

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Patogenicidad De *Fusarium* spp. En Poblaciones Criollas De Maíz Morado Peruano

Por:

XÓCHITL GUADALUPE HERNÁNDEZ HUERTA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Octubre, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Patogenicidad En *Fusarium* spp. En Poblaciones Criollas De Maíz Morado Peruano

Por:

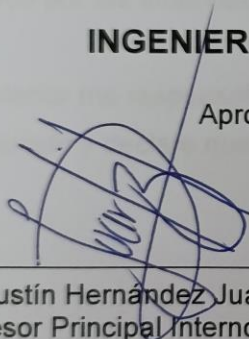
XÓCHITL GUADALUPE HERNÁNDEZ HUERTA

TESIS

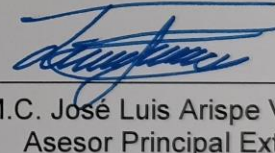
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

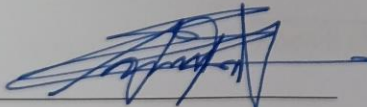
Aprobada por el Comité de Asesoría:



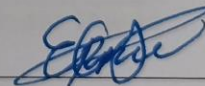
Dr. Agustín Hernández Juárez
Asesor Principal Interno



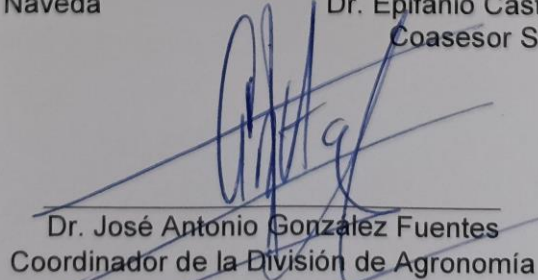
M.C. José Luis Arispe Vázquez
Asesor Principal Externo



Dr. Antonio Flores Naveda
Coasesor



Dr. Epifanio Castro del Ángel
Coasesor Suplente



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Octubre, 2021



Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante

Xóchitl Guadalupe Hernández Huerta

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por darme vida, llenarla de bendiciones y darme sabiduría, por ser mi apoyo y mi fortaleza en mis momentos de debilidad.

A la gloriosa Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por abrirme sus puertas y darme oportunidad de ser parte de ella, por ser una institución llena de oportunidades y excelentes profesores, por enriquecerme de conocimientos y sobre todo por darme los mejores años de mi vida acompañada de grandiosos amigos.

A mi asesor, Dr. Agustín Hernández Juárez por ser mi profesor en algunas materias, por confiar en mí y darme la oportunidad de trabajar con él desde la prestación de mi servicio social y por la oportunidad brindada para el desarrollo de mi tesis.

Al M.C. José Luis Arispe Vázquez por la paciencia, el tiempo y su apoyo brindado durante la realización de mi tesis.

Al Dr. Antonio Flores Naveda por proporcionarme su material para poder llevar a cabo la realización de mi experimento.

Al Dr. Epifanio Castro del Ángel por ser parte de esta investigación, por su amistad y sus consejos.

A Yazmin por su amistad sincera, por estar conmigo en todo momento, por estos cinco años llenos de experiencias y bonitos recuerdos, siempre ocupará un lugar muy importante en mi vida.

A mis compañeras de casa Jimena Pérez y Ximena Ramírez, por ser parte significativa de mi vida, por haber hecho el papel de una familia en todo momento, gracias por su apoyo, comprensión y sobre todo su amistad.

A mis compañeros: Lupe, Dany, Chayo, Kary, Edu, Galván y Alejandro por su amistad y todos los buenos momentos que compartimos juntos a lo largo de esta etapa.

A la familia Álvarez Saucedo por ser unas grandiosas personas que aún sin conocerme me abrieron las puertas de su casa, me brindaron su amistad, me apoyaron en todo momento y sobre todo me hicieron sentir parte de la familia.

¡A todos ustedes gracias!

DEDICATORIA

A mis padres

Olga Huerta & Ricardo Hernández pilares fundamentales en mi vida, con mucho amor y cariño les dedico mi esfuerzo en reconocimiento a todo el sacrificio puesto para que yo pueda cumplir cada una de mis metas, sin su apoyo todo sería más difícil, los amo papás.

A mis hermanos

Helen, mi compañera de aventuras, quien, a pesar de las discusiones, de los malos ratos y de ser diferentes en algunas cuestiones siempre está ahí para apoyarme incondicionalmente, te amo.

Ricardo y Mauricio, quienes siempre fueron mi inspiración para cumplir mis metas y salir adelante, espero ser un buen ejemplo para ustedes y que también logren cumplir cada una de sus metas, los amo.

A mis abuelos

Carmen López † y Longino Hernández † así como en vida me cuidaron y me llenaron de consejos llenos de sabiduría y me apoyaron siempre, sé que, desde el cielo lo seguirán haciendo y estarán orgullosos de lo que eh logrado. Los amo y los recordaré por siempre, mis viejitos.

Adela Aguilar y Jesús Huerta quienes se han preocupado por mí siempre, me han apoyado en los momentos más difíciles de mi vida y con la sabiduría de Dios me han enseñado a ser mejor cada día, los amo.

A mis tíos y primos

Quienes me apoyaron directa e indirectamente en este proceso, por sus muestras de cariño y palabras de aliento. En especial a mis tíos Analy, Gaby y Pedro.

¡Con cariño, Xóchitl Hernández!

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA.....	vi
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
Hipótesis.....	3
Justificación	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Origen.....	4
Taxonomía.....	4
Botánica.....	5
Exigencias edafoclimáticas.....	6
Importancia del maíz	7
Usos.....	7
Producción mundial	8
Producción nacional.....	8
Problemática fitosanitaria.....	8
Hongos toxigénicos de importancia en el cultivo de maíz	10
Género <i>Fusarium</i>	11

Clasificación taxonómica del género <i>Fusarium</i>	11
Características morfológicas.....	11
Biología.....	12
Etiología.....	12
Distribución geográfica.....	13
Importancia como patógeno.....	13
Daños en el cultivo de maíz.....	14
Producción de micotoxinas.....	14
Patogenicidad.....	15
MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
Localización del experimento.....	16
Obtención de las cepas de <i>Fusarium</i> spp.....	16
Identificación morfométrica de <i>Fusarium</i> spp.....	17
Confirmación morfo-molecular de las cepas de <i>Fusarium</i> spp.....	17
Extracción del ADN.....	17
Amplificación por Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR).....	17
Secuenciación.....	18
Preparación de suspensión de conidios.....	18
Prueba de patogenicidad en plántula.....	20
Siembra de poblaciones de maíz.....	20
Inoculación de <i>Fusarium</i> spp.....	20
Manejo agronómico.....	21
Extracción de la plántula.....	21
Variables evaluadas.....	21
Re-aislamiento de las cepas de <i>Fusarium</i> spp.....	22

Evaluación de los resultados	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
Identificación morfo-molecular	24
Emergencia de plántula (EPL).....	27
Longitud de raíz (LRA) y Longitud de tallo (LTA).....	28
Incidencia (IDP)	31
Severidad (SDP).....	33
CONCLUSIONES	35
LITERATURA CITADA.....	36
ANEXOS	46

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Principales enfermedades en maíz causadas por tres agentes.	10
Cuadro 2. Especies de <i>Fusarium</i> , hospedero y distribución geográfica.....	13
Cuadro 3. Datos de las medias de los análisis morfo-moleculares por tipo de especie.....	25
Cuadro 4. Referencia de caracteres morfo-métricos similares en gran parte a los identificados en nuestra investigación.....	26
Cuadro 5. Longitud de raíz de las poblaciones de maíz morado peruano, afectadas por diferentes concentraciones de <i>Fusarium</i> spp.....	29
FV= <i>F. verticillioides</i> ; FN= <i>F. napiforme</i> ; FE= <i>F. equiseti</i>	29
Cuadro 6. Longitud de tallo de poblaciones de maíz morado peruano afectadas por diferentes concentraciones de <i>Fusarium</i> spp.....	30
Cuadro 7. Severidad de la pudrición de planta en poblaciones de maíz morado peruano por <i>Fusarium</i> spp.	33

ÍNDICE DE FIGURAS

	Págs.
Figura 1. Entrada principal del Departamento de Parasitología, UAAAN, Saltillo, Coahuila.....	16
Figura 2. Cepas de <i>Fusarium</i> spp. utilizadas.	16
Figura 3. Preparación de la suspensión de conidios.....	19
Figura 4. Suspensión de conidios de tres especies de <i>Fusarium</i> ajustadas en tres suspensiones diferentes..	19
Figura 5. Inoculación de las cepas de <i>Fusarium</i> spp. directamente en la semilla.	20
Figura 6. Escala del daño causado por <i>Fusarium</i> spp., en plántulas de poblaciones criollas de maíz morado peruano.	22
Figura 7. Marcadores moleculares de las especies de <i>Fusarium</i> identificadas.....	24
Figura 8. Estructuras microscópicas de cada especie.	25
Figura 9. Emergencia de las plántulas de maíz peruano con los diferentes tratamientos.	27
Figura 10. Incidencia de pudrición sobre plántulas del maíz morado peruano con los diferentes tratamientos en estudio.	31
Figura 11. Gusano cogollero alimentándose de la plántula de maíz.	32

RESUMEN

El maíz *Zea mays* L. (Poaceae) morado es un cereal de gran importancia, debido a su alto contenido de antocianinas, sin embargo, la calidad de las semillas se ve afectado por patógenos como son *Fusarium* spp. que causan pudrición de tallo y mazorca, además, éste patógeno es de gran importancia, debido a que produce micotoxinas perjudiciales para humanos y animales. El objetivo esta investigación fue evaluar la patogenicidad *in vivo* de tres especies del género *Fusarium* en tres poblaciones de maíz criollo morado peruano. Las tres cepas de *Fusarium* se reactivaron e identificaron morfo-molecularmente mediante claves taxonómicas, con el software Dinocapture 2.0, así como por extracción de rDNA y PCR; de estas cepas se realizaron tres suspensiones de conidios a 1×10^4 , 1×10^6 , 1×10^8 conidios/mL; la primera inoculación se aplicó directamente a la semilla en el momento de la siembra y la segunda 15 días posteriores a la emergencia. Se evaluaron las variables de emergencia de plántula (EPL), longitud de raíz (LRA), longitud de tallo (LTA), incidencia (IDP) y severidad (SDP) del daño en plántula. Los datos se sometieron a un análisis de varianza con arreglo factorial AxBxC donde; A= poblaciones de maíz, B= *Fusarium* spp. y C= las tres suspensiones, además, se realizó una comparación entre medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Las especies identificadas fueron *F. verticillioides*, *F. napiforme* y *F. equiseti* con una identidad del 91 a 100% y claves MN088601.1, MH862670.1 y KR819405.1 en el Gen Bank respectivamente. La especie de *F. verticillioides* fue la cepa con mayor patogenicidad en cuanto a la severidad de daño en las plantas, y la población número 3 fue aparentemente la más resistente, mientras que las poblaciones 1 y 2 fueron las más susceptibles al daño por las especies de *Fusarium*. La identificación de las especies patogénicas en el cultivo del maíz es necesaria para identificar los daños ocasionados en este cultivo, los cuales disminuyen su rendimiento, por lo tanto, es de gran importancia identificar poblaciones con mayor resistencia a enfermedades, lo cual es una ventaja competitiva para utilizar una estrategia efectiva para el control preventivo y tratamiento de la enfermedad a nivel de campo.

Palabras clave: Fitopatógenos, *Fusarium* spp., Maíz morado, Patogenicidad.

INTRODUCCIÓN

El maíz *Zea mays* L. (Poaceae) es uno de los cereales más antiguos e importantes, seguido del arroz y el trigo, y que se ha distribuido a nivel mundial (Sánchez, 2014). En México, este cultivo ocupa anualmente una superficie de aproximadamente 7.5 millones de ha, superando las 27.4 Mt de producción en el ciclo 2020 (SIAP, 2021).

En el mundo existen diversas clases de maíz que se caracterizan por tener varios colores; blancos, amarillos, azules, rojos y morados. El maíz morado proviene de la raza Kculli y tiene su origen en países de Latinoamérica como México, Bolivia y Perú (Jacobo *et al.*, 2011), y hoy en día ha adquirido gran importancia debido a su alto contenido de antocianinas, las cuales, son pigmentos naturales hidrosolubles del grupo de los flavonoides que se caracterizan por tener un importante efecto antioxidante y se encuentran presentes tanto en el grano como en mazorca (Guillén-Sánchez *et al.*, 2014), éstos pigmentos representan un potencial para el reemplazo competitivo de colorantes sintéticos en alimentos, productos farmacéuticos y cosméticos y para la obtención de productos con valor agregado dirigidos al consumo humano (Gullón *et al.*, 2020), sin embargo, es afectado por el ataque de patógenos que reducen su producción y la calidad del grano (Solano-Báez *et al.*, 2011), como es el caso del género *Fusarium*, que a nivel mundial las especies de éste género causan la pudrición de tallo y mazorca.

