pp. 1409-1412.
- Carvalho, R., Omoto, C., Field, L., Williamson, M., & Bass, C. (2013). Investigating the Molecular Mechanisms of Organophosphate and Pyrethroid Resistance in the Fall Armyworm *Spodoptera frugiperda*. *PLoS ONE*, 8(4), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062268>.
- Carballo, M. 2002. Manejo del picudo del plátano (*Cosmopolites sordidus*). In: Rosales FE; Pocasangre, LE. (Eds.). *Oferta tecnológica de banano y plátano para América Latina y el Caribe: una contribución de MUSALAC a la investigación y desarrollo de las musáceas*. Turrialba - Costa Rica: INIBAP. 17-18 p.
- Czaja, K., Góralczyk, K., Struciński, P., Hernik, A., Korcz, W., Minorczyk, M., Ludwicki, J. K. (2015). Biopesticides –towards increased consumer safety in the

- European Union. Pest Management Science, 71(1), 3-6. doi: 10.1002/ps.3829.
- Cao, S., Hu, Z., Zheng, Y., Yang, Z., Lu, B., 2011. Effect of BTH on antioxidant enzymes radical-scavenging activity and decay in strawberry fruit. Food Chemistry 125, 145-149.
- Diez-Rodríguez, G. I., and C. Omoto. 2001. Herança da resistência de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) a lambdacialotrina. Neotrop. Entomol. 30: 311-316.
- Glare, T., Caradus, J., Gelernter, W., Jackson, T., Keyhani, N., Köhl, J., Marrone, P., Morin, L. and A. Stewart. 2012. Have biopesticides come of age? Trends in Biotechnology, 30(5): 250–258.
- Goergen, G., Kumar, P.L., Sankung, S.B., Togola, A. & Tamò, M. (2016) First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa. PLoS ONE 11(10), e0165632. doi: 10.1371/journal.pone.0165632
- García D., A.; Arenas B., Y.; Bustillo P., A. E.; Castro V., U. 2012. Selección de hongos entomopatógenos para controlar salivazos de la caña de azúcar en Colombia. Revista Colombiana de Entomología 38 (2): 252-259.
- García, G. M. A.; Cappello, G. S.; Leshner, G. J. M.; Molina, M. R. F. 2011. Aislamiento y caracterización morfológica de los hongos entomopatógenos *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae*. Horizonte Sanitario 10:21-28.
- Hernández-Velázquez V. M., Z. Cervantes Espíndola, F. J. Villalobos; L. L. García y G. Peña Chora. (2011). Aislamiento de hongos entomopatógenos en suelo y sobre gallinas ciegas (Coleoptera: Melolonthidae) en agroecosistemas de maíz. Acta Zoológica Mexicana (n. s.), 27(3): 591-599.
- Hong, J.J., Y.S. Park, A. Bravo, K.K. Bhattarai, D.A. Daniels, M.J. Harrison. 2012. Diversity of morphology and function in arbuscular mycorrhizal symbioses

in *Brachypodium distachyon*. *Planta*. 236:851-865.

Hao, X.J., J.P. Hong, T.Q. Zhang, J.R. Li, W.J. Gao, Z.M. Zheng. 2014. Effects of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation and phosphorus (P) addition on maize P utilization and growth in reclaimed soil of a mining area. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 45(18):2413-2428.

Lazos C., E., y M. Chauvet. 2011. Análisis del contexto social y biocultural de las colectas de maíces nativos en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México D. F.

Leahy, J., Mendelsohn, M., Kough, J., Jones, R., & Berckes, N. (2014). Biopesticide oversight and registration at the us Environmental Protection Agency. Recuperado de <https://goo.gl/vyHUqe>.

Lamas, G. 2000. Estado actual del conocimiento de la sistemática de los lepidópteros, con especial referencia a la Región Neotropical. *Pribes 2000. Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa* 1: 253-260

Luna M., BM., MA. Hinojosa R., OJ. Ayala G., y F. Castillo G. 2012. Perspectivas de desarrollo de la industria semillera de maíz en México. *Rev. Fitotec. Mex.* 35: 1-7.

