

TEXTURA DEL SUELO Y SU EFECTO SUPRESOR DEL POTENCIAL PATOGENICO DE *Fusarium oxysporum* f. sp. *cepae* EN CEBOLLA (*Allium cepa* L.)

SOIL TEXTURE AND SUPPRESSIVENESS EFFECT OF PATHOGENIC POTENTIAL OF *Fusarium oxysporum* f. sp. *cepae* ON ONION (*Allium cepa* L.)

Martín Abraham Tirado-Ramírez^{1a}, Jesús Enrique López-Avendaño^{1b*}, Leonardo Román-Román^{1c}, Norma Delia Zazueta-Torres² y Guadalupe Alfonso López-Urquidez^{1d}

^{1a} Facultad de Agronomía/Universidad Autónoma de Sinaloa, km 7.5 carretera Culiacán-Eldorado, CP 80398, Culiacán, Sinaloa, México

<https://orcid.org/0000-0002-4842-4246>

^{1b} Facultad de Agronomía/Universidad Autónoma de Sinaloa, km 7.5 carretera Culiacán-Eldorado, CP 80398, Culiacán, Sinaloa, México

<https://orcid.org/0000-0003-2454-0805>

^{1c} Facultad de Agronomía/Universidad Autónoma de Sinaloa, km 7.5 carretera Culiacán-Eldorado, CP 80398, Culiacán, Sinaloa, México

<https://orcid.org/0000-0002-5946-6257>

^{1d} Facultad de Agronomía/Universidad Autónoma de Sinaloa, km 7.5 carretera Culiacán-Eldorado, CP 80398, Culiacán, Sinaloa, México

<https://orcid.org/0000-0001-8968-6771>

² ITS Eldorado/Tecnológico Nacional de México, Av. Tecnológico S/N, Col. Rubén Jaramillo, CP 80450, Eldorado, Sinaloa, México

<https://orcid.org/0000-0001-5185-8283>

* Autor de correspondencia: profe.jesus@uas.edu.mx

RESUMEN

En México, la producción de cebolla (*Allium cepa* L.) se ve afectada por hongos fitopatógenos, destacando a *Fusarium oxysporum* f. sp. *cepae* como causante de la pudrición basal en este cultivo. Presenta una alta capacidad de reproducción, supervivencia y diseminación, lo que hace fundamental estudiar su comportamiento en interacción con la textura de suelo, para diseñar estrategias de control con menor impacto ambiental. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes texturas de suelo sobre la supresividad del potencial patógeno (severidad y reproducción) de *F. oxysporum* f. sp. *cepae* en el cultivo de cebolla. Se utilizaron muestras de suelo de seis clases texturales, las cuales se colocaron en contenedores de plástico, todo previamente desinfectado. Se plantaron dieciocho plantas de cebolla por contenedor, bajo dos tratamientos, inoculados con *Fusarium* y un control, sin inocular (cada textura de suelo correspondió a un tratamiento, y cada tratamiento incluyó tres repeticiones). Se evaluó el Índice de Severidad de la Enfermedad (DSI, en inglés) sobre plantas y bulbos de cebolla, así como, la densidad o reproducción del patógeno a través de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) en las texturas de suelo. El mayor efecto supresor del suelo se presentó en los de textura franca, franco-arenosa y franco-arcillosa, presentando un menor DSI, con valores de 4,17, 6,25 y 8,33% para planta y 0,362, 0,481 y 0,619% para bulbo, respectivamente, así como un menor

potencial patogénico frente a *Fusarium*. Los suelos con textura franco-limosa y limosa presentaron la menor supresividad y mayor potencial patogénico para *Fusarium*.

Palabras clave: hongos fitopatógenos, índice de severidad, pudrición basal, supresividad del suelo

ABSTRACT

In Mexico, onion (*Allium cepa* L.) production is affected by phytopathogenic fungi, with *Fusarium oxysporum* f. sp. *cepae* standing out as the cause of basal rot in this crop. It exhibits a high capacity for reproduction, survival, and dissemination, making it essential to study its behavior in relation to soil texture in order to design control strategies with lower environmental impact. The aim of this study was to evaluate the effect of different soil textures on the suppressiveness of pathogenic potential (severity and reproduction) of *F. oxysporum* f. sp. *cepae* in onion crop. Soil samples from six textural classes were used and placed in previously disinfected plastic containers. Eighteen onion plants were planted per container with two treatments: one inoculated with *Fusarium* and the control treatment, non-inoculated (each soil texture corresponded to one treatment, and each treatment included three replicates). The Disease Severity Index (DSI) was evaluated on onion plants and bulbs, as well as the density or reproduction of the pathogen through Colony Forming Units (CFU) in soil textures. The greatest suppressive effect of the soil was observed in loam, sandy loam, and clay loam soils, which exhibited lower DSI, with values of 4.17, 6.25 and 8.33% for plants and 0.362, 0.481 and 0.619% for bulbs, respectively, as well as lower pathogenic potential against *Fusarium*. The soils with silty loam and silty textures showed the lowest suppressiveness and highest pathogenic potential toward *Fusarium*.

Keywords: phytopathogenic fungi, severity index, basal rot, soil suppressiveness.