Fusarium spp. además, de causar efectos negativos en la producción, el deterioro y mala calidad de los granos, es de gran importancia debido a su capacidad de producir micotoxinas como las fumonisinas B1 y B2 (Eckard *et al.*, 2011), que son de alta toxicidad y causan disturbios en la salud de los humanos y animales que lo consumen, por ejemplo; *Fusarium proliferatum* (Matsushima) Nirenberg, *Fusarium subglutinans* (Wollenw. & Reinking) PE Nelson, Toussoun & Marasas, *Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg, *Fusarium oxysporum* Schltdl. y *Fusarium equiseti* (Corda) Sacc. (Hypocreaceae) son las especies más conocidas, como agentes causales del daño en raíz y mazorca del maíz a nivel mundial (Bertechini *et al.*, 2012). En México, *F. verticillioides* y *F. subglutinans* (Morales-Rodríguez *et al.*, 2007; Figueroa-

Rivera *et al.*, 2010; López *et al.*, 2014) han sido los más reportados en esta enfermedad.

La resistencia genética es una alternativa factible y económica para el manejo de la enfermedad, pero es necesario identificar los genotipos de maíz resistentes a *Fusarium* spp. (Aquino *et al.*, 2011). Por lo anterior, en el presente trabajo de investigación se pretende identificar la patogenicidad de especies del género *Fusarium* en poblaciones criollas de maíz morado peruano para encontrar al menos una población resistente al daño por estas especies.

Objetivo general

- Evaluar la patogenicidad *in vivo* de *Fusarium* spp. en poblaciones criollas de maíz morado peruano.

Objetivos específicos

- Identificar morfo-molecularmente las especies de *Fusarium*.
- Determinar el efecto de *Fusarium* spp. sobre la emergencia de plántulas de maíz morado peruano.
- Estudiar el efecto de *Fusarium* spp. sobre la longitud de raíz y de tallo de maíz morado peruano.
- Evaluar la incidencia y severidad de *Fusarium* spp. en plántulas de maíz morado peruano.

Hipótesis

Al menos una población de maíz criollo morado peruano será resistente al daño por *Fusarium* spp. y al menos una de las especies de *Fusarium* resultará ser patogénica a las poblaciones de maíz morado peruano.

Justificación

El ataque de patógenos en el maíz es uno de los principales factores que afectan su rendimiento y su calidad, por tal motivo, es importante identificar las especies patogénicas en este cultivo, lo cual nos permitirá realizar un manejo más eficiente de esta enfermedad.

REVISIÓN DE LITERATURA

Origen

El maíz se originó en una parte restringida de México y los tipos más desarrollados emigraron posteriormente hacia otros sitios de América, este surgió aproximadamente entre los años 8 000 y 600 AC en Mesoamérica (México y Guatemala) (Acosta, 2009). Este cultivo se originó mediante el proceso de domesticación que llevaron a cabo los antiguos habitantes de Mesoamérica, a partir de los “Teocintles”, gramíneas muy similares al maíz, que crecen de manera natural principalmente en México y parte de Centroamérica (CONABIO, 2020). El maíz morado es originario de la región de los andes de lo que hoy es Perú y ha sido ampliamente cultivado y consumido en toda la región andina de América del sur, principalmente Perú, Bolivia, México, Ecuador y Argentina (Fei, 2016).

Taxonomía

El maíz es una planta monocotiledónea, pertenece a la familia de las Poáceas, de la Tribu Maydeas (Cabrerizo, 2012). Su clasificación taxonómica es la siguiente:

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Género: *Zea*

Especie: *Z. mays* L.

Botánica

Según Paliwal *et al.* (2001), el maíz presenta las siguientes características botánicas:

a) Raíz

La planta tiene dos tipos de raíz, las primarias son robustas o duras, presentando además raíces adventicias, es decir, raíces secundarias, y ambos tipos de raíz tienen la misión de mantener la planta erecta.

b) Tallo

El tallo es simple y erecto, de elevada longitud, llega hasta los 3 m de altura, es robusto, además, tiene aspecto de caña, presenta entrenudos y una médula esponjosa.

c) Hojas

Las hojas son largas, de gran tamaño, lanceoladas, alternas, paralelinervias y se encuentran abrazadas al tallo y por el haz presenta vellosidades, además, los extremos de las hojas son muy afilados y cortantes.

d) Flores

El maíz es una planta monoica, tiene flores masculinas y flores femeninas separadas, pero en la misma planta.

- **La inflorescencia masculina:** presenta una panícula de coloración amarilla que posee una cantidad de polen en el orden de 20 a 25 millones de granos de polen. En cada florecilla que compone la panícula se presentan tres estambres donde se desarrolla el polen.
- **La inflorescencia femenina:** conocida como espiga es una mazorca con diferente número de hileras.

e) Fruto y semilla

El fruto es indehisciente, cada grano se denomina cariósipide, no presentando latencia en la semilla y el pericarpio está fundido con la testa de la semilla formando la pared del fruto, donde, el fruto maduro consta de pared, embrión diploide y endospermo triploide.

Exigencias edafoclimáticas

Las plantas de maíz están dotadas de una amplia capacidad de respuesta a las oportunidades que le ofrece el medio ambiente y tiene un alto nivel de respuesta a los efectos de luz, Según Deras (2020) se desarrollan favorablemente en los siguientes factores edafoclimáticos.

- **Exigencias de suelo**

El cultivo de maíz se adapta bien a todos los tipos de suelos, pero en general, los suelos más idóneos para el cultivo son los de textura media (francos), profundos, bien drenados y con elevada capacidad de retención del agua. También crece bien en suelos con pH entre 6 y 7 que son a los que mejor se adaptan.

- **Exigencias de clima**

Para que se produzca la germinación, en la semilla la temperatura debe de situarse entre los 15 a 20 °C. Llega a soportar temperaturas mínimas de hasta 8 °C y a partir de los 30 °C pueden aparecer problemas serios debido a mala absorción de nutrientes minerales y agua. Para la fructificación se requieren temperaturas de 20 a 32 °C.

- **Exigencia de agua**

El maíz es un cultivo exigente en agua en el orden de unos 5 mm al día. Las necesidades hídricas van variando a lo largo del cultivo. En etapa de germinación las plántulas requieren humedad para un crecimiento adecuado, pero en las etapas de crecimiento vegetativa y reproductiva las cuales son

críticas, demandan una mayor cantidad de agua para obtener un mayor rendimiento de grano.

Importancia del maíz

El maíz es uno de los cereales más importantes del mundo, suministra elementos nutritivos a los seres humanos, al ganado y es una fuente de un gran número de productos industriales (ASERCA, 2018) y en la actualidad el maíz morado ha adquirido gran importancia por sus propiedades nutricionales, razón por la cual se utiliza como colorante en la industria de alimentos y bebidas; así mismo, es utilizado en la industria farmacéutica, por sus propiedades medicinales (Requis, 2012).

Usos

Actualmente, el maíz es utilizado en cientos de productos industriales. Además, es fuente de materia prima para producir almidón y derivados, como aceite y alcohol, entre otros, y algunos de estos productos son utilizados en la industria química y en algunos casos como reemplazo de los derivados del petróleo (Ranum *et al.*, 2014). Otro uso medicinal reciente es considerar al maíz como alimento funcional con capacidad de disminuir niveles de colesterol y antioxidante del maíz morado, que disminuye los niveles de colesterol total y aumenta la capacidad antioxidante en ratas. Shipp y Abdel-Aal., (2010) y Aguilera *et al.* (2011), aluden que la fuente importante de antocianinas, además de las frutas rojas como la baya *Lycium barbarum* L. (Solanaceae) y uva *Vitis vinifera* L. (Vitaceae) es el maíz morado, del cual se han hecho extractos de antocianinas como suplemento dietético antioxidante.

En México predomina el uso alimenticio, cuando en el resto del mundo es importante como insumo en alimentos balanceados para animales y en la industria (Fernández *et al.*, 2013), el uso alimenticio sitúa al maíz en el grupo de los cuatro cultivos básicos (además de la papa, arroz y trigo) que aportan más del 50% al sistema alimentario mundial (FAO, 2011). México no solo es centro de diversidad de formas biológicas del maíz, también lo es de un conjunto de usos culinarios. En las diferentes regiones de

México se preparan numerosos platillos de maíz, que varían en cada región dependientes de las tradiciones culinarias, la disponibilidad de razas nativas y los gustos personales (Linares y Bye, 2012). Teniendo un consumo promedio *per cápita* de 196.4 kg al año de maíz blanco, especialmente en tortillas, el cual representa el 20.9% del gasto total en alimentos (SAGARPA, 2017).

Producción mundial

De acuerdo con los datos de la FAOSTAT (2021), el maíz ocupa el cuarto lugar a nivel mundial de producción, en el ciclo 2019 se sembraron 1,148,487,291 hectáreas y se cosecharon 197,204,250 t y los principales productores fueron Estados Unidos, China, Brasil, Argentina, Ucrania, Indonesia, India, México, Rumania y Canadá.

Producción nacional

En el ciclo agrícola 2019 en México se sembraron 27,228,242 hectáreas y se obtuvo una cosecha de 7,690, 449 Mt (FAOSTAT, 2021), donde, los principales estados productores fueron: Sinaloa, Jalisco, Michoacán, México, Guanajuato, Veracruz, Puebla, Tamaulipas, Sonora, Oaxaca (SIAP, 2021).

Problemática fitosanitaria

El cultivo de maíz es afectado por problemas fitosanitarios principalmente malezas, enfermedades e insectos plaga, los dos últimos provocan pérdidas en rendimiento de 30% a 40% y están presentes desde el establecimiento del cultivo, hasta el almacenamiento del grano (González, 2017; AGROSAMEX, 2019), la incidencia y el daño que ocasionan en el cultivo se presenta por diversos factores los cuales favorecen su desarrollo, como pueden ser: las condiciones ambientales, la fenología del cultivo y hábitos de insectos plaga (Ayala *et al.*, 2013).

Malezas

Las malezas anuales como perennes son un problema mundial en el cultivo del maíz, ya que, compiten con el cultivo por luz, nutrientes y agua, lo que provoca pérdidas de rendimiento del grano de maíz de hasta un 85%, además, su presencia dificulta la cosecha mecánica y son hospederos de plagas y enfermedades. El período crítico de competencia de las malezas en el maíz es de 2 a 4-6 semanas después de la siembra (Rosales y De la Garza, 2006).

Dentro de las principales malezas que se presentan en el cultivo de maíz se encuentran el sorgo *Sorghum halepense* L. Pers., zacate de agua *Echinochloa crusgalli* L. P.Beauv, zacate bermuda *Cynodon dactylon* L. Pers., pasto moro *Leptochloa filiformis* Pers. P. Beauv (Poaceae); escoba amarga *Parthenium hysterophorus* L., zacate bardana *Xanthium strumarium* L. (Asteraceae); correhuela *Convolvulus arvensis* L. (Convolvulaceae) y trébol de olor *Melilotus indicus* L. (Fabaceae) (Castro y Cruz, 2012).

Plagas

El cultivo de maíz es atacado por diversos insectos los cuales causan daños, ya sea en las semillas, las raíces, el tallo, las hojas y el fruto, sin embargo, pocos son de importancia económica (Páliz y Mendoza, 1999), en la actualidad, el gusano cogollero *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), el gusano elotero *Helicoverpa zea* (Boddie), (Lepidoptera :Noctuidae) y barrenadores del tallo *Diatraea* spp. (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae) entre otras, constituyen una de las principales plagas del cultivo de maíz (Avilés *et al.*, 2016; CESAVEG, 2021).

Enfermedades

Las enfermedades del maíz son causadas por tres agentes principales: hongos bacterias y virus (Cuadro 1) (CIMMYT, 2004). Dentro de las principales enfermedades que más afectan el cultivo del maíz están las de origen fungoso y la aparición de éstas enfermedades está sujeta a las condiciones ambientales que favorecen la infección y

multiplicación del patógeno, así como la fuente de inóculo y la susceptibilidad de los genotipos (Sillón, 2020). En México se reportan perdidas de rendimiento, debido a la pudrición de tallo y mazorca, causada por *Fusarium* spp. (Mendoza *et al.*, 2003), que en el centro de México van de 6% hasta 50% (González *et al.*, 2007; Briones *et al.*, 2015).

Cuadro 1. Principales enfermedades en maíz causadas por tres agentes.

Enfermedades causadas por hongos	Enfermedades causadas por bacterias	Enfermedades causadas por virus
Enfermedades foliares, pudrición de tallo por: <i>Pythium</i> , <i>Botryodiplodia</i> , <i>Stenocarpella</i> , <i>Gibberella</i> y <i>Fusarium</i> ; pudrición de mazorcas por: <i>Penicillium</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Cephalosporium</i> , <i>Hormodendrum</i> , <i>Gibberella</i> y <i>Fusarium</i> .	Pudrición de tallo, Marchitez de Stewart, Rayado foliar bacteriano	Enanismo clorótico del maíz (MCDV); Moteado clorótico del maíz; Mosaico del enanismo del maíz (MCMV); Necrosis letal del maíz (MLN); Mosaico I del maíz (MMV).