Loth-Pereda, V., E. Orsini, P.E. Courty, F. Lota, A. Kohler, L. Diss, D. Blaudez, M. Chalot, U. Nehls, M. Bucher, F. Martin. 2011. Structure and expression profile of the phosphate Pht1 transporter gene family in mycorrhizal *Populus trichocarpa*. *Plant Physiol.* 156(4):2141-2154.

Marenco RJ, Foster RE, Sanchez CA. 1992. Sweet corn response to fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) damage during vegetative growth. *Journal of Economic Entomology* 85:1285–1292.

Prasanna BM, Joseph Huesing E, Regina Eddy, Virginia MP. Fall armyworm in Africa:

- A Guide for Integrated Pest Management, First Edition. Mexico, 2018. 4(3):302-305.
- Poole, R. W. 1989. *Lepidopterorum catalogus. Noctuidae*, E. J. Brill, Leiden, The Netherlands. New York. 118: 1013 p.
- Ortega, PR. 2003. Diversidad de maíz en México: Causas, estado actual y perspectivas. In: Sin Maíz no hay País, Esteva G y C Marielle (eds.). Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, Dirección General de Culturas Populares e Indígenas México, D. F. pp: 123-154.
- Reséndiz, RZ., JA. López S., E. Osorio H., DB. Estrada., JA. Pecina M., MC. Mendoza C., y MA. Reyes. 2016. Importancia de la resistencia del maíz nativo al ataque de larvas de lepidópteros. *Temas de Cienc. y Tecnol.* 20:3-14.
- Rangel N., JC., MF. Vázquez R., y MC. Del Rincón C. 2014. Caracterización biológica y molecular de cepas exóticas de Baculovirus SfNPV, con actividad bioinsecticida hacia una población mexicana del gusano cogollero del maíz *Spodoptera frugiperda* (Lepidóptera: Noctuidae). *Interciencia.* 39: 320-326.
- Ruther, J. (2014) Pheromone Research--Still Something to Write Home About. *Journal of chemical ecology* 40(3): 215.
- Rodríguez L. A., Arredondo H. C. (2007). Libro: Teoría y Aplicación del Control Biológico. Sociedad Mexicana de Control Biológico, México. pp. 303
- Sánchez, J. J., Goodman, M. M., y Stuber, C. W. (2000). Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economy Botany*, 54(1), 43-59. <https://doi.org/10.1007/BF02866599>
- Santiago A., C., y ME. Quesada. 2001. Empleo de *Bacillus thuringiensis* en los sistemas agrícolas. In: Bioinsecticidas: fundamentos y aplicaciones de " *Bacillus thuringiensis*" en el control integrado de plagas. Caballero, P., y Ferré., J. (Eds). Universidad pública de Navarra y Phytoma. Valencia. pp.189-216.

- Sawicka, EM., y TL. Couch. 2002. Formulations of entomopathogens. In: Pesticides formulations and Application. System: Third Symposium, ASTM STP; Edited by Kaneko, T.M.; American Society for Testing and Materials; Philadelphia pp. 5-11.
- SIAP. 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera / Gobierno / gob.mx (www.gob.mx)*
- Smith, S.E., I. Jakobsen, M. Grønlund, F.A. Smith. 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: Interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiol.* 156(3):1050-1057.
- Tellez J., A., MG. Cruz R., Y. Mercado F., A. Asaff Torres., y A. Arana C. 2009. Mecanismos de acción y respuesta en la relación de hongos entomopatógenos e insectos. *Rev. Mex. Micol.* 30: 73-80.
- Viteri, DM., L. Sarmiento., AM. Linares., and I. Cabrera. 2019. Efficacy of biological control agents, synthetic insecticides, and their combinations to control tobacco budworm [*Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae)] in pigeon pea. *Crop Protection* 122: 175-179.
- Wellhausen, EJ., LM. Roberts., and E. Hernandez X. In collaboration with P.C. Mangelsdorf. 1952. Races of maize in México. The Bussey Institution of Harvard University, Cambridge, Massachusetts. 223 p.
- Wright, D.P., J.D. Scholes, D.J. Read, S.A. Rolfe. 2005. European and African maize cultivars differ in their physiological and molecular responses to mycorrhizal infection. *New Phytol.* 167(3):881-896.
- Yela, J. L y Kitching, I. J. 1999. Evolución y filogenia de Arthropoda. Sección III: Artropodiana. La filogenia de nóctuidos, revisada (Insecta: Lepidoptera:

Noctuidae). Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa (S. E. A.) 26:
485508

Yu, S. J., Nguyen, S. N y Abo-Elghar, G. E. 2003. Biochemical characteristics of insecticide resistance in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. Pest Biochem. Physiol. 77: 1-11.

Yu, S. J. 1992. Detection and biochemical characterization of insecticide resistance in fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). J. Econ. Entomol. 85: 675-691.

II. CAPÍTULO 2. Field evaluation of microbial insecticides against Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Boddie) and Ear worm, *Heliothis zea* (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae), in maize.

Capítulo publicado en Archives of Phytopathology and Plant Protection

<https://doi.org/10.1080/03235408.2022.2114780>

Walther Torres-Cab¹, Esau Ruiz-Sanchez¹, Arturo Reyes-Ramírez¹, Gabriel A. Lugo-García², Ismael Tucuch-Hass³, Jacques Fils Pierre¹.

¹*Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, Avenida Tecnológico S/N, Municipio de Conkal, 97345. Conkal, Yucatán, México.* ²*Colegio de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calle 16 y Avenida Japaraqui, 81110. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, Mexico.* ³*Campo Experimental Mocochoá, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km 25 antigua carretera Mérida-Motul, 97454, Mocochoá, Yucatán, México.*

* Corresponding autor: Esau Ruiz-Sánchez. Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Conkal. Avenida Tecnológico s/n, Conkal, Yucatán, C.P. 97345, México. Tel. 52 (999) 912 4135 Ext. 121, email: esau.ruiz@itconkal.edu.mx.

2.1 Abstract.

Two of the most damaging pests in maize production are the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) and the ear worm *Helicoverpa zea* (Boddie, 1850). To manage these pests, chemical insecticides have been widely used, and little attention has been paid to the use of microbial insecticides. In the present study, commercial formulation of two entomopathogenic fungi (*Metarhizium anisopliae* Metschnikoff and *Beauveria bassiana* Balsamo) and two subspecies of *Bacillus thuringiensis* (*Bacillus Thuringiensis* subsp. *Kurstaki* and *Bacillus*

thuringiensis subsp. *aizawai*) were evaluated against *S. frugiperda* and *H. zea* under field conditions at two locations of the Yucatan Peninsula, Becal and Muna. In Becal, *M. anisopliae* and *B. bassiana* had similar effectiveness than emamectin benzoate in the suppression of leaf damage by *S. frugiperda*. These treatments also caused a decrease in the ear damage by *H. zea*. In Muna, all microbial insecticides had similar effectiveness than emamectin benzoate in the decrease of leaf damage by *S. frugiperda*. All the microbial insecticides were also effective in protecting ears from *H. zea* (6.6-8.8 % ear damage). Plants treated with the microbial insecticides had similar grain yield and grain weight than those treated with emamectin benzoate. The microbial insecticides can potentially play a significant role in the management of *S. frugiperda* and *H. zea* in the maize production in the Yucatan Peninsula.

Keywords: Entomopathogenic organisms; Lepidoptera larvae; Maize pests

III. CAPÍTULO 3. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth, yield, and damage by the Fall Armyworm (*Spodoptera frugiperda* Smith Lepidoptera: Noctuidae)

Esaú Ruiz-Sánchez¹, Walther J. Torres-Cab¹, Arturo Reyes-Ramírez^{1*}, Horacio S. Ballina-Gómez¹, Gabriel A. Lugo-García², J. Ismael Tucuch-Haas³, Roberto R. Ruiz-Santiago¹, Jacques Fils Pierre¹.