INTRODUCCIÓN

En México, la cebolla es una de las principales hortalizas cultivadas por su alto consumo nacional, generación de empleo, área cosechada y una producción aproximada de 1,6 millones de toneladas (SIAP, 2024). Sin embargo, la producción agrícola se ve afectada por diferentes especies de hongos de origen edáfico y acuático (Cárdenas-Rodríguez et al., 2022), destacando el género *Fusarium* como hongo fitopatógeno causante de una destrucción devastadora de muchas frutas y verduras. Además, se ha reportado como agente causal de infecciones en humanos y animales, asimismo, como causante de intoxicaciones por la ingesta de alimentos contaminados en personas de todas partes del mundo (Awuchi et al., 2021). *F. oxysporum* f. sp. *cepae* es el agente causal de la pudrición basal en cebolla (Kalman et al., 2020; Degani y Kalman, 2021; El-Komy et al., 2023; Vetrova et al., 2024); asimismo, de la misma manera, se han reportado pérdidas de campo superiores al 50%, aunado a las pérdidas en almacenamiento debido al desarrollo de la enfermedad al interactuar con otros patógenos (Degani y Kalman, 2021; Sharma et al., 2022). *F. oxysporum* f. sp. *cepae* se establece en las raíces de cebolla por penetración directa o por aberturas y heridas naturales, produciendo síntomas en las plantas tales como amarillamiento y/o necrosis de las hojas desde las puntas hacia abajo, enanismo, bulbos blandos, tallos y raíces con un color café

rojizo (Tirado-Ramírez et al., 2021; Haapalainen et al., 2023). El manejo de la enfermedad de la pudrición basal en cebolla se ha basado en el uso continuo de fungicidas sintéticos (Afzal et al., 2021).

Un suelo supresor es aquel en el que, a pesar de la presencia de cultivos susceptibles y condiciones climáticas favorables para el desarrollo de la enfermedad, los organismos fitopatógenos no logran asentarse o persistir, es decir, el fitopatógeno se establece, pero no causa daño en las plantas, o bien la gravedad de la enfermedad se reduce progresivamente. El efecto supresor del suelo sobre los patógenos de las plantas puede tener un origen físico, químico y/o biológico (Jayaraman et al., 2021; Samaddar et al., 2021). El estudio del efecto de supresión de los suelos sobre los fitopatógenos conduce a una mayor comprensión del comportamiento de éstos, lo que podría derivar en un manejo integral más eficiente y uso de estrategias sustentables de control bioracional de las enfermedades causadas por éstos.

Dentro de las propiedades físicas, la textura del suelo (principalmente la granulometría) es un factor importante debido a su alta influencia en las características del suelo, tales como aireación, capacidad de retención de agua, infiltración, estado de nutrientes, contenido de humedad, densidad y compactación (Xia et al., 2020; Guo et al., 2022). Los suelos arcillosos o suelos con alta capacidad de retención de agua, pero mal drenaje, generan graves problemas de *Fusarium*

en los cultivos, debido a que el desarrollo del fitopatógeno se ve favorecido por condiciones de alta humedad y temperaturas alrededor de los 20 °C (Yan y Nelson, 2022).

En el estado de Sinaloa, la producción de cebolla se realiza bajo diferentes condiciones edafoclimáticas, y cada año se reportan pérdidas en calidad y cantidad causadas por *Fusarium*, generando además un impacto negativo en los ecosistemas de cebolla por el uso excesivo de productos químicos, esto, con el objetivo de reducir los efectos de la enfermedad. Se realizaron estudios en la principal zona productora de cebolla del estado de Sinaloa (centro-norte) para identificar los agentes causales de la pudrición basal, reportándose las especies *F. falciforme*, *F. brachygibbosum* y *F. oxysporum*, como las más frecuentes. De estas tres especies, los aislamientos de *F. oxysporum* representaron el 88,9% del total de muestras colectadas en esta zona (Tirado-Ramírez et al., 2021). Por lo tanto, es fundamental comprender el comportamiento de *F. oxysporum* f. sp. *cepae* en los diferentes sistemas de producción, y la interacción de las diferentes texturas de suelo en la supresión y el potencial patogénico del hongo, con el objeto de diseñar estrategias con un menor impacto ambiental. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes texturas de suelo sobre la supresividad del potencial patogénico (severidad y reproducción) de *F. oxysporum* f. sp. *cepae* en el cultivo de cebolla.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en los invernaderos ubicados en la Estación Experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, localizada dentro del Valle de Culiacán, al noroeste de México. La región se caracteriza por un clima semiárido cálido (Bsh,

de acuerdo con la clasificación de Köppen) con temperatura media mensual de 24,6°C, registrando una temperatura máxima de 43°C y mínima de 0,6°C. La precipitación promedio anual es de 705 mm, con temporada de lluvias marcada de julio a septiembre.

Para este estudio se tomaron muestras de suelo en diversos sitios de la zona agrícola del Valle de Culiacán. La textura del suelo se determinó aplicando el método del hidrómetro de Bouyoucos (1962) y la clasificación textural estándar del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, obteniéndose posteriormente la caracterización hidrofísica (Tabla 1).

Las seis texturas de suelo se esterilizaron a 120 °C durante 24 h, y posteriormente se llenaron 36 contenedores de plástico desinfectados con dimensiones de 60 × 30 × 20 cm, los cuales se cubrieron con una malla permeable que permitiera la salida vertical de agua. Cada contenedor contenía 18 plantas de cebolla. El aislamiento monospórico de *F. oxysporum* f. sp. *cepae* utilizado en el presente estudio fue de acuerdo con Tirado-Ramírez et al. (2021), quienes realizaron un programa de muestreo en plantas de cebolla en la zona centro-norte del estado de Sinaloa. La dosis de inóculo de *F. oxysporum* fue de 6×10^4 mL⁻¹ de suelo; la inoculación del patógeno se realizó mediante una suspensión conidial de 20 mL obtenida del aislamiento Fo24, registrado en banco de genes del NCBI con número de accesión MH041263.

Para la obtención de las plantas de cebolla se sembró semilla del cultivar 'Carta blanca' en charolas de polietileno de 200 cavidades en vermiculita previamente esterilizada durante 45 días, para luego ser trasladadas a los contenedores plásticos. La fertilización de las plantas se hizo siguiendo la metodología descrita por López-Urquidez et al. (2021). El riego se aplicó con agua esterilizada, y con el objeto de controlar

Tabla 1. Características físicas de las unidades de suelo analizadas.

Table 1. Physical characteristics of the soil units analyzed.