Hongos toxigénicos de importancia en el cultivo de maíz

Los hongos más importantes son *Fusarium*, *Aspergillus* P. Micheli ex Haller (*Aspergillaceae*) y *Penicillium* (*Trichocomaceae*), los cuales tienen amplia distribución geográfica y pueden desarrollarse sobre una amplia gama de granos almacenados y semillas de maíz (Christensen y Kaufmann, 1976; Richardson, 1979).

Género *Fusarium*

Fusarium es el patógeno de mayor importancia en los cultivos como el arroz (*Oryza sativa* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L.) (Poaceae) y maíz, en los que ocasiona ahogamiento, pudriciones y otras anormalidades (Nelson, 1991).

Clasificación taxonómica del género *Fusarium* según Leslie y Summerell (2006).

Reino: Fungi

Phyllum: Ascomycota

Clase: Sordariomycetes

Orden: Hypocreales

Familia: Hypocreaceae

Género: *Fusarium* Link ex Grey

Características morfológicas

Las especies de *Fusarium* presentan características microscópicas propias de la especie, por ejemplo; la fiálide es generalmente fina, en forma de botella; simple o ramificada; cortas o largas o polifialídica, los macroconidios presentan forma de medialuna, hialinos y septados, y son ausentes en algunas especies, poseen variadas formas, en cadenas largas o cortas, además, pueden observarse las clamidosporas características con doble pared gruesa, lisa o rugosa de manera aislada, en pareja o en grupo (Tapia y Amaro, 2014).

Biología

Fusarium pertenece a un género cosmopolita de hongos imperfectos (Nelson *et al.*, 1981), las especies son saprofitas en algunas de sus fases de crecimiento y pueden o no desarrollar una fase de reproducción sexual, según la especie se han descrito estados sexuales (teleomorfos) para algunas especies de *Fusarium*. Todos los teleomorfos conocidos de *Fusarium* spp. están incluidos en el orden Hypocreales de Ascomycota (Samuels *et al.*, 2001).

Etiología

Los hongos de *Fusarium* comúnmente se distribuyen en el suelo y los hábitats ambientales, muchos crecen y prosperan en regiones tropicales y templadas e incluso en las regiones desérticas, alpinas y las regiones árticas (Mokobi, 2020). Las enfermedades causadas por este patógeno y sobre todo en climas húmedos pueden ser muy agresivas; en la zona donde la humedad es baja, la infección la causa casi de manera exclusiva el inoculo presente en residuos de cereales infectados que permanecen en el suelo. El patógeno invade directamente la base de los tallos, cerca o debajo de la superficie del suelo, o entra en la planta a través de las raíces (Cook, 2010).

Distribución geográfica

El género *Fusarium* presenta una distribución cosmopolita y es endémico de zonas maiceras de todo el mundo (Mendoza *et al.*, 2003). Afecta a más de 80 cultivos de importancia comercial (Cuadro 2) (Seminis, 2017).

Cuadro 2. Especies de *Fusarium*, hospedero y distribución geográfica (Babadoost, 2018).

Especies de <i>Fusarium</i>	Plantas hospederas	Distribución geográfica
<i>F. globosum</i>	Maíz, trigo	África, Japón
<i>F. graminearum</i>	Cebada, Maíz, Trigo	En todo el mundo
<i>F. proliferatum</i>	Espárragos, maíz, mango, sorgo	En todo el mundo
<i>F. pseudoanthophilum</i>	Maíz	África del Sur
<i>F. sacchari</i>	Maíz, caña de azúcar	México, Filipinas
<i>F. subglutinans</i>	Maíz	Zonas frías de cultivo de maíz
<i>F. verticillioides</i>	Maíz	En todo el mundo

Importancia como patógeno

Las especies de *Fusarium* se encuentran entre los patógenos de plantas más comunes y extendidos en el mundo, y son de gran importancia económica (Leslie y Summerell, 2006), es decir, es un grupo muy diverso de hongos filamentosos que colonizan las partes aéreas y subterráneas de las plantas, así como residuos y otros sustratos orgánicos, por lo que puede encontrarse en el suelo, estos son considerados principalmente como hongos de campo (Sumalan *et al.*, 2013), se han convertido en un problema serio ya que producen metabolitos tóxicos que ponen en peligro la salud de los seres humanos y de los animales. *Fusarium* spp. son capaces de infectar una amplia gama de especies vegetales, provocando enfermedades que se manifiestan como marchitamientos y podredumbres de la raíz, y como consecuencia, pérdidas económicas importantes en la agricultura (Ma *et al.*, 2013), sin embargo, algunas especies de *Fusarium* son beneficiosas en la agricultura y han sido utilizadas en el control biológico de ciertas enfermedades causadas por especies patógenas, principalmente aquellas pertenecientes a la especie *F. oxysporum* (Arbeláes, 2000).

Daños en el cultivo de maíz

En el cultivo de maíz ciertas especies de *Fusarium* pueden causar daño en todas las etapas del cultivo, desde plántulas hasta planta adulta, provocando diversos síntomas como son manchas foliares, marchitez y pudrición de los órganos vegetativos, como hojas, tallo y raíz (Figueroa-Rivera *et al.*, 2010). En la semilla, el micelio puede invadir y ocasionar manchas en la cubierta externa causando la disminución de la germinación por la muerte del embrión (González *et al.*, 2007; Morales-Rodríguez *et al.*, 2007) y en plántulas y plantas adultas, debilita y pudre la raíz ocasionando acame y cuando la enfermedad es severa, las plantas pueden marchitarse y morir rápidamente, conforme progresa la enfermedad, todo sistema de raíces se torna café y con frecuencia se pudre la raíz primaria y aparecen lesiones color café chocolate al nivel del suelo, las cuales se expanden al sistema vascular (Seminis, 2021). En muchos casos, la presencia del hongo no es perceptible, pues no causa daño visible en la semilla o en la plántula (daño asintomático) (Thomas y Buddenhagen, 1980).

En tallo y la mazorca el daño de este hongo aparece primero como una coloración salmón pálido en el pedicelo de la punta de los granos, y los granos infectados muestran un crecimiento de moho polvoso de color rosáceo, compuesto por grandes números de conidios (Mendoza *et al.*, 2006).

Producción de micotoxinas

Las micotoxinas son metabolitos producidos por una serie de hongos, en condiciones favorables de crecimiento, afectando principalmente a los cereales (FAO, 2013), y la mayoría son producidas por especies de los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium* (Abarca *et al.*, 2000).

Los hongos del género *Fusarium* son comunes en el suelo y producen varias toxinas diferentes, entre ellas tricotecenos como nivalenol y deoxinivalenol, toxinas T-2 y HT-2, zearalenona y fumonisinas. La formación de los mohos y toxinas se produce en diferentes cultivos de cereales. Las micotoxinas más comunes encontradas en el maíz son: Aflatoxinas, Ocratoxina A, Zearalenona, Deoxynivalenol, Fumonisina y

Moniliformina (Saleemi, 2012), además, diferentes toxinas de *Fusarium* se asocian con ciertos tipos de cereales. Por ejemplo, tanto el deoxinivalenol como la zearalenona se asocian a menudo con el trigo, las toxinas T-2 y HT-2 con la avena, y las fumonisinas con el maíz (OMS, 2018).

En los granos de cereales, los hongos persisten si el grano está suficientemente seco, como para soportar la competencia de otras especies incorporadas posteriormente. Los granos de maíz son altamente vulnerables a la degradación por micotoxinas; se presentan principalmente en condiciones climáticas secas y calurosas, por daño de los insectos a la mazorca y debido a los bajos niveles de resistencia (Agrios, 2001).

Patogenicidad

La patogenicidad es definida como la capacidad relativa que tiene un fitopatógeno para producir una enfermedad (Agrios, 2005) y éstos pueden ser causantes de muchas enfermedades presentes en las plantas, pero si no existen evidencias o estudios previos que los comprueben, es necesario aplicar la metodología de los postulados de Koch para verificar o no la hipótesis que los fitopatógenos son la causa para que se produzca una enfermedad determinada, dichos postulados difieren lo siguiente: 1) Hay una relación muy estrechamente entre la enfermedad con el fitopatógeno, es decir, el fitopatógeno debe estar asociado con la enfermedad en todas las plantas enfermas que se examinen, 2) Debe aislarse y obtener un cultivo axénico del microorganismo en estudio y anotar sus características (morfológicas, culturales, bioquímicas entre otras), 3) El microorganismo en estudio y desarrollado en cultivo axénico debe ser inoculado en plantas sanas de la misma especie de donde se aisló. Las plantas inoculadas deben reproducir los mismos síntomas de la enfermedad, y 4) El microorganismo fitopatógeno debe ser re-aislado otra vez en cultivos axénicos y sus características deberán ser exactamente igual a las del paso 2 (Hernández, 2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

La investigación se realizó en el Laboratorio de Entomología Molecular y Alternativas del control de Plagas del Departamento de Parasitología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.



Figura 1. Entrada principal del Departamento de Parasitología, UAAAN, Saltillo, Coahuila.

Obtención de las cepas de *Fusarium* spp.

Las cepas de *Fusarium* spp. fueron proporcionadas por el M.C. José Luis Arispe Vázquez en Julio de 2020 (Figura 2). Para su incremento de colonias, las cepas fueron reactivadas en placas de Petri con medio de cultivo PDA (Bioxon) + Antibiótico (Gentamicina, 1 mL/L) para evitar el crecimiento de bacterias, mantenidas a 28 °C por 168 h.



Figura 2. Cepas de *Fusarium* spp. utilizadas.

Identificación morfométrica de *Fusarium* spp.

Se realizó de acuerdo a la forma, color y textura del micelio, así como en la estructura y composición de 100 conidios, fiálides y clamidosporas utilizando el software DinoCapture 2.0 (Dinolite, 2020).

Confirmación morfo-molecular de las cepas de *Fusarium* spp.

Se basó en la estructura y la composición de los conidios, las fiálides y las clamidosporas descritas en las claves del manual de laboratorio de *Fusarium* de Leslie y Summerell (2006) y la clave interactiva para *Fusarium* de Seifert (1996).

Extracción del ADN

Para la extracción del ADN se utilizó el método de bromuro de cetil-trimetil amonio (CTAB) (Murray y Thompson, 1980), para ello, partiendo de cepas axénicas, micelio de cada cepa de *Fusarium* spp. se maceró en mortero con pistilo de porcelana previamente esterilizados, al cual se agregaron 500 μ L de extracción con: NaCl 1.4 mM, EDTA 20 mM, PVP 1% Tris Base 100 mM (pH 8) y 200 μ L de B-mercaptoetanol. El producto de la maceración se colocó en tubos eppendorf estériles de 1.5 mL y se incubaron a 65°C por 45 min a 15 rpm y se agitaron en el vortex por 30 s. Enseguida se añadió a la muestra 500 μ L de SEVAG (cloroformo – alcohol isoamílico, 24:1) y posteriormente se centrifugó a 1200 rpm durante 15 min. Se recuperó el sobrenadante y se pasó a otro tubo, luego se agregó igual volumen de isopropanol frío y se mantuvieron a -20 °C por 24 h. Transcurrido el tiempo se centrifugó a 1200 rpm durante 10 min, los tubos se decantaron y finalmente la pastilla de ADN obtenida de los diferentes aislamientos se re-suspendió en 60 μ L de agua libre de nucleasas y se almaceno a 4 °C.

Amplificación por Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR)

Se realizó la amplificación de la región ITS1 e ITS4. Se realizó una mezcla de amplificación en un volumen final de 15 μ L, compuesto por 5.8 μ L de agua MQ, 2.5 μ L

de buffer (10X), 0.5 μ L de dNTP's (10mM), 2.5 μ L de cada iniciador ITS1 (5'TCC GTA GGT GAA CCT GCG G3') e ITS4 (5'TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC3'), 0.2 μ L de Taq-polimerasa, 0.2 μ L de DNA Taq-polimerasa y 1 μ L de DNA. Las reacciones de amplificación se efectuaron usando un termociclador bajo el siguiente programa: 1 ciclo de 95 °C 3min, seguido de 35 ciclos a 95°C por 10 s, 57 °C por 30 s y 72 °C por 45 s, finalizando con un ciclo de polimerización de 72°C por 5 min. Los productos de la PCR se corrieron en geles de agarosa al 1% y visualizados bajo luz UV. Finalmente, los productos de PCR se purificaron mediante el producto isolate II PCR and gel kit.

Secuenciación

Las muestras se secuenciaron en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPYCIT) con el método de didesoxinucleótidos marcados en el secuenciador del Analizador Genético 3130, y la secuencia obtenida se ensambló y comparó con las disponibles en la base de datos del Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI), usando la herramienta BLAST para secuencias altamente similares.

Preparación de suspensión de conidios

Una vez identificadas las cepas de *Fusarium* se realizó su reproducción masiva en placas de Petri en medio de cultivo de PDA (Bioxon) + Antibiótico (Gentamicina, 1mL/L). En cada placa se le agregaron 10 mL de agua estéril y se raspó el micelio de las diferentes cepas de *Fusarium* con una varilla de dispersión estéril (Fig. 3) y el resultante se transfirió a un matraz estéril y posteriormente se ajustó la suspensión de conidios a 1×10^4 , 1×10^6 y 1×10^8 conidios/mL (Fig. 4) mediante hemocitómetro o cámara de Neubauer.