¹*Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, Avenida Tecnológico S/N, Municipio de Conkal, 97345. Conkal, Yucatán, México.*

²*Colegio de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calle 16 y Avenida Japaraqui, 81110. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México.*

³*Campo Experimental Mocochoá, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km 25 antigua carretera Mérida-Motul, 97454, Mocochoá, Yucatán, México.*

*Corresponding author: arturo.reyes@itconkal.edu.mx; Tel.: +52 999 912 41 35 Ext. 122

3.1 Abstract.

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can help plants to grow and withstand biotic stress. The objective of this study was to evaluate the effects of seed inoculation with commercial formulation of AMF on maize biomass accumulation, grain yield, leaf traits and damage by the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith). The experiment was set under field conditions in a completely randomized block design to evaluate four commercial formulations (Biotech, Glumix, M300 and Suppra) of AMF. Our results showed that mycorrhizal inoculation increased the density of colonization by AMF compared to non-inoculated control plants. Biomass accumulation (shoot and root) in plants was significantly promoted by the

AMF inoculation. Significant difference in grain yield was only observed in plants treated with Glumix relative to those of the non-inoculated control plants. Plants inoculated with AMF had lower level of leaf damage by *S. frugiperda* than non-inoculated control plants. These findings suggest that seed inoculation with AMF may enhance maize growth and grain yield, while also reducing the *S. frugiperda* damage in the leaves.

Keywords: mycorrhizal inoculant; Fall Armyworm; microbial inoculation; maize yield; pest damage.

IV. CAPÍTULO 4. Efecto de hongos micorrícicos arbusculares en la fisiología y contenido mineral del cultivo de maíz

Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the physiology and mineral content of corn crops

Walther Jesús Torres-Cab1, Esaú Ruiz-Sánchez1*, Jorge Ismael Tucuch-Haas2, Arturo Reyes-Ramírez1, Horacio Ballina-Gómez1 and Gabriel Antonio Lugo-García3

¹*Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, Avenida Tecnológico s/n, C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México.*

²*Campo Experimental Mocochoá, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km 25 antigua carretera Mérida-Motul, 97454, Mocochoá, Yucatán, México.*

³*Colegio de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calle 16 y Avenida Japaraqui, 81110. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México.*

*Email: esau.ruiz@itconkal.edu.mx *Corresponding autor*

4.1 Abstract.

Background: The use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) is an effective alternative for the physiological development of corn, optimizing nutrition, and increasing yield. Objective: To assess the impact of AMF on the physiological development and accumulation of micro and macro mineral elements in corn cultivation. Methodology: Experimental plots were established in field conditions to evaluate the effect of AMF application on physiological parameters and mineral accumulation in corn leaves and grains. Results: In gas exchange variables, plants inoculated with the mycorrhizal fungi BIOTECH, GLUMIX, M300, and SUPRA showed a higher percentage of vesicles. Despite no significant impact on grain element concentration, a notable role of calcium was observed. This underscores the relevance of calcium in the development of key

structures in corn grains. Implication: Although the application of AMF did not significantly affect grain element concentration, the study highlights the positive influence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on element content in corn plants, particularly in foliage. Macroelements such as phosphorus (P), potassium (K), sulfur (S), and calcium (Ca) exhibited significant differences at 35 days, with higher concentrations in the Glumix, M300, and SUPRA treatments. Conclusion: The research emphasizes the positive impact of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on the content of elements in corn plants, specifically in foliage. Notably, macroelements like phosphorus, potassium, sulfur, and calcium showed significant differences, with higher concentrations in selected AMF treatments after 35 days.

Keywords: HMA; IRGA; μ -X-Ray Fluorescence (μ -XRF)..