Textura	Contenido de partículas (%)			Ks (mm h ⁻¹)	Da (g cm ⁻³)	PMP (cm ³ cm ⁻³)	CC (cm ³ cm ⁻³)	HTA (cm ³ cm ⁻³)
	A	L	Ar					
Franco-arenoso	62	18	20	29,0	1,46	0,122	0,221	0,099
Franco	42	34	24	15,2	1,43	0,148	0,282	0,134
Franco-limoso	23	56	21	12,1	1,41	0,133	0,307	0,174
Limoso	8	82	10	11,8	1,47	0,074	0,305	0,231
Franco-arcilloso	28	40	32	7,6	1,36	0,195	0,346	0,151
Arcilloso	15	27	58	2,7	1,12	0,341	0,472	0,131

A = Arena; L = Limo; Ar = Arcilla; Ks = Conductividad hidráulica a saturación; Da = Densidad aparente; PMP = Punto de Marchitez Permanente; CC = capacidad de campo; HTA = Humedad Totalmente Aprovechable.

la humedad de las seis texturas de suelo, esta se mantuvo dentro de los umbrales de humedad, fácilmente aprovechable para el cultivo de cebolla en todos los tratamientos analizados; para ello, se aplicó un 20% de abatimiento hídrico de HTA, y el control de humedad se llevó a cabo con sensores watermark®.

Para evaluar el efecto supresor del suelo sobre la enfermedad y el potencial patogénico del hongo se calculó el Índice de Severidad de la Enfermedad (porsus siglas en inglés, DSI). Para ello, se realizaron evaluaciones semanales durante 90 días después del trasplante, registrándose en cada evaluación la incidencia de la enfermedad sobre doce plantas de cebolla de cada contenedor, eliminándose el resto en cada contenedor por presentar daño físico al momento de la extracción; el valor máximo dañado en uno de los contenedores fue 6 plantas y se tomó ese número para homologar todos los tratamientos. Las plantas se sometieron a una evaluación de severidad de la enfermedad, siguiendo la escala de patogenicidad propuesta por Marlatt et al. (1996), donde: 0 = plantas sin síntomas; 1 = $\geq 10\%$ de síntomas en hojas; 2 = clorosis y/o marchitez leve en hojas, o crecimiento atrofiado de las plantas; 3 = clorosis y/o marchitez moderada en hojas o crecimiento atrofiado de las plantas; 4 = plantas muertas. El DSI se utilizó para determinar la supresividad del suelo y se calculó con la siguiente ecuación (Biri y Gomathinayagam, 2021):

$$DSI = \sum \frac{(P \times Q)}{(M \times N)} \times 100$$

donde: P es la puntuación de la severidad; Q es el número de plantas/bulbos infectados que tienen la misma puntuación; M es el número total de plantas/bulbos observados y N es el número máximo de la escala de calificación.

Al final del experimento se evaluaron doce bulbos para determinar el DSI (Adedire et al., 2023), cortándolos longitudinalmente y tomando imágenes digitales (barra de escala de 10 cm). Las imágenes se analizaron utilizando el software ImageJ para cuantificar en porcentaje el área infectada del área total del bulbo (Mandal y Cramer, 2021).

Asimismo, para determinar el potencial patogénico del hongo se consideró la densidad del patógeno en el suelo, mediante la evaluación de las Unidades Formadoras de Colonias (UFC) de *F. oxysporum* f. sp. *cepae* (Tello et al., 1991; Marín-Guirao et al., 2019), donde se recolectaron de manera aleatoria 500 g de suelo de diferentes contenedores de plástico, usando una barrena. Se utilizó el método de suspensiones-diluciones seriadas (Nash y Snyder, 1962; Liu et al., 2020) y el

medio selectivo Komada para *Fusarium* (Komada, 1975; Jeon et al., 2024), para lo cual se distribuyó 1 g de cada tipo de suelo en tubos de 20 mL, a los que se añadieron 9 mL de agar-agua al 2% como agente emulsionante. La homogeneización del suelo se realizó agitando el tubo durante 1 min, realizándose 3 diluciones seriadas. Se añadió 0,1 mL de cada dilución a una caja de Petri de 9 cm de diámetro que contenía el medio de cultivo Komada (3 repeticiones por tratamiento). Las cajas de Petri se colocaron posteriormente en una cámara de crecimiento con una temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$, lo que permitió el conteo de las UFC con un microscopio óptico dos días después de la incubación. Las UFC se expresaron por mL de suelo.

El experimento se estableció con un diseño de Bloques Completos al Azar, utilizando un arreglo factorial 2×6 , con 3 repeticiones (factor 1: 2 niveles de inoculación, con y sin inóculo; factor 2: 6 texturas de suelo), donde cada unidad experimental estuvo representada por un contenedor de plástico. En total el experimento estuvo conformado por 36 unidades experimentales.

Considerando los supuestos de normalidad y homocedasticidad, los datos de daño en plantas se analizaron de forma no paramétrica, realizando la prueba de Kruskal-Wallis y una comparación de pares de grupos con la prueba de Dunn ($p \leq 0,05$); mientras que los datos en bulbos de cebolla se analizaron de forma paramétrica, realizando un ANOVA y una prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$). A su vez, se realizó un análisis de regresión lineal simple, para determinar la relación entre el DSI en las plantas y bulbos de cebolla en el tratamiento control y tratamiento inoculado, con respecto a la textura del suelo, así como una regresión múltiple entre el DSI causado en las plantas de cebolla y las propiedades físicas del suelo (Ks, Da, CC y PMP). Asimismo, se realizó un análisis de regresión lineal simple con el daño en las plantas de cebolla y la densidad de *Fusarium* en el suelo. Todos los análisis se realizaron con el paquete estadístico XLstat (Addinsoft, 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Tablas 2 y 3 se destaca que los tratamientos control (sin inóculo) presentaron un DSI de cero o muy bajo, lo cual no representa un problema fitosanitario para la producción de cebolla. Para verificar que los daños observados en las plantas fueron ocasionados por la presencia de *F. oxysporum* f. sp. *cepae* se aplicaron los postulados de Koch a las plantas con síntomas, y se confirmó la presencia del patógeno únicamente