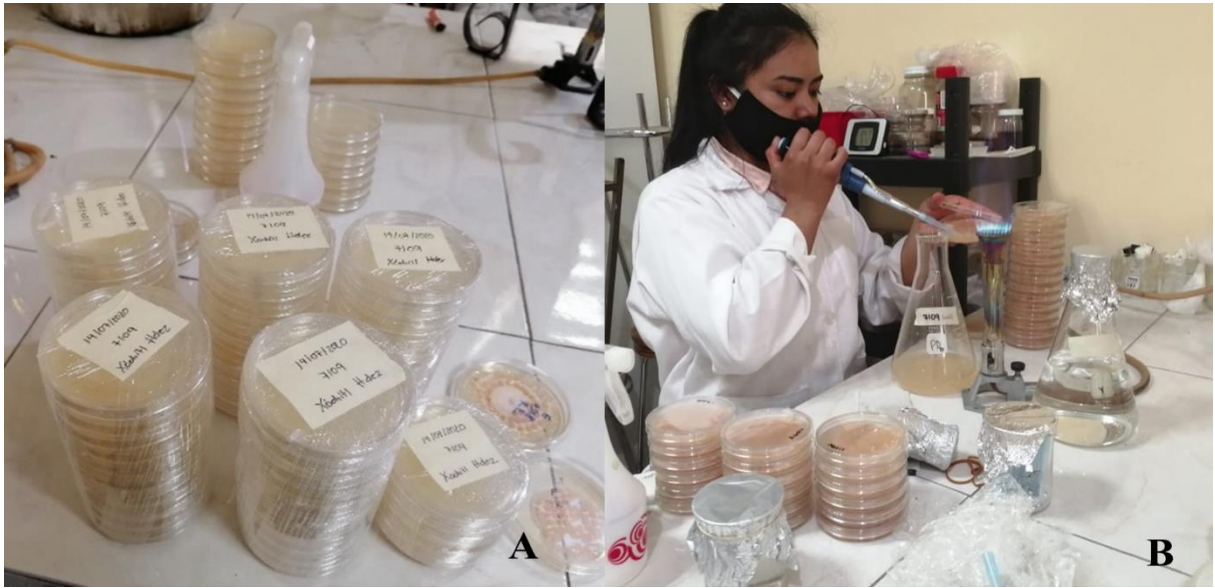


Figura 3. Preparación de la suspensión de conidios. A=Reproducción masiva de las cepas de *Fusarium* en placas de Petri; B= Extracción de la suspensión con la ayuda de una micropipeta.

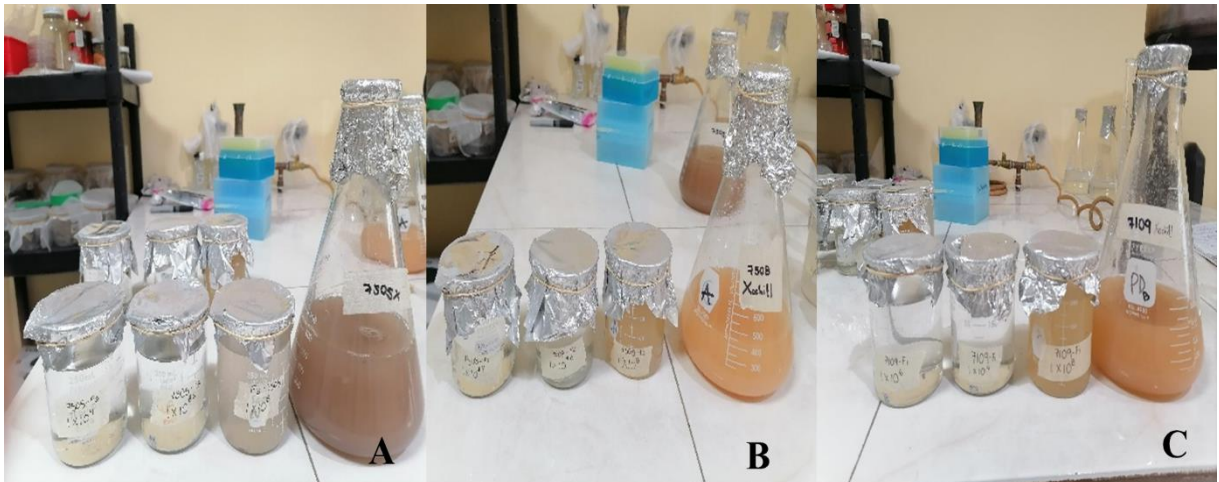


Figura 4. Suspensión de conidios de tres especies de *Fusarium* ajustadas en tres suspensiones diferentes. A= *F. verticillioides*; B= *F. napiforme*; C= *F. equiseti*.

Prueba de patogenicidad en plántula

Siembra de poblaciones de maíz

Las tres poblaciones de maíz criollo morado peruano fueron proporcionadas por el Dr. Antonio Flores Naveda del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas del Departamento de Fitomejoramiento de la UAAAN. Provenientes del Departamento de Huánuco, Perú.

Las semillas se desinfectaron con hipoclorito comercial (NaCl) al 3% durante tres min, posteriormente, se realizaron tres lavados con agua destilada estéril y se mantuvieron sumergidas durante 5 min. Las semillas se sembraron en vasos de poliestireno expandido con capacidad para un 1 L, conteniendo peat-moss-perlita estéril como sustrato a una proporción de 3-1 y se mantuvieron bajo condiciones de laboratorio a $26 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Inoculación de *Fusarium* spp.

Se realizaron dos inoculaciones: la primera inoculación se realizó inmediatamente después de la siembra directamente en la semilla con 10 mL de la suspensión de conidios en las diferentes suspensiones (Fig. 5) y la segunda 15 días posterior a la emergencia en la base del tallo por aspersion directa. Se replicó dos veces.



Figura 5. Inoculación de las cepas de *Fusarium* spp. directamente en la semilla.

Manejo agronómico

Se aplicaron riegos cada tercer día después de la siembra, aplicando de 10-20 mL de agua por vaso con el fin de mantener la humedad requerida para la germinación y desarrollo de la planta, y con base en los requerimientos del sustrato.

Extracción de la plántula

En la etapa fenológica V3 -V5 las plántulas se extrajeron con el propósito de evaluar el daño en la raíz y el tallo ocasionado por las cepas de *Fusarium*.

VARIABLES EVALUADAS

Emergencia de plántula (EPL)

Se realizó la evaluación de la EPL a los 12 días después de la siembra, para registrar el número de plántulas emergidas.

Longitud de raíz (LRA)

Se evaluó la LRA de cada planta y se determinó la longitud promedio de crecimiento con respecto al control, posteriormente se evaluó el daño en la raíz ocasionado por las cepas de *Fusarium*.

Longitud de tallo (LTA)

A partir de la raíz, se evaluó la longitud de la parte aérea de cada planta de maíz (Mesocotilo, coleóptilo y hasta la primera hoja). Posteriormente, se le realizaron cortes transversales a cada uno de los tallos y se evaluó la incidencia y la severidad.

Incidencia del daño en plántula (IDP)

Se evaluó la incidencia, comprendida como el número de plantas que muestran síntomas de daño por la presencia de la enfermedad. En cada tratamiento se contaron las plantas totales y las plantas que manifestaban síntomas de *Fusarium*. Para determinar la incidencia de *Fusarium* se dividió el número de plantas con síntoma entre el número de plantas totales y se multiplico por 100.

Severidad del daño en plántula (SDP)

Para determinar la severidad, se evaluó la cantidad de tejido afectado, expresada como el porcentaje del área total de la enfermedad (pudrición), en donde se utilizó una escala de cinco valores de 0-4 con base en los síntomas de la enfermedad (Fig. 6).

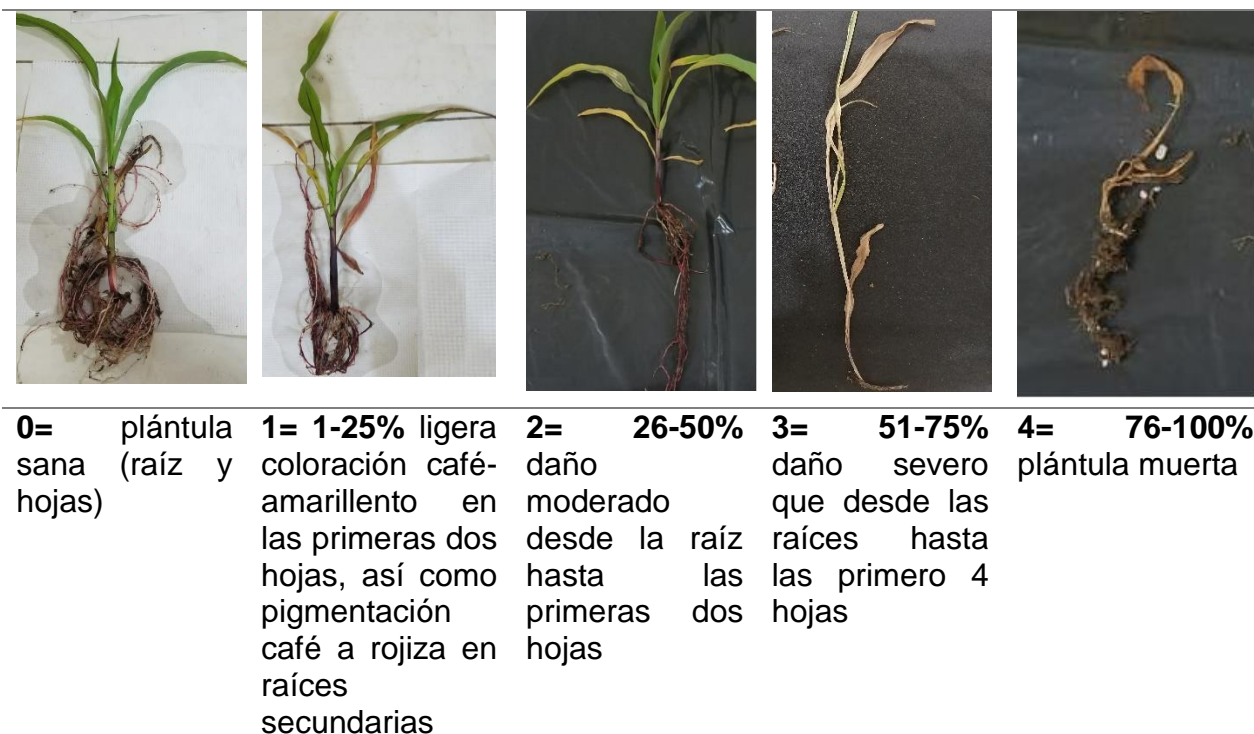


Figura 6. Escala del daño causado por *Fusarium* spp., en plántulas de poblaciones criollas de maíz morado peruano.

Re-aislamiento de las cepas de *Fusarium* spp.

Para recuperar el fitopatógeno inoculado, se hicieron cortes de la plántula inoculada, las cuales se sembraron en medio de cultivo Czapek-Dox Agar y se mantuvieron a 26°C por 164 h y se confirmó su identidad basada en la estructura y la composición de los conidios, las fiálides y las clamidosporas descritas en las claves del manual de laboratorio de *Fusarium* de Leslie y Summerell (2006) y la clave interactiva para *Fusarium* de Seifert (1996).

Evaluación de los resultados

Los datos se estimaron en porcentaje y se ajustaron mediante la transformación por raíz cuadrada de arcoseno. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza con un arreglo factorial de tres factores (Factor A= Poblaciones; Factor B= Cepas; Factor C=Suspensiones) y comparación entre medias con una prueba de rango múltiple de Tukey ($p= 0.05$) utilizando el software estadístico SAS® 9.1 (SAS 2002; versión 9.1, SAS Institute, Cary, North Carolina, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación morfo-molecular

En las cepas obtenidas se observaron colonias aplanadas de crecimiento lento y rápido de color blancas, naranjas, moradas, con microconidios hialinos con forma de garrote y ligeramente aplanados en cada extremo de 8.9 a 45.8 μm de largo y de 3.11 a 4.76 μm de ancho, macroconidios de curvos a casi rectos; de 3-9 septos con la célula basal en forma de pie de 44.88 a 79.56 μm de largo y 5.88 a 6.800 μm de ancho, clamidosporas (ausentes en algunas especies) características determinantes para especies del género *Fusarium*.

La amplificación de las regiones intergénicas abarco desde 700 pb a 800 pb. Las secuencias comparadas con la base de datos del NCBI coincidieron con *Fusarium verticillioides* Nirenberg (sinónimo de *F. moniliforme* Sheldon, teleomorfo *Gibberella moniliformis* Wineland), *Fusarium equiseti* (Corda) Saccardo, y *Fusarium napiforme* Marasas, Nelson & Rabie con características macro y microscópicas de cada especie (Figuras 7 y 8) y con un porcentaje de identidad en los análisis moleculares de 91 a 100% (Cuadro 3).