Tabla 2. Valores de DSI para planta de cebolla y comparación de grupos (Prueba Dunn con $p \leq 0,05$) para las diferentes texturas de suelo evaluadas.**Table 2. DSI values for onion plants and comparison of groups (Dunn's test with $p \leq 0.05$) for the different soil textures evaluated.**

Textura	Sin inóculo	Grupo	Con inóculo	Grupo
Franco	0	A	4,17	A
Franco-arenoso	0	A	6,25	A
Franco-arcilloso	0	A	8,33	A
Arcilloso	0	A	14,58	AB
Franco-limoso	2,08	A	54,7	BC*
Limoso	14,58	AB	100,0	C*

Grupos con letra diferente indica que existe diferencia significativa entre las medias de los grupos, mientras que, entre grupos con letras iguales no existe diferencia significativa ($p \leq 0,05$). Grupos con * indican los mayores porcentajes de DSI.

Tabla 3. Valores de DSI para bulbo de cebolla y comparación de grupos (Prueba Tukey con $p \leq 0,05$).**Table 3. DSI values for onion bulb and comparison of groups (Tukey test with $p \leq 0.05$).**

Textura	Sin inóculo	Grupo	Con inóculo	Grupo
Franco	0	A	0,362	A
Franco-arenoso	0	A	0,481	A
Franco-arcilloso	0,463	A	0,619	A
Arcilloso	0,783	A	17,401	B
Franco-limoso	1,631	A	57,643	C
Limoso	17,11	B	96,072	D*

Grupos con letra diferente indica que existe diferencia significativa entre las medias de grupos, mientras que, entre grupos con letras iguales no existe diferencia significativa ($p \leq 0,05$). Grupos con * indican los mayores porcentajes.

en el tratamiento inoculado. Por lo antes dicho, la presencia de síntomas en las plantas no inoculadas puede atribuirse a las características agronómicas naturales, tales como preferencia del cultivo a determinados suelos o tejidos viejos de la planta que permanecieron conforme la misma se desarrollaba y que fueron considerados por la escala visual de evaluación.

En diferentes imágenes de la Fig. 1 se observa el desarrollo y aspecto físico de plantas y bulbos de cebolla sembrados en los suelos de textura franca (A, C y E-1) y limosa (B, D y E-2). Se consideraron las imágenes de esas texturas particularmente, porque son los valores extremos de DSI (Tablas 2 y 3). En las imágenes A-1, A-2, C-1, C-2 y E-1 no se observó diferencia en el desarrollo de la enfermedad causada por *Fusarium* entre tratamientos (con inóculo y sin inóculo), para plantas (A) y bulbos (C y E-1), respectivamente en suelo franco. Mientras que, en las imágenes B-1, B-2, D-1, D-2 y E-2 se observó claramente la severidad de la enfermedad causada en cebolla

entre tratamiento (con inóculo y sin inóculo) para plantas (B) y bulbos (D y E-2) en suelos limosos.

Existe una alta correlación (0,99) entre el DSI de planta y bulbo (Fig. 2), con lo que el modelo explica el 99% de la variabilidad del DSI en bulbo, por lo que es posible señalar que, si el patógeno se identificó en la planta, también se desarrollará en el bulbo de cebolla. Los resultados mostrados en las Tablas 2 y 3 indican que el suelo de textura limosa presentó un mayor daño (DSI) causado por *F. oxysporum*, tanto en planta como en bulbo, con un 100 y 96,1%, respectivamente, seguido del suelo con textura franco-limosa con 54,7 y 57,6% para planta y bulbo. Resultados similares, respecto a la textura del suelo y su relación con la presencia de *F. oxysporum* en plátano, fueron presentados por Rodríguez-Yzquierdo et al. (2023) al analizar la predisposición de ciertos factores del suelo a la presencia y desarrollo de la enfermedad de marchitez de plátano causado por *F. oxysporum*. Entre sus hallazgos se observó una correlación positiva entre suelos con alto