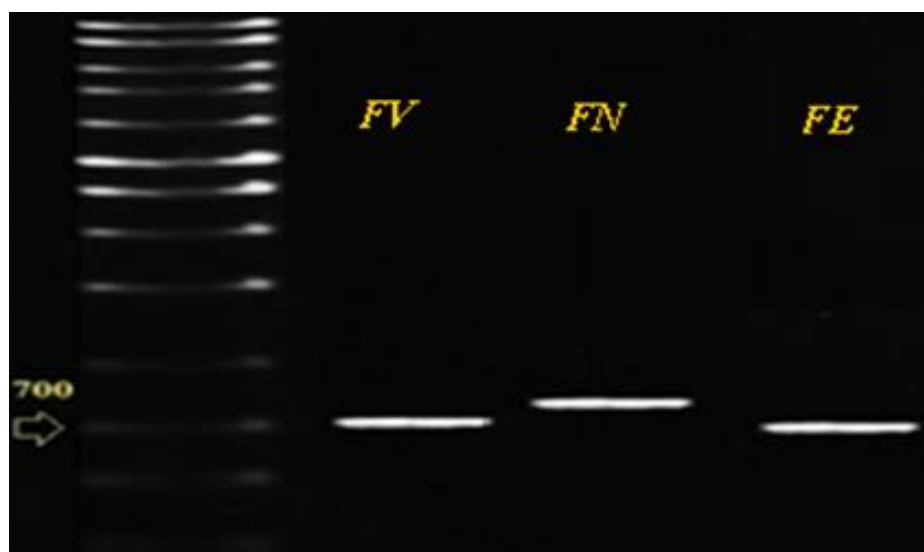


Figura 7. Marcadores moleculares de las especies de *Fusarium* identificadas. FV= *F. verticillioides*; FN=*F. napiforme*; FE= *F. equiseti*.

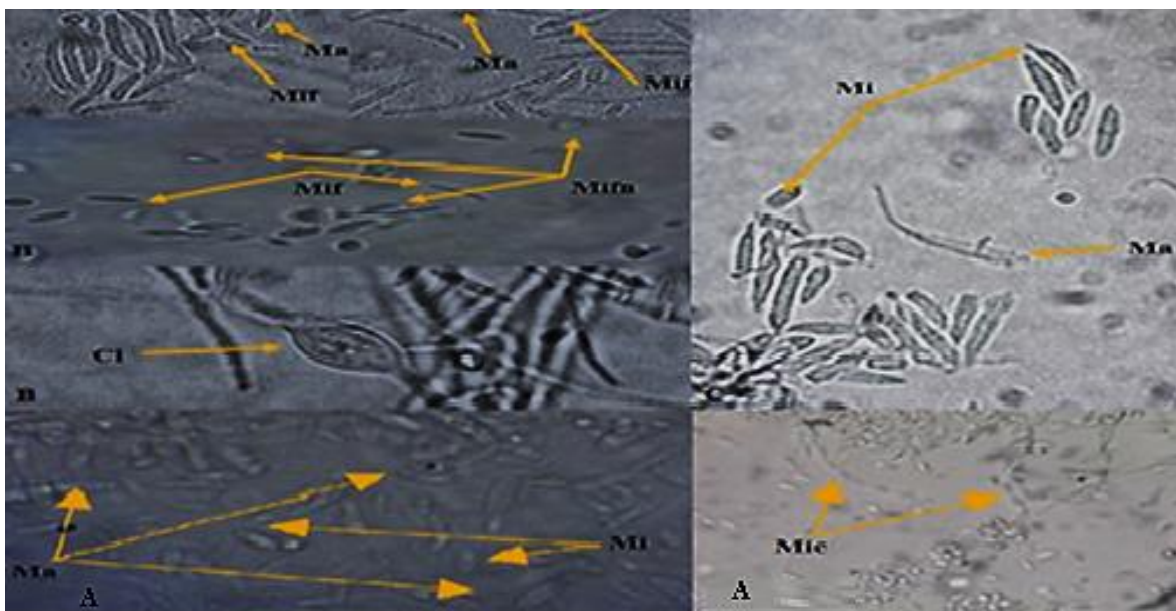


Figura 8. Estructuras microscópicas de cada especie. A= *F. verticillioides*; Ma= Macroconidios; Mi= Microconidios; Mic= Microconidios en cadena; B= *F. napiforme*; Ma= Macroconidios; Mif= Microconidios fusiformes; Mifn= Microconidios fusiformes y napiformes; Cl= Clamidospora; C= *F. equiseti*; Ma= Macroconidios; Mi= Microconidios.

Cuadro 3. Datos de las medias de los análisis morfo-moleculares por tipo de especie.

Patógeno		<i>Fusarium verticillioides</i>	<i>Fusarium napiforme</i>	<i>Fusarium equiseti</i>
Macroconidios (µm)	Largo	44.88	53.38	79.56
	± SD	10.82	8.53	20.81
	Ancho	6.26	5.88	6.80
	± SD	1.35	1.08	1.11
Microconidios (µm)	Largo	13.77	8.9	45.8
	± SD	1.76	1.26	12.12
	Ancho	4.12	3.11	4.76
	± SD	0.76	1.39	0.77
Cl		No	Si	No
Pb		700	800	690
Max puntaje		562	915	920
Total puntaje		562	915	1100
% Identidad		91.00	99.80	100.00
Clave		MN088601.1	MH862670.1	KR819405.1

± SD= Desviación estándar; Cl= Clamidosporas; Pb= Pares de bases.

La determinación de estas especies fue similar en gran parte por varios autores (Cuadro 4) quienes identificaron morfo-molecularmente a *Fusarium* spp., de

aislamientos procedentes de maíz, con características macro y microscópicas semejantes a las reportadas en la presente investigación.

Cuadro 4. Referencia de caracteres morfo-métricos similares en gran parte a los identificados en nuestra investigación.

Clave	Patógeno	RMOR	RMIC
FV	<i>F. verticillioides</i>		Wang <i>et al.</i> (2021)
			Mohd <i>et al.</i> (2017)
			Sun <i>et al.</i> (2020)
			Olowe <i>et al.</i> (2020)
			Morales-Rodríguez <i>et al.</i> (2007)
			Velarde <i>et al.</i> (2018)
			Koch <i>et al.</i> (2020)
			Schoeman <i>et al.</i> (2018)
FN	<i>F. napiforme</i>		Olowe <i>et al.</i> (2020)
			Morales-Rodríguez <i>et al.</i> (2007)
			Basler (2016)
FE	<i>F. equiseti</i>		Wang <i>et al.</i> (2021)
			Velarde <i>et al.</i> (2018)
			Okello <i>et al.</i> (2019)

FV= *F. verticillioides*, FN= *F. napiforme*, FE= *F. equiseti*; RMOR= Referencias morfológicas; RMIC= Referencias morfométricas.

El género *Fusarium* tiene una distribución mundial y varias de sus especies son fitopatógenas e infectan una amplia gama de cultivos, incluyendo el maíz. Además, produce micotoxinas, las cuales representan un elevado riesgo para la salud humana y la de los animales que las consumen (Nicolaisen *et al.*, 2009; Butron *et al.*, 2015). La especie de *F. verticillioides* es considerada como el principal patógeno del maíz, debido a que puede afectar al cultivo en cualquier etapa de crecimiento, causando pudriciones en diversos órganos vegetativos de la planta, pero principalmente afecta al tallo y la mazorca (Hernández *et al.*, 2007; Duncan *et al.*, 2010), por otra parte, la especie de *F. napiforme* causa pudrición en la mazorca (Olowe *et al.*, 2020). Wang

(2021) mencionó que la especie de *F. equiseti* afecta principalmente a la raíz causando pudrición, sin embargo, es un patógeno débil en los cereales y ocasionalmente se encuentra asociado con granos infectados por *Fusarium* (Goswami y Kistler, 2004).

Emergencia de plántula (EPL)

Las especies *F. verticillioides* y *F. equiseti* afectaron las poblaciones 1 y 2, las cuales presentaron una EPL de 66.66%, además, las semillas inoculadas con *F. napiforme* resultaron con 73.33% de EPL en dichas poblaciones, sin embargo, el control en esas poblaciones mostró 100% de EPL, por otra parte, la población 3 aparentemente resultó ser la más tolerante a las especies de *Fusarium* inoculadas, ya que, en esta población se exhibieron resultados con mayor EPL. La suspensión de conidios con las que afectaron *F. verticillioides* y *F. equiseti* a las tres poblaciones de maíz fue de 1×10^4 conidios /mL, sin embargo, *F. equiseti* fue la que afectó en mayor proporción con 1×10^6 conidios /mL (66.66%), no obstante, las semillas inoculadas con la suspensión 1×10^8 conidios /mL presentaron EPL similar (80%) (Fig. 9).

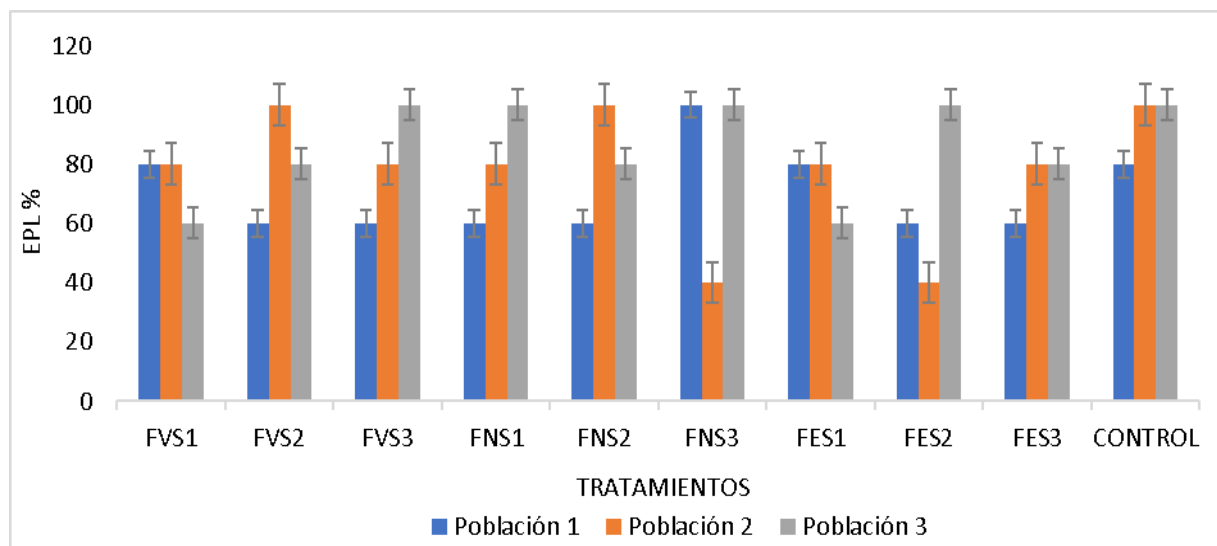


Figura 9. Emergencia de las plántulas de maíz peruano con los diferentes tratamientos. FV= *F. verticillioides*; FN= *F. napiforme*; FE= *F. equiseti*; S1= 1×10^4 ; S2= 1×10^6 ; S3= 1×10^8 .

La comparación entre poblaciones muestra que la población 3 presentó la mayor EPL mostrando un 86%, mientras que las poblaciones 1 y 2 presentaron un 70 y 78%, respectivamente, es decir, la población 1 fue la más afectada por *Fusarium* spp. en sus diferentes suspensiones inoculadas. Vujanovic *et al.* (2000), Malonek *et al.* (2005), Troncoso (2013) y Salazar (2018) han reportado que algunas especies de *Fusarium* son productoras de metabolitos secundarios tales como giberelinas que son fitohormonas que promueven la germinación de la semilla, en nuestra investigación se observó que la suspensión 1×10^8 conidios /mL presentó 80% de EPL en las 3 poblaciones. Por otro lado, Chang *et al.* (2018) realizó un estudio en soya en el cual reportó que hubo una fuerte correlación positiva de la patogenicidad de las especies de *Fusarium* con la emergencia de las plántulas y el peso de las raíces frescas, en contra parte, Díaz-Arias *et al.* (2013) mencionaron que la pudrición de la raíz por *Fusarium* spp. a menudo da como resultado una emergencia deficiente, plántulas atrofiadas, crecimiento débil y pérdida de rendimiento.

Longitud de raíz (LRA) y Longitud de tallo (LTA)

En el Cuadro 5 se observa que la población 3 presentó la mayor LRA con 47.66 cm, mientras que la población 2 fue la que obtuvo menor LRA con 35.70 cm, es decir, hubo una diferencia entre dichas poblaciones de 11.96 cm. Por otra parte, las plántulas inoculadas con *F. equiseti* con las 3 suspensiones presentaron una LRA de 34.22 cm, mientras que las plantas inoculadas con *F. napiforme* una LRA de 46.49 cm, mientras que el control presentó una LRA de 52.2 a 56.8 cm, en la población 1 y 2, respectivamente. La suspensión de conidios que afectó la LRA en las tres especies de *Fusarium* inoculadas fue la 1×10^8 conidios/mL con una media de 38.60 cm, y la que menos daño hizo fue la 1×10^4 conidios/mL con 41.07 cm.

Cuadro 5. Longitud de raíz de las poblaciones de maíz morado peruano, afectadas por diferentes concentraciones de *Fusarium* spp.