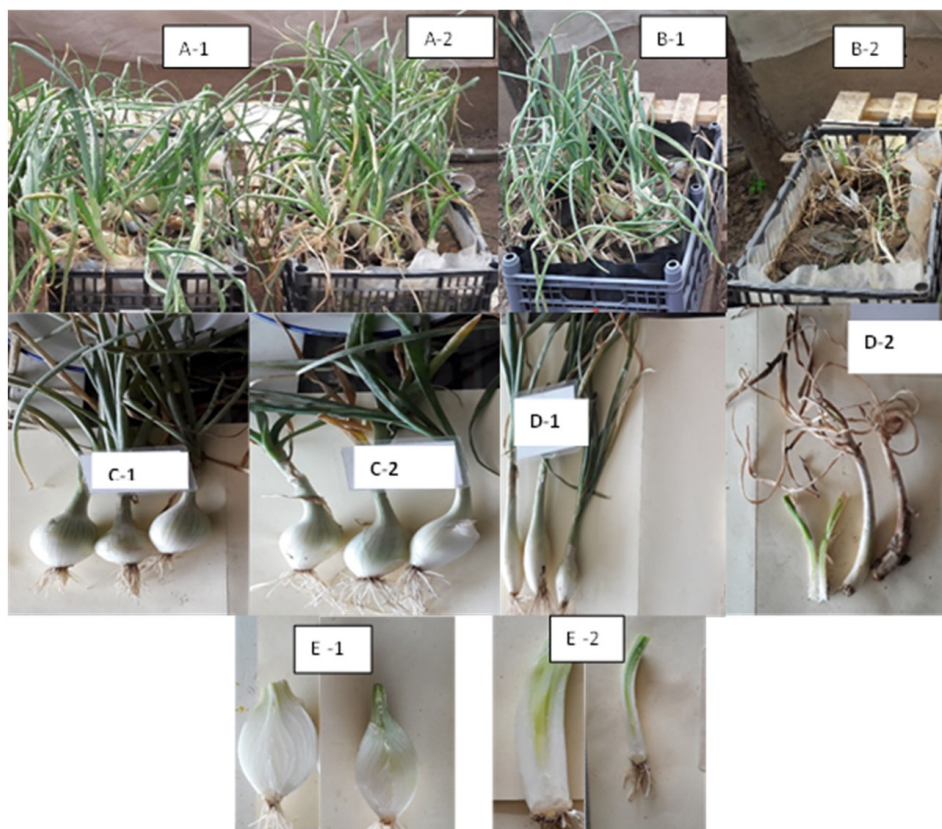


Fig. 1. Severidad de la enfermedad en plantas y bulbos de cebolla: A-1 (planta en suelo franco sin inóculo), A-2 (planta en suelo franco con inóculo), B-1 (planta en suelo limoso sin inóculo), B-2 (planta en suelo limoso con inóculo), C-1 (bulbo en suelo franco sin inóculo), C-2 (bulbo en suelo franco con inóculo), D-1 (bulbo en suelo limoso sin inóculo), D-2 (bulbo en suelo limoso con inóculo), E-1 (bulbo en suelo franco sin inóculo y con inóculo) y E-2 (bulbo en suelo limoso sin inóculo y con inóculo).

Fig. 1. Disease severity in onion plants and bulbs: A-1 (plant in loam soil without inoculum), A-2 (plant in loam soil with inoculum), B-1 (plant in silty soil without inoculum), B-2 (plant in silty soil with inoculum), C-1 (bulb in loam soil without inoculum), C-2 (bulb in loam soil with inoculum), D-1 (bulb in silty soil without inoculum), D-2 (bulb in silty soil with inoculum), E-1 (bulb in loam soil without inoculum and with inoculum) and E-2 (bulb in silty soil without inoculum and with inoculum).

contenido de arena y limo con el desarrollo de la enfermedad en plátano.

Cruz et al. (2020) trabajaron con suelos artificiales de textura arenosa, arena franca, franco-arenosa y franca, y su interacción con parámetros abióticos y la severidad de la pudrición de la raíz en soya causada por *F. graminearum*. Los niveles más altos de la enfermedad se presentaron en los suelos con textura arena-franca y franco-arenosa a PMP, con valores de 67 y 49,8% de severidad, respectivamente; mientras que los niveles más bajos se presentaron en suelos con textura franco-arenosa y suelos francos a saturación y pH de

8, con valores de 21,5 y 19,9%, respectivamente. Por otro lado, Yan y Nelson (2022) señalaron que el tipo de suelo afecta significativamente el desarrollo de la pudrición de la raíz en soya causada por *F. solani* y *F. tricinctum*. En un estudio realizado con tres tipos de suelo concluyeron que en el suelo franco-arenoso y franco-limoso se desarrolló la enfermedad con mayor severidad, mientras que, en el suelo arcilloso la enfermedad presentó un menor desarrollo, coincidiendo con la presente investigación, para el caso de suelo franco-limoso y arcilloso.

Por otro lado, Cruz et al. (2020) concluyeron

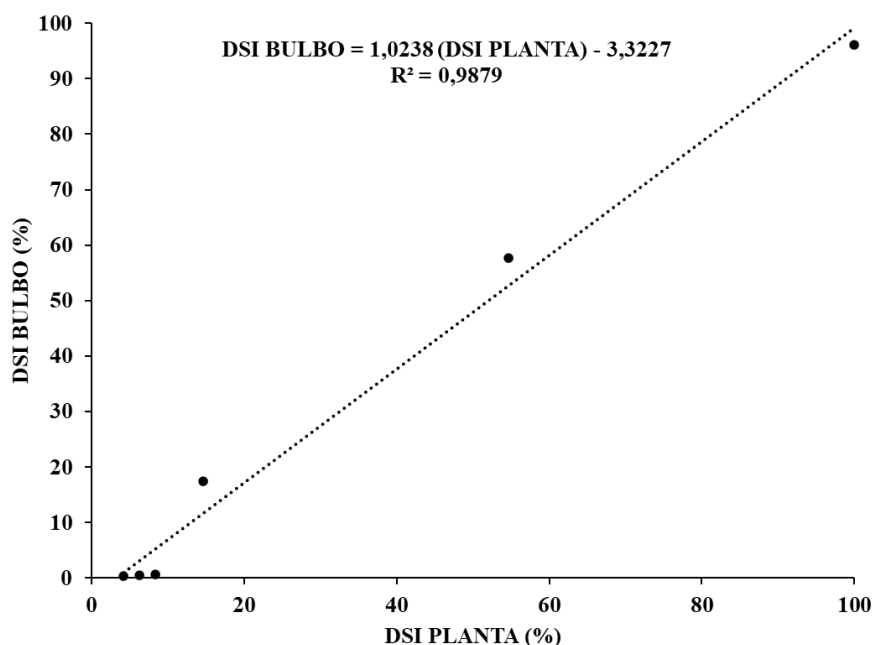


Fig. 2. Relación de DSI entre plantas y bulbos de cebolla.

Fig. 2. DSI relationship between onion plants and bulbs.

que la severidad de la enfermedad de la pudrición de la raíz en soja, causada por *Fusarium*, se incrementó con la textura más gruesa y contenido de humedad a PMP. En el presente estudio se observó que no es el tamaño de la partícula de suelo, sino el rango de HTA (Fig. 3), lo que se define como la diferencia entre el contenido de humedad a CC y el PMP, ya que los suelos con textura limosa y franco-limosa presentan una mayor HTA (Tabla 1). Este parámetro está relacionado con la capacidad de almacenamiento de agua y capacidad de aireación, así como con el flujo de calor y nutrientes dentro del suelo, lo que, a su vez, está estrechamente ligado a las condiciones ambientales para el desarrollo de microorganismos (Wang et al., 2021).

Además de HTA, se realizó un análisis estadístico para conocer la relación entre el DSI y las diferentes variables hidrofísicas del suelo. Se observó una mayor relación entre DSI y el PMP, al resultar un coeficiente de determinación (R^2) de 0,78; mientras que con las variables de CC, Da y Ks, los valores de R^2 fueron 0,27, 0,30 y 0,27, respectivamente. Lo anterior coincide con lo señalado por Cruz et al. (2020) quienes concluyeron que la mayor severidad de la enfermedad causada por *F. graminearum* en soja se presentó en suelos con el contenido de humedad a PMP.

Supresividad de los suelos en las plantas y bulbos de cebolla

La supresividad de los suelos en este estudio estuvo relacionada con el menor DSI en las plantas y bulbos de cebolla (Tablas 2 y 3). La mayor supresividad del suelo se observó en los suelos con textura franca, franco-arenosa y franco-arcillosa del tratamiento con inóculo con valores de 4,17, 6,25 y 8,33%, respectivamente para planta, mientras que, para bulbo, los valores de DSI fueron 0,362, 0,481 y 0,619%, respectivamente, para los suelos con las tres texturas señaladas.

Otros estudios han demostrado que la presencia de arcilla aumenta la capacidad supresora del suelo, donde un alto contenido de arcilla y una alta capacidad de intercambio catiónico inhibieron la tasa de infección de *Phytophthora ultimum*. Asimismo, la presencia de arcilla ha generado una mayor supresión de la marchitez por *F. oxysporum* f. sp. *cubense* en el banano (Jayaraman et al., 2021), lo que refuerza los resultados obtenidos en la presente investigación. Del mismo modo, Wang et al. (2021) concluyeron que la tasa de supresión de *Fusarium* fue mayor en suelos con textura franco-arenosa y franca al presentar una menor abundancia relativa, seguido de los suelos de textura arcilla franca, lo que también coincide con los resultados de este trabajo de investigación. Asimismo, Bowen et

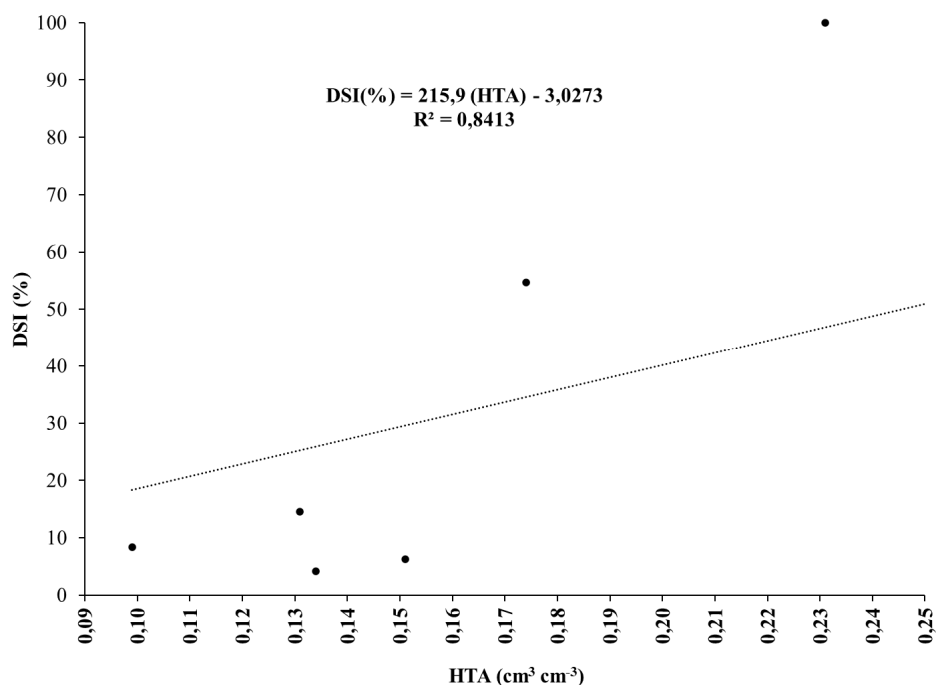


Fig. 3. Relación estadística entre Humedad Totalmente Aprovechable (HTA) y el Índice de Severidad de la Enfermedad (DSI) para planta de cebolla.

Fig. 3. Statistical relationship between Total Available Water (HTA) and Disease Severity Index (DSI) for onion plant.

al. (2019) señalaron que el contenido de arcilla en los suelos jugó un papel fundamental en el efecto supresor sobre enfermedades causadas por fitopatógenos, mientras que los suelos arenosos y franco-arenosos estuvieron asociados con una alta severidad de enfermedades.

Densidad de *F. oxysporum* f. sp. *cepae* en el suelo

En lo que respecta al tratamiento inoculado, en todas las texturas las UFC fueron en aumento en los días después de trasplante (ddt) (Fig. 4). Al analizar la relación entre el daño de las plantas y la concentración de inóculo en el suelo se observó que, a mayor densidad de *Fusarium* en el suelo, mayor daño ocasionó en las plantas de cebolla ($r^2 = 0,88$). Lo antes dicho fue señalado también por Degani et al. (2024) y Le et al. (2021), al evaluar el impacto de *Fusarium* spp en la incidencia de la pudrición basal de cebolla. Ambos trabajos señalan que la amplia distribución y rápida diseminación de la enfermedad en la planta y el cultivo en general se puede atribuir a los diversos mecanismos de propagación, donde la plantación a partir de materiales infectados constituyó un factor importante en la dispersión del patógeno. Sin embargo, en el presente estudio se observó

lo contrario en las texturas francas y franco-arenosa para el tratamiento inoculado con el patógeno, donde no se observaron grandes daños ocasionados por la enfermedad, coincidiendo con los resultados presentados por Mohamed-Zubi et al. (2021), quienes reportaron que existían situaciones donde, para una enfermedad telúrica, el ambiente suelo tenía un papel determinante en el desarrollo de una enfermedad, más que la densidad de inóculo en el suelo, donde, en este tipo de suelos supresivos, aunque se observe la presencia del patógeno, éste no es capaz de generar daño en los cultivos.