Población	Tratamientos	Suspensiones			
		1 × 10 ⁴	1 × 10 ⁶	1 × 10 ⁸	Control
1	FV	32 ± 13.40	40.5 ± 36.70	30 ± 20.88	52.2 ± 17.02
	FN	32.10 ± 18.86	50.2 ± 34.09	46.2 ± 27.74	52.2 ± 17.02
	FE	33.8 ± 31.54	24 ± 33.14	37.9 ± 25.81	52.2 ± 17.02
2	FV	33.7 ± 35.13	51.2 ± 21.01	41.2 ± 26.69	56.8 ± 7.79
	FN	42.7 ± 29.29	52.4 ± 17.18	25 ± 25.20	56.8 ± 7.79
	FE	42.12 ± 26.61	13.4 ± 29.96	19.6 ± 30.30	56.8 ± 7.79
3	FV	36.8 ± 34.30	44 ± 27.01	41.2 ± 4.60	54.8 ± 7.79
	FN	71.5 ± 23.66	46.8 ± 28.40	51.5 ± 12.58	54.8 ± 7.79
	FE	44.95 ± 19.29	37.4 ± 16.33	54.8 ± 30.16	54.8 ± 7.79

FV= *F. verticillioides*; FN= *F. napiforme*; FE= *F. equiseti*.

La población 3 presentó la mayor LTA con 26.62 cm, mientras que la población 2 fue la que obtuvo menor LTA con 16.16 cm, las plantas inoculadas con la suspensión 1×10⁴ conidios/mL presentaron la menor LTA (16.97 a 21.83 cm), mientras que la inoculación con la suspensión 1×10⁸ conidios/mL presentaron los mayores resultados de la LTA que van de 21.10 a 23.18 cm, y la especie que sobresalió ocasionando un efecto negativo en la LTA de las plantas fue *F. equiseti*, y en el caso de las inoculaciones con *F. napiforme*, las plantas presentaron la mayor LTA (Cuadro 6). En general, los resultados de LRA y LTA fueron muy similares, siendo la población 3 la que mostró mayor tolerancia a las especies de *Fusarium* spp. al presentar mayor LRA y LTA, mientras que las poblaciones 1 y 2, fueron más susceptibles al daño por *Fusarium* spp.

Cuadro 6. Longitud de tallo de poblaciones de maíz morado peruano afectadas por diferentes concentraciones de *Fusarium* spp.

Población	Tratamientos	Suspensiones			
		1×10^4	1×10^6	1×10^8	Control
1	FV	27.5 ± 6.50	15 ± 18.26	16.6 ± 12.92	33.8 ± 3.11
	FN	16.1 ± 11.92	22.20 ± 13.02	23.9 ± 10.06	33.8 ± 3.11
	FE	17.6 ± 16.13	20.10 ± 16.02	16.75 ± 10.63	33.8 ± 3.11
2	FV	11.6 ± 11.76	27.2 ± 9.95	18.2 ± 14.21	36.4 ± 6.26
	FN	21.35 ± 12.42	22.8 ± 8.95	15 ± 17.07	36.4 ± 6.26
	FE	16.12 ± 9.91	4.6 ± 8.95	8.6 ± 12.40	36.4 ± 6.26
3	FV	16.5 ± 9.18	23.2 ± 13.60	29.4 ± 3.36	44.2 ± 8.22
	FN	28.05 ± 7.16	24.6 ± 13.97	24.4 ± 6.18	44.2 ± 8.22
	FE	17.2 ± 15.73	32 ± 1.22	44.2 ± 15.56	44.2 ± 8.22

FV= *F. verticillioides*; FN= *F. napiforme*; FE= *F. equiseti*.

Estudios reportan a *F. equiseti* como otra especie dominante asociada con la pudrición de raíz y tallo provocando una disminución de longitud de los mismos en cultivos de soja (Chang *et al.*, 2018) y trigo (Bencheikh *et al.*, 2020), en esta investigación fue similar también disminuyó los niveles de LRA y LTA. Por otra parte, Kuhnem *et al.* (2015); Ranzi *et al.* (2017) y Parikh *et al.* (2018) reportaron a las especies de *F. verticillioides* y *F. equiseti* como las más colonizadoras de la raíz en el cultivo de maíz.

Incidencia (IDP)

F. equiseti mostró la mayor incidencia sobre las tres poblaciones de maíz con 97.7%, no obstante, la población 1 presentó mayor incidencia, mientras que las inoculaciones con las 3 suspensiones (1×10^4 , 1×10^6 y 1×10^8 conidios/mL) fue de 60 a 100% de incidencia, por otra parte, las plantas en el control presentaron los valores más bajos de IDP (Figura 10).

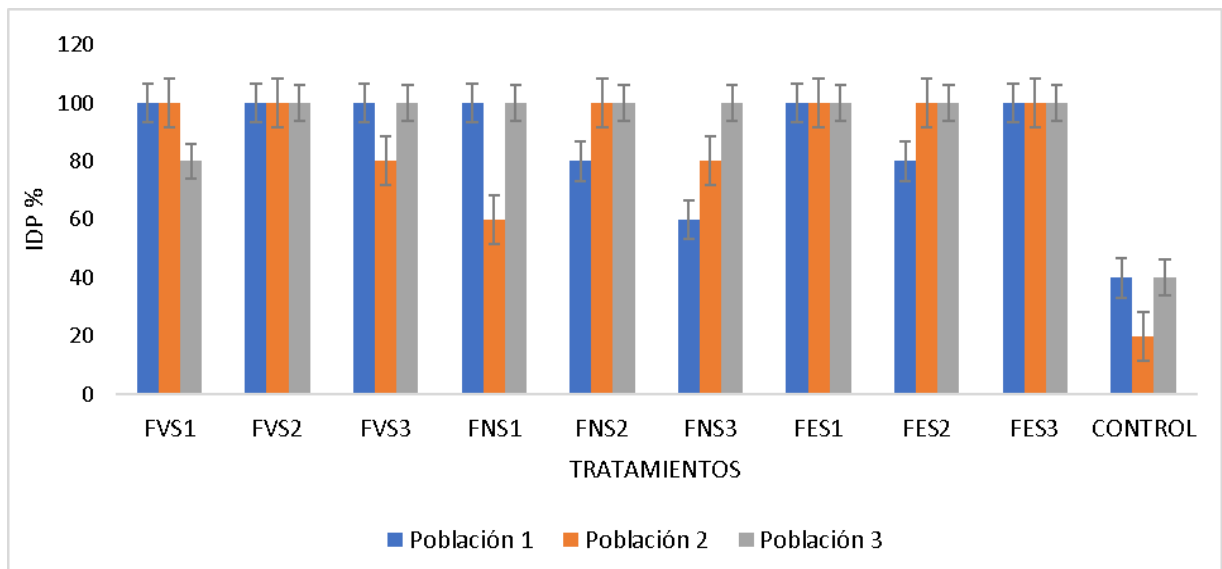


Figura 10. Incidencia de pudrición sobre plántulas del maíz morado peruano con los diferentes tratamientos en estudio.

Estos resultados son similares a lo reportado por Li *et al.* (2019) y Wang *et al.* (2021) quienes inocularon e identificaron semillas de maíz con este patógeno obteniendo altos niveles de incidencia afectando la planta, otro estudio realizado por Okello *et al.* (2019) reportaron a la especie *F. equiseti* como una de las especies con mayor incidencia y de las más comúnmente recuperadas de las raíces de las plántulas de maíz enfermas. Los bajos niveles de IDP en el control se puede atribuir a la incidencia natural de *Fusarium*, en este sentido, Ma *et al.* (2013) y Leyva-Mir *et al.* (2017), mencionaron que existen distintos factores bióticos y abióticos que pueden contribuir a la infección de este patógeno, siendo los principales, las condiciones climáticas, manipulación de plantas inoculadas, el agua de riego contaminada, daño por insectos, entre otros factores, así mismo, Hernández *et al.* (2007) y Chavarri *et al.* (2017) mencionaron que

otro factor importante que causa incidencia de *Fusarium*, es la semilla contaminada desde campo, ya que, cuando el maíz es cultivado bajo condiciones de temporal, se registran comúnmente hongos fitopatógenos que invaden al grano, destacando *Fusarium* spp., el cual es considerado como uno de los problemas más importantes en las zonas productoras de maíz a nivel mundial, afectando al cultivo en cualquier etapa de crecimiento. En nuestras plantas se les permitió que les diera la luz de sol por unos días y se encontró gusano cogollero *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) (Fig. 11), esta plaga además de provocar una ruta de entrada para los conidios de *Fusarium* spp. y ser un vector de estas, en estado de plántula puede causar una defoliación completa y dañar el meristemo apical en desarrollo (De la Torre-Hernández *et al.*, 2014).



Figura 11. Gusano cogollero alimentándose de la plántula de maíz.

Severidad (SDP)

Con base en el análisis estadístico se encontró diferencia significativa en la SDP ($P \leq 0.01$), la población 1 presentó el mayor nivel de severidad con 27.52%, mientras que la población 3 mostró el menor nivel con 22.36%, es decir, entre esas poblaciones hubo una diferencia de SDP de 5.16%, y en la suspensión 1×10^4 conidios/mL se presentó el mayor nivel de SDP (28.79%), sobresaliendo *F. verticillioides* con mayor SDP en las 3 suspensiones en estudio con 29.26%, mientras que las plantas inoculadas con *F. napiforme* mostraron la menor SDP con una media de 26.17%, además, todos los niveles de daño causados por las inoculaciones de *Fusarium* spp. se agruparon como máximo en el punto 2 (daño moderado desde la raíz hasta las primeras dos hojas) de acuerdo a la escala utilizada (Cuadro 7). En estudios realizados por Madania *et al.* (2013) y Ortiz-Bustos *et al.* (2015), obtuvieron una mayor severidad con las especies *F. verticillioides* y *F. equiseti* (las más virulentas), así mismo, Figueroa-Rivera *et al.* (2010) reportó a *F. verticillioides* como una de las especies que causa mayor daño en plántula con severidad de 35%, en otros estudios realizados por Leslie *et al.* (2005) y Mendoza *et al.* (2006) reportaron que *F. verticillioides* es la especie de hongos más ampliamente distribuida en todas las áreas maiceras del mundo y es considerada la de mayor capacidad patogénica, además, de que es capaz de colonizar en todo el ciclo vegetativo de las plantas, similar a lo obtenido en nuestra investigación.

Cuadro 7. Severidad de la pudrición de planta en poblaciones de maíz morado peruano por *Fusarium* spp.

P	T	1×10^4	E	1×10^6	E	1×10^8	E	Control	E
1	FV	33.12 ± 19.72	2	23.77 ± 10.48	1	30.75 ± 10.05	2	8.85 ± 8.39	1
	FN	25.81 ± 5.65	1	26.63 ± 7.57	2	29.65 ± 13.49	2	8.85 ± 8.39	1
	FE	40.85 ± 15.02	2	27.61 ± 3.73	2	28.22 ± 1.52	2	8.85 ± 8.39	1
2	FV	38.87 ± 14.15	2	34.87 ± 16.28	2	23.31 ± 20.16	1	3.69 ± 8.24	1
	FN	32.85 ± 11.76	2	25.18 ± 2.93	1	25.40 ± 10.43	1	3.69 ± 8.24	1
	FE	18.72 ± 20.16	1	16.76 ± 7.40	1	40.16 ± 28.90	2	3.69 ± 8.24	1
3	FV	18.4 ± 18.29	1	27.32 ± 16.76	2	32.94 ± 16.93	2	2.58 ± 5.77	1
	FN	22.41 ± 12.70	1	23.71 ± 21.52	1	23.91 ± 5.23	1	2.58 ± 5.77	1
	FE	28.06 ± 15.62	2	28.50 ± 20.74	2	15.78 ± 17.54	1	2.58 ± 5.77	1

P=Poblaciones de maíz; T= Tratamientos: FV= *F. verticillioides*; FN= *F. napiforme*; FE= *F. equiseti*; E= Escala del daño causado por *Fusarium* spp., 1= 1-25%, 2=26-50%.

Okello *et al.* (2019) realizaron un estudio similar en el cual utilizaron una suspensión de 1×10^6 conidios/mL y reportaron a *F. equiseti* como una de las especies con mayor severidad, presentando síntomas como decoloración de marrón a oscura en las plántulas y pudrición en las raíces; síntomas similares a los observados en esta investigación, sin embargo, en la presente investigación *F. equiseti* no fue la especie con mayor SDP, pero si obtuvo el valor más alto de severidad (40.85%) en la población 1 con una suspensión de 1×10^4 conidios/mL, por otro lado, Acuña (2019) también encontró porcentajes de severidad superiores a 40% por *Fusarium* spp. en los cultivos de maíz y frijol.

CONCLUSIONES

Se identificaron las especies de *F. verticilloides*, *F. equiseti* y *F. napiforme*. En la presente investigación *F. verticillioides* fue la especie más patogénica en cuanto a la severidad de daño en las plantas evaluadas.

La población 3, de acuerdo a los resultados de la investigación fue la que presentó mayor resistencia y a su vez las poblaciones 1 y 2 fueron las más susceptibles al daño por estas especies de *Fusarium*.