En esta investigación, las texturas de suelo franco-limosa y limosa fueron las menos supresoras al ataque de *F. oxysporum*, tanto en plantas como en los bulbos de cebolla. Sin embargo, Fierros-Leyva et al. (2019) concluyeron que los suelos arenosos favorecieron el desarrollo de enfermedades causantes de pudrición en raíces ocasionadas por patógenos como *F. oxysporum*. Castillo-Arévalo (2021) destacó, además, aquellos factores que resultaron favorables para el desarrollo de la densidad de población de *Fusarium*, señalando la compactación del suelo, el exceso de humedad, la sequía, las altas densidades de población, el daño por herbicidas,

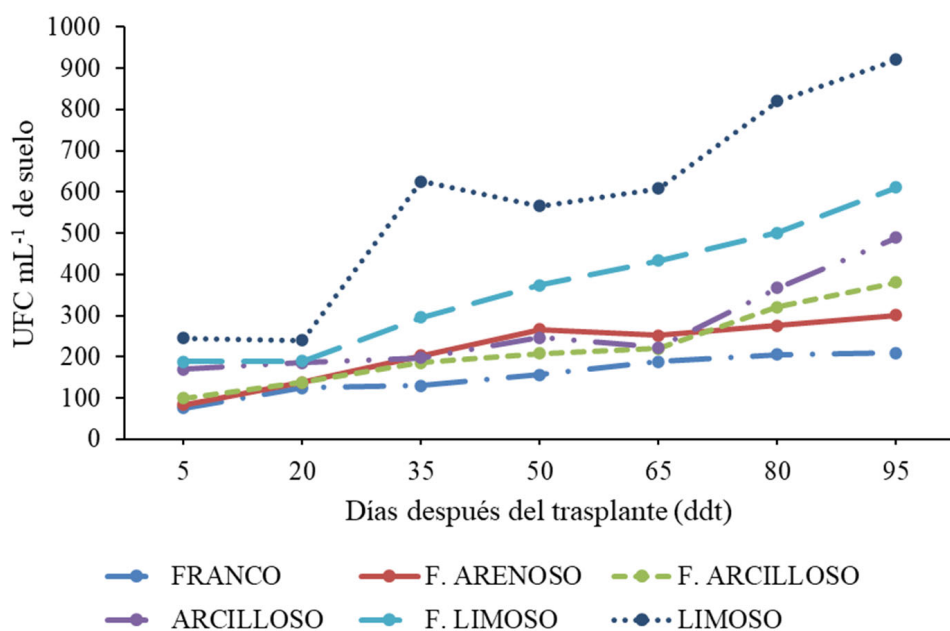


Fig. 4. Densidad de *F. oxysporum* f. sp. *cepae*, expresado como UFC en las clases texturales de suelo con el tratamiento inoculado.

Fig. 4. Density of *F. oxysporum* f. sp. *Cepae*, expressed as CFU in the soil textural classes with the inoculated treatment.

la aplicación de nitrógeno en forma amoniacal y los metabolitos tóxicos generados de los residuos de cultivos, como los más importantes.

CONCLUSIONES

La textura del suelo tuvo influencia positiva con el daño causado en las plantas y bulbos de cebolla. Las clases texturales con mayor efecto supresor y menor potencial patogénico de *F. oxysporum* f. sp. *cepae* fueron las texturas: franca, franco-arenosa y franco-arcillosa, tanto en plantas como en bulbos de cebolla, ya que las plantas presentaron un menor DSI y menor densidad del patógeno (UFC), y aunque el patógeno estuvo presente en el suelo, no se expresó de manera perjudicial en las plantas y bulbos. Las clases texturales que presentaron menor supresividad del suelo y mayor densidad de patógeno, o bien, mayor índice de daño en las plantas y bulbos de cebolla, fueron las texturas franco-limosa y limosa del tratamiento inoculado.

Contribución de autores

Participación activa en las revisiones bibliográficas: Leonardo Román-Román, Norma Delia Zazueta-Torres, Jesús Enrique López-Avendaño.

Participación activa en el desarrollo de la

metodología: Martín Abraham Tirado-Ramírez, Guadalupe Alfonso López-Urquidez, Jesús Enrique López-Avendaño.

Participación en la discusión de resultados: Martín Abraham Tirado-Ramírez, Leonardo Román-Román, Norma Delia Zazueta-Torres, Jesús Enrique López-Avendaño.

Revisión y aprobación de la versión final del artículo: Martín Abraham Tirado-Ramírez, Jesús Enrique López-Avendaño.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Addinsoft. 2019. XLSTAT statistical and data analysis solution. Boston, USA. <https://www.xlstat.com>.
- Adedire, O.M., A.O. Aduramigba-Modupe, and O.A. Odeniyi. 2023. Antifungal potential of endophytic *Bacillus* species isolated from tomato (*Solanum lycopersicum*) against *Fusarium oxysporum* collected from selected farms in Nigeria. *Journal of Crop Improvement* 13(6):796-820. <https://doi.org/10.1080/15427528.2022.2155896>