La identificación de las especies patogénicas en el cultivo del maíz es necesaria para identificar los daños ocasionados en este cultivo, los cuales disminuyen su rendimiento, por lo tanto, es de gran importancia identificar poblaciones con mayor resistencia a enfermedades, lo cual es una ventaja competitiva para utilizar una estrategia efectiva para el control preventivo y tratamiento de la enfermedad a nivel de campo.

LITERATURA CITADA

- Abarca, M., Bragulat, M., Castella, G., Accensi, F., y Cabañera, F. 2000.** Hongos productores de micotoxinas emergentes. *Revista Iberoamericana de micología.* 63-68.
- Acosta, R. 2009.** El cultivo del maíz, su origen y clasificación. El maíz en cuba. *Cultivos Tropicales*, 30 (2) 113-120.
- Acuña T, O. 2019.** Determinación del rango de hospedante de especies patogénicas asociadas al género *Fusarium* en cinco cultivos agrícolas. *Tesis de Licenciatura.* Universidad Nacional De San Martín – Tarapoto, Tarapoto – Perú.
- Aguilera, M. O., Reza, V. M del C., Chew, M. R. G. y Meza V. J.A. 2011.** Propiedades funcionales de las antocianinas. *Revista Biotecnia* 13(2),16-22.
- Agrios, G. N. 2001.** Fitopatología. 2 ed. Limusa. México. 838 p.
- Agrios, G. N. 2005.** Plant Pathology. Amsterdam: Quinta Edicion. Elsevier Academic Press. 922.
- AGROSAMEX. 2019.** Las plagas producen pérdidas de hasta un 40 por ciento en la producción agrícola, revela estudio de la FAO. Recuperado de <https://www.gob.mx/agroasemex/articulos/las-plagas-producen-perdidas-de-hasta-un-40-por-ciento-en-la-produccion-agricola-revela-estudio-de-la-fao?idiom=es> Fecha de consulta: 12/Julio/2021.
- Aquino, M, J. G., Sánchez Flores, A., González Huerta, A. y Sánchez Pale, J. R. 2011.** Resistencia de Variedades e Híbridos de Maíz (*Zea mays*) a *Sporisorium reilianum* y su Rendimiento de Grano. *Revista Mexicana de Fitopatología.* 29 (1) 39-49.
- Arbeláes Torres, G. 2000.** Algunos Aspectos de los Hongos del Género *Fusarium* y de la Especie *Fusarium oxysporum*. *Agronomía Colombiana.* 11-22.
- ASERCA, 2018.** Maíz grano cultivo representativo de México. <https://www.gob.mx/aserca/articulos/maiz-grano-cultivo-representativo-de-mexico?idiom=es> Fecha de consulta: 10/Julio/2021.
- Avilés González, M., Pérez Valdez, J. J., & Wong Pérez, J. 2016.** Principales plagas que atacan al cultivo de Maíz. *Agrosíntesis.* 13-18.
- Ayala, R. O., Navarro, F. and Virla, E. G. 2013.** Evaluation of the attack rates and level of damages by the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera:

Noctuidae), affecting corn-crops in the northeast of Argentina. *Rev. Fac. Cienc. Agr.* 45(2),1-12.

Babadoost M. 2018. *Fusarium*: Historical and Continued Importance. En línea: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74147> Fecha de consulta: 05/Junio/2021.

Basler R. 2016. Diversidad de especies de *Fusarium* aisladas de maíz forrajero del Reino Unido y estructura poblacional de *F. graminearum* de maíz y trigo. *PeerJ.* 4, 21-43.

Bencheikh, A., Rouag, Noureddine, Mamache, Walid, Belabed, Imene 2020. Primer informe de *Fusarium equiseti* que causa pudrición de la corona y marchitamiento en el trigo duro en Argelia. *Archivos de fitopatología y protección vegetal.* 53,19-20.

Bertechini, F. C., Lumi, A. C. A., da Silva, C. N., Tessmannand, D. J. and Barbosa, T. I. P. 2012. New PCR Assays for the Identification of *Fusarium verticillioides*, *Fusarium subglutinans*, and other species of the *Gibberella fujikuroi* Complex. *Int. J. Mol. Sci.* 13 (1), 115-32.

Briones-Reyes, D., Castillo-González, F., Chávez-Servia, J. L., Aguilar- Rincón V. H., García-de Alba, C. L. y Ramírez-Hernández, A. 2015. Respuesta del maíz nativo del altiplano mexicano a pudrición de mazorca bajo infección natural. *Agron. Mesoam.* 26(1), 73-85.

Butrón, A., Reid, L. M., Santiago, R., Cao, A., Malvar, A. 2015. Inheritance of maize resistance to *Gibberella* and *Fusarium* ear rots and kernel contamination with deoxynivalenol and fumonisins. *Plant Pathol.* 64, 1053- 1060.

CABRERIZO, C. 2012. “El maíz en la alimentación Humana”. Disponible en: www.infoagro.com Fecha de consulta 24/Mayo/2021.

Castro Carvajal, J. M., & Cruz Ortega, J. E. (2012). Manejo y control de malezas en maíz. *Agrosíntesis.* 25-26.

Chang, K. F., Conner, R. L., Hwang, S. F., Ahmed, H. U., McLaren, D. L., Gossen, B. D. and Turnbull, G. D. 2014. Effects of seed treatments and inoculum density of *Fusarium avenaceum* and *Rhizoctonia solani* on seedling blight and root rot of faba bean. *Revista canadiense de ciencia vegetal.* 94 (4), 693–700.

Chan, X., Dai, H., Wang, d. 2018. Identificación de especies de *Fusarium* asociadas con la pudrición de la raíz de la soja en la provincia de Sichuan, China. *Eur J Plant Pathol.* 151, 563–577.

Christensen, C. y Kaufmann, H. 1976. Contaminación por hongos en granos almacenados. México. p. 199.

- CESAVERG, 2021.** Comité Estatal de Sanidad Vegetal Guanajuato, A.C. Obtenido de Manual de plagas y enfermedades en maíz: http://cesaveg.org.mx/boletines/manual_maiz.pdf Fecha de consulta: 15/Junio/2021.
- Chavarri, M., Barroyeta, J., Ochoa, Y., Rumbos, N., & Alezones, J. 2017.** Detección de *Fusarium verticillioides* y fumonisinas en granos de maíz blanco provenientes de los estados Yaracuy y Guárico, Venezuela. *Nova scientia*. 9 (19), 171-184.
- CIMMYT, 2004.** Enfermedades del maíz: una guía para su identificación en el campo. Cuarta edición. México, D.F.:CIMMYT.
- Cisneros, L.M.E. 2004.** *Fusarium verticillioides* (Sacc) Nirenberg en híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. Tesis de maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillos, Texcoco, Edo de México. 159 p.
- CONACYT. 2021.** Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Obtenido de Maíz:<https://conacyt.mx/cibiogem/index.php/maiz> Fecha de consulta:12/Junio/2021.
- CONABIO. 2020.** Maíces. Obtenido de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices> Fecha de consulta: 11/Junio/2021.
- Cook RJ, 2010.** *Fusarium* root, crown and foot roots and associated seedling diseases. p. 37- 39. In Bockus, W.W., R.L. Bowden, R.M. Hunger, W.L. Morrill, T.D. Murray, and R.W. Smiley (eds.). Compendium of Wheat Diseases and Pests. 3rd. ed. APS Press, St. Paul, Minnesota, USA.
- De la Torre-Hernández, Ma. E., Sánchez-Rangel, D, Galeana-Sánchez, E, & Plasencia-de la Parra, J. 2014.** Fumonisinas-Síntesis y función en la interacción *Fusarium verticillioides*-maíz. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*. 17(1), 77-91.
- Deras, 2020.** El cultivo de maíz. Guía técnica. México, DF.: CIMMYT.
- Díaz Arias, M. M., Leandro, L., & Munkvold, G. 2013.** Aggressiveness of *Fusarium* species and impact of root infection on growth and yield of soybean. *Phytopathology*. 103, 822–832.
- Duncan, K.E. & Howard, R.J. 2010.** Biology of maize kernel infection by *Fusarium verticillioides*. *Mol. Plant-Microbe Interact*. 23, 6-16.

- Eckard, S.; Wettstein, F. E.; Forrer, H. R. and Vogelgsang, S. 2011.** Incidence of *Fusarium* species and mycotoxins in silage maize. *Toxins*. 3, 949-967.
- Ellis, M. L., Díaz Arias, M. M., & Leandro, L. F. 2013.** First report of *Fusarium armeniacum* causing seed rot and root rot on soybean (*Glycine max*) in the United States. *Plant Disease*. 97, 1557–1562.
- FAO, 2011.** Biodiversity for food and agriculture. Contributing to food security and sustainability in a changing world. Food and Agriculture Organization of the United Nations and the Platform for Agrobiodiversity Research. Disponible en: <http://www.food-security.nl/resource/biodiversity-food-and-agriculture-contributing-food-security-and-sustainability-changing-wo>
- FAO, 2013.** Manual Sobre la Aplicación del Sistema de Análisis de Peligros y De Puntos Críticos de Control (APPCC) en la Prevención y Control de las Micotoxinas. Roma: Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación.
- FAOSTAT, 2021.** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize> Fecha de consulta: 12/Junio/2021.
- Fei, L. 2016.** Beneficios para la salud de maíz morado (*Zea mays* L.) compuestos fenólicos. comprehensive reviews in food science and food safety, 2021, 1- 15. Citado por Fei Lao, Gregory T. Sigurdson, M Monica Giusti
- Fernández, S. R, Morales, Ch. L. A. y Gálvez, M. A., 2013.** Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional. Una revisión indispensable. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 3(36) 275-283.
- Figueroa-Rivera MG, Rodríguez-Guerra R, Guerrero-Aguilar BZ, González-Chavira MM, Pons-Hernández JL, Jiménez-Bremont JF, Ramírez-Pimentel JG, Andrio-Enríquez E, Mendoza-Elos M. 2010.** Caracterización de Especies de *Fusarium* Asociadas a la Pudrición de Raíz de Maíz en Guanajuato, México. *Revista mexicana de fitopatología*. 28(2), 124- 134.
- Guillén-Sánchez, J, Mori-Arismendi, S, & Paucar-Menacho, L M. 2014.** Características y propiedades funcionales del maíz morado (*Zea mays* L.) var. subnigroviolaceo. *Scientia Agropecuaria*. 5(4), 211-217.
- González, H.A., Vázquez, G.L.M., Sahagún, C.J., Rodríguez, P.J.E., y Pérez, L.D.J. 2007.** Rendimiento del maíz de temporal y su relación con la pudrición de mazorca. *Agricultura Técnica en México*. 33, 33–42.
- González, A. 2017.** Principales plagas del cultivo de Maíz. *Agrosíntesis*. 18-19.

- Goswami, R.S., & Kistler, H.C. (2004).** Heading for disaster: *Fusarium graminearum* on cereal crops. *Molecular Plant Pathology*. 5, 515–525.
- Gullón, P., Eibes, G., Lorenzo, J., Pérez-Rodríguez, N., & Gullón, B. 2020.** Proceso verde sostenible para revalorizar mazorcas de maíz morado dentro de un marco de biorrefinería: coproducción de extractos bioactivos. *Ciencia del Medio Ambiente Total*.
- Hernández DS, Reyes MA, García JG, Mayek N y Reyes CA. 2007.** Incidencia de Hongos Potencialmente Toxígenos en Maíz (*Zea mays* L.) Almacenado y Cultivado en el Norte de Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 25, 120-133.
- Hernández, O. 2010.** Detención y caracterización del agente causal del tizón foliar en Teca (*Tectona grandis* L. F.) en Huimanguillo, Tabasco. Tesis de Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Chapingo. México. 63 p.
- Jacobo Quispe, J., Arroyo Condorena, K., & Gorriti Gutiérrez, A. G. 2011.** Características Morfológicas y Químicas De 3 Cultivares De Maíz Morado (*Zea mays* L.) en Arequipa - Perú. *Rev. Soc. Quím.* 205-217.
- Kuhnem, Paulo R.; Del Ponte, Emerson M.; Dong, Yanhong; Bergstrom, Gary C. (2015).** *Fusarium graminearum* Isolates from Wheat and Maize in New York Show Similar Range of Aggressiveness and Toxigenicity in Cross-Species Pathogenicity Tests. *Phytopathology*. 105 (4), 441–448.
- Koch, E., Zink, P., Pfeiffer, T. 2020.** Métodos de inoculación artificial para ensayar microorganismos como agentes de control del tizón de las plántulas de maíz por *Fusarium* transmitido por las semillas y el suelo. *J Plant Dis Prot.* 127, 883–893.
- Leslie, J., Zeller, K., Lamprecht, S., Rheeder, J., & Maracas, W. 2005.** Toxicity, pathogenicity, and genetic differentiation of five species of *Fusarium* from Sorghum and Millet. *Phytopathology*. 95, 275-283.
- Leslie JF, Summerell BA. 2006.** The *Fusarium* Laboratory Manual. Ames, Iowa, USA: Blackwell Publishing. 387 p.
- Leyva-Mir, S. G., Vega-Portillo, H. E., Villaseñor-Mir, H. E., Tlapal-Bolaños, B., Vargas-Hernández, M., Camacho-Tapia, M., & Tovar-Pedraza, J. M. 2017.** Caracterización De Especies De *Fusarium* Causantes De. *Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia*. 142-151.