- Afzal, M.M., S.T. Sahi, A. Habib, W. Ashraf, M.A. Zeshan, M. Raheel, and Q. Shakeel. 2021. Management of *Fusarium* basal rot of onion caused by *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* through desert plants extracts. Sarhad Journal of Agriculture 37(4):1377-1383. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2021/37.4.1377.1383>.
- Awuchi, C.G., E.N. Ondari, C.U. Ogbonna, A.K. Upadhyay, K. Baran, C.O.R. Okpala, M. Korzeniowska, and R.P.F. Guiné. 2021. Mycotoxins Affecting Animals, Foods, Humans, and Plants: Types, Occurrence, Toxicities, Action Mechanisms, Prevention, and Detoxification Strategies—A Revisit. Foods 10:1279. <https://doi.org/10.3390/foods10061279>.
- Biri B., and P. Gomathinayagam. 2021. Response of hot pepper (*Capsicum annuum* L.) to major fungal disease under field and greenhouse conditions in Horo Guduru Wollega, Oromia, Ethiopia. African Journal of Agricultural Research 17(6):923-932. doi:10.5897/AJAR2020.14967
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agronomy Journal 54(5):464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Bowen A., R. Orr, A. V. McBeath, A. Pattison, and P. N. Nelson. 2019. Suppressiveness or conduciveness to *Fusarium* wilt of bananas differs between key Australian soils. Soil Research 57(2):158-165. <https://doi.org/10.1071/SR18159>
- Cárdenas-Rodríguez, J.; M.G. Yáñez-Juárez; C.A. López-Orona; F. Tafoya-Ayala; G.A. López-Urquidez, y S. de J. Romero-Gómez. 2022. Especies de *Phytophthora* asociadas a agua de irrigación en el Valle de Culiacán. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 12(3):473-483. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i3.2619>.
- Castillo-Arévalo, T. 2021. Incidencia y severidad del mal de Panamá (*Fusarium* sp) en guineo (*Musa balbisiana* ABB). Revista Ciencia e Interculturalidad 29(2):152-165. <https://doi.org/10.5377/rci.v29i02.13319>
- Cruz D.R., L.F.S. Leandro, D.A. Mayfield, Y. Meng, and G.P. Munkvold. 2020. Effects of soil conditions on root rot of Soybean caused by *Fusarium graminearum*. Phytopathology 110:1693-1703. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-20-0052-R>
- Degani O., E. Dimant, and E. Margalit. 2024. Impact of *Fusarium* species composition and incidence on onion basal rot in northeastern Israel. Horticulturae 10:373. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040373>
- Degani, O., and B. Kalman. 2021. Assessment of commercial fungicides against onion (*Allium cepa*) basal rot disease caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cepae* and *Fusarium acutatum*. Journal of Fungi 7(3):235. <https://doi.org/10.3390/jof7030235>.
- El-Komy, M.H., X. Gao, A. Almasrahi, Y.E. Ibrahim, A.H. Sharafaddin, A.A. Saleh, and Y.K. Hamad. 2023. First report of basal rot of onion caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cepae* in Saudi Arabia. Plant Disease 107(9):2854. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-23-0333-PDN>
- Fierros-Leyva G.A., J.A. Acosta-Gallegos, P.F. Ortega-Murrieta, I. Padilla-Valenzuela, A. Alvarez-Bravo, M. Ramírez-Soto, y S. Velarde-Félix. 2019. Distribución de hongos asociados a pudriciones de raíz en garbanzo. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 10(1):131-142. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1730>
- Guo, Z.Q., P. Li, X.M. Yang, Z.H. Wang, B.B. Lu, W.J. Chen, Y. Wu, et al. 2022. Soil texture is an important factor determining how microplastics affect soil hydraulic characteristics. Environment International 165:107293. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107293>.
- Haapalainen, M., E. Kuivainen, S. Livonen, M. Niemi, and S. Latvala. 2023. Pathogenicity of *Fusarium oxysporum* and *Fusarium proliferatum* isolates from symptomless onions (*Allium cepa*) and onions with *Fusarium* basal rot. Plant Pathology 72(6):1122-1135. <https://doi.org/10.1111/ppa.13718>.
- Jayaraman, S., A. Naorem, R. Lal, R.C. Dalal, N.K. Sinha. A.K. Patra, and S.K. Chaudhari. 2021. Disease-Suppressive Soils—Beyond Food Production: a Critical Review. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 21:1437–1465. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00451-x>
- Jeon H., J.W. Yang, D. Shin, D. Min, B.J. Kim, K. Min, and H. Son. 2024. Development of selective medium for Surveillance of *Fusarium* head blight disease. Plant Pathology Journal 40(2):106-114. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.12.2023.0173>
- Kalman, B., D. Abraham, S. Graph, R. Perl-Treves, Y. M. Harel, and O. Degani. 2020. Isolation and Identification of *Fusarium* spp., the causal agents of Onion (*Allium cepa*) Basal Rot in Northeastern Israel. Biology 9(4):69. <https://doi.org/10.3390/biology9040069>.

- Komada, H. 1975. Development of a selective medium for quantitative isolation of *Fusarium oxysporum* from natural soils. Review of Plant Protection Research 8:114-125. <https://www.cabdigitalibrary.org/doi/full/10.5555/19771936599>
- Le D., K. Audenaert, and G. Haesaert. 2021. *Fusarium* basal rot: profile of an increasingly important disease in *Allium* spp. Tropical Plant Pathology 46:241-253. <https://doi.org/10.1007/s40858-021-00421-9>
- Liu B., H. Wei, W. Shen, and H. Smith. 2020. Long-term effect of non-irrigation and irrigation on soil *Pythium*, *Fusarium* and *Rhizoctonia* communities and their relation with seed-rot, root-rot, and damping-off of soybean. Europe Journal of Plant Pathology 158:297-314. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-02059-w>
- López-Urquidez G.A., J.C. Cordero-Armenta, A.R. Martínez-Campos, J.A. Edeza-Urías, M.A. Tirado-Ramírez, y C.A. López-Orona. 2021. Efecto de la oscilación térmica en la calidad y rendimiento de cebolla blanca en el Valle de Culiacán