- Linares, E. y Bye, R. 2012.** La milpa: patrimonio biológico y cultural de México, en el frijol, un regalo de México al mundo, México: Fundación Herdez. pp. 69-83.
- Li, Lina., Qu, Qing, Cao., Zhiyan,Guo., Zhengyu, Jia, Hui.,Liu, Ning., Wang, Yanhui., Dong, Jingao. 2019.** El análisis de la relación entre la pudrición del tallo del maíz y la pudrición de la mazorca según las especies de *Fusarium* y la contaminación por fumonisinas en los granos. *Toxinas*. 11 (6), 320–328.
- López Naranjo, L. M. 2013.** Principales micotoxicosis asociadas al consumo de maíz y sus subproductos. *Trabajo de grado*. Corporación Universitaria Lasallista, Caldas -Antioquia.
- López, L. 2014.** Principales micotoxicosis asociadas al consumo de maíz y sus subproductos. (*Tesis de Licenciatura*). Repositorio internacional, Caldas - Antioquia.
- Ma, L. J.; Geiser, D. M.; Proctor, R. H.; Rooney, A. P.; O'Donnell, K., Trail, F. y Kazan, K. 2013.** *Fusarium* Pathogenomics. *Annual review of microbiology*. 67, 399-416.
- Madania, Ammar., Altawil, Merfat., Naffaa, Walid., Volker, Paul H., Hawat, Mohammad. 2013.** Caracterización morfológica y molecular de *Fusarium* aislado de maíz en Siria. *Revista de fitopatología*. 161 (7-8), 452-458.
- Malonek, S., Bömke, C., Bornberg-Bauer, E., Rojas, M. C., Hedden, P., Hopkins, P., & Tudzynski, B. 2005.** Distribution of gibberellin biosynthetic genes and gibberellin production in the *Gibberella fujikuroi* species complex. *Phytochemistry*. 66(11), 1296-1311.
- Mendoza EM, López BAO, Oyervides GA, Martínez ZG, De León C, Moreno ME. 2003.** Herencia genética y citoplasmática de la resistencia a la pudrición de la mazorca de maíz (*Zea mays* L.) causada por *Fusarium moniliforme* Sheld. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 21, 267-271.
- Mendoza, E., Andrio, E., López, B., Rodríguez, G., Latoumerie, M., & Rodríguez, H. 2006.** Tasa de infección de la pudrición del tallo en maíz causada por *Fusarium moniliforme*. *Agronomía Mesoamericana*. 17, 19-24.
- Mohd, Z.N.A.I.; Hamzah, F.A.; Kusai, N.A.; Zambri, N.S.; Salleh, S. (2017).** Caracterización y patogenidad de *Fusarium proliferatum* and *Fusarium verticillioides*, causal agents of *Fusarium* ear rot of corn. *Turkish Journal of Biology*. 41, 220-230.
- Mokobi F. 2020.** *Fusarium* spp. <https://microbenotes.com/fusarium-spp/> Fecha de consulta: 21/Junio/2021.

- Morales-Rodríguez, I de Yáñez-Morales, MJ, Silva-Rojas, HV. 2007.** Biodiversidad de las especies de *Fusarium* en México asociadas a la pudrición de la mazorca del maíz y su identificación mediante un enfoque filogenético. *Mycopathologia*. 163, 31–39
- Nelson PE, Toussoun TA, Cook RJ. 1981.** *Fusarium: Diseases, Biology and Taxonomy*. University Park, Pennsylvania, USA: Pennsylvania State University Press; 457 p.
- Nelson, P.E. 1991.** History of *Fusarium* systematics. In Recent Advances in fusarium systematics. *Phytopathology* vol.81, No 9 1045-1048, U.S.A.
- Nicolaisen; Skaidrė Supronienė; Linda Kærgaard Nielsen; Irene Lazzaro; Niels Henrik Spliid; Annemarie Fejer Justesen. 2009.** Real-time PCR for quantification of eleven individual *Fusarium* species in cereals. 76 (3), 0–240.
- Oldenburg E, Höppner F, Ellner F, Weinert J. 2017.** Enfermedades por *Fusarium* del maíz asociadas con la contaminación por micotoxinas de productos agrícolas destinados a ser utilizados para alimentos y piensos. *Micotoxina Res* 33, 167–182.
- Ortiz-Bustos, C.M.; García-Carneros, A.B.; Molinero-Ruiz, L. 2015.** La marchitez tardía del maíz (*Zea mays* L.) causada por *Cephalosporium maydis* en la Península Ibérica, y otros hongos asociados. *Summa Phytopathologica*. 41(2), 107-114.
- Okello, Paul N., Petrović, Kristina., Kontz, Brian., Mathew, Febina M. 2019.** Ocho especies de *Fusarium* causan la pudrición de la raíz del maíz (*Zea mays*) en Dakota del Sur. *Progreso en sanidad vegetal*. 20 (1), 38–43.
- Olowe, Olumayowa M., Asemoloye, Michael D., Olawuyi, Odunayo J. 2020.** Cepas de *Fusarium* recientemente identificadas que causan pudrición de la mazorca de maíz y su control utilizando *Glomus clarum* y *G.deserticola*. *Plant Biosystems*. 1-13.
- OMS. 2018.** Organización Mundial de la Salud. Micotoxinas. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mycotoxins> Fecha de consulta: 12/Junio/2021.
- Páliz, V., & Mendoza, J. 1999.** Plagas del maíz (*Zea mays*) [Pdf]. Ecuador <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/1616/1/Plagas%20de%20maiz%20%28Paliz%29%20Comunicaic%C3%B3n%20t%C3%A9cnica%20sin%20n%C3%BAmero.pdf> Fecha de consulta: 18/Junio/2021.
- Paliwal, R., Granados, G., Lafitte, H., & Violic, A. 2001.** El Maíz En Los Trópicos: Mejoramiento y producción [HTM] Roma.

<http://www.fao.org/3/x7650s/x7650s10.htm#TopOfPage>. Fecha de consulta: junio de 2021.

- Parikh, L., Kodati, S., Eskelson, MJ., Adesemoye, AO. 2018.** Identificación y patogenicidad de *Fusarium* spp. en cultivos en hileras en Nebraska. Protección de cultivos. 108, 120-127.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J. P. and Garcia-Casal, M. N., 2014.** Global maize production, utilization, and consumption. Annals of the New York Academy of Sciences. 1312, 105-112.
- Ranzi, C., Camera, JN y Deuner, C. 2017.** Influencia del cultivo continuo en patógenos de maíz y soja. *Summa Phytopathol.* 43, 14-19.
- Requis, V. F. 2012.** INIA. Obtenido de Manejo Agronómico del Maíz Morado en los Valles Interandinos del Perú. <https://core.ac.uk/download/pdf/250081512.pdf>
Fecha de consulta:21/Junio/2021.
- Richaroson, M. 1979.** An annotated list of seed-borne diseases.England. p. 98 105; 254 265.
- Rosales Robles, E., & De la Garza Caballero, M. 2006.** Control Químico de Maleza. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/37.pdf>
- Samuels GJ, Nirenberg HI and Seifert KA. 2001.** Perithecial species of *Fusarium*. In: B Summerell, ed. Paul E
- Salazar, S. 2018.** Aislamiento e identificación de cepas fúngicas de *Stanhopea tigrina* productoras de giberelinas con efecto benéfico para la orquidea. (*Tesis de Doctorado*). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla.
- Sánchez, O. I. 2014.** Maíz (*Zea mays*). *Reduca (Biología)*. 151-151.
- SAGARPA. 2017.** Maíz Grano Blanco Y Amarillo Mexicano. Secretaria De La Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca Y Alimentación.
- Schoeman, A., Flett, B.C., van Rensburg, J.B., Ncube, E., Viljoen, A. 2018.** Pathogenicity and toxigenicity of *Fusarium verticillioides* isolates collected from maize roots, stems and ears in South Africa. *Eur J Plant Pathol.* 152, 677-689.
- Seminis. 2017.** Seminis. Obtenido de Qué es y Cómo ataca El *Fusarium*: <https://www.seminis.mx/blog-que-es-y-como-ataca-el-fusarium/> Fecha de consulta: 18/Junio/2021.

- Seminis. 2021.** Pudrición de cuello y raíces por *Fusarium*. Bayer Cross Design and Seminis. <https://www.seminislas.com/recursos/guias-deenfermedades/tomates/fusarium-crown-rootrot/> Fecha de consulta: 05/ Julio de 2021.
- Shipp, J. y Abdel-Aal, S. M., 2010.** Food Applications and Physiological Effects of Anthocyanins as Functional Food Ingredients. *The Open Food Science Journal*. 4, 7-22.
- Sillón, M. 2020.** Las principales enfermedades fúngicas del maíz. *Horizonte*. 7-12.
- SIAP, 2021.** Atlas Agroalimentario. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020 Fecha de consulta: 05/Julio/2021.
- Solano-Báez, Alma Rosa, De León-García De Alba, Carlos, Valdovinos-Ponce, Guadalupe, Silva-Rojas, Hilda Victoria, & Soto-Rojas, Lauro. 2011.** La pigmentación de *Fusarium verticillioides* (sacc.) como factor de virulencia en plántulas de maíz. *Agronomía Mesoamericana*. 22 (2), 297-307.
- Sumalan, R. M.; Alexa, E., y Poiana, M. A. 2013.** Assessment of inhibitory potential of essential oils on natural mycoflora and *Fusarium* mycotoxins production in wheat. *Chemistry Central Journal*. 7(1), 1-12.
- Sun, L., Wang, S.; Zhang, W., Chi, F.; Hao, X.; Bian, J.; Li, Y. 2020.** First report of sheath rot of corn caused by *Fusarium verticillioides* in Northeast China. *Journal of Plant Pathology*.
- Tapia C, Amaro J. 2014.** Género *Fusarium*. *Revista chilena de infectología*. 31(1), 85-86.
- Thomas, M.D., y I.W. Buddenhagen. 1980.** Incidence and persistence of *Fusarium moniliforme* in symptomless maize kernels and seedlings in Nigeria. *Mycologia*. 72, 882-887.
- Troncoso, C. 2013.** Caracterización de la biosíntesis de giberelinas en hongos del Género *Fusarium* pertenecientes al complejo taxonómico *Gibberella fujikuroi*. (Tesis de Doctorado). Universidad de Chile, Santiago-Chile.
- Velarde Félix, Sixto, Valdez Rubio, Nallely, Zamora Galván, Francisco, López Molina, Ramón, Melgoza Villagómez, Claudia María, & Garzón Tiznado, José Antonio. 2018.** Identificación molecular de *Fusarium* spp. aislados de maíz en Sinaloa, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 9(8), 1675-1689.

Vujanovic, V., St-Arnaud, M., Barabé, D., & Thibeault, G. (2000). Viability testing of orchid seed and the promotion of colouration and germination. *Annals of Botany*. 86(1), 79-86.

Wang, W., Wang, B., Sun, X. 2021.Symptoms and pathogens diversity of Corn *Fusarium* sheath rot in Sichuan Province, China.Sci Rep.11, 28-35.

ANEXOS

Análisis de varianza de la variable Severidad para las tres poblaciones de maíz inoculadas con las tres cepas de *Fusarium spp.*

FV	GL	SC	CM	F	Pr > F
Modelo	39	23978.78	614.84	3.24	<.0001
Error	140	26554.09	189.67		
Total	179	50532.87			

FV	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repeticiones	4	509.91	127.47	0.67	0.6124
Poblaciones	2	958.10	479.05	2.53	0.0836
Cepa	2	130.56	65.28	0.34	0.7094
Tratamientos	3	17436.78	5812.26	30.64	<.0001
Poblaciones*Cepa* Tratamientos	28	4943.40	176.55	0.93	0.5701

Análisis de varianza de la variable Longitud de Raíz para las tres poblaciones de maíz inoculadas con las tres cepas de *Fusarium spp.*

FV	GL	SC	CM	F	Pr > F
Modelo	39	28083.09	720.07	1.13	0.2967
Error	140	89111.57	636.51		
Total	179	117194.67			

FV	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repeticiones	4	2464.67		0.97	0.4272
Poblaciones	2	3285.98	1642.99	2.58	0.0793
Cepa	2	4610.65	2305.32	3.62	0.0292
Tratamientos	3	4226.91	1408.97	2.21	0.0892
Poblaciones*Cepa* Tratamientos	28	13494.87	481.95	0.76	0.8029

Análisis de varianza de la variable Longitud de Raíz para res poblaciones de maíz inoculadas con las tres cepas de *Fusarium spp.*

FV	GL	SC	CM	F	Pr > F
Modelo	39	16475.04	422.43	3.07	<..0001
Error	140	19261.65	137.58		
Total	179	35736.70			

FV	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repeticiones	4	947.99	236.99	1.72	0.1483
Poblaciones	2	3141.98	1570.99	11.42	<.0001
Cepa	2	610.37	305.18	2.22	0.1126
Tratamientos	3	8457.65	2819.21	20.49	<.0001
Poblaciones*Cepa* Tratamientos	28	3317.03	118.46	0.86	0.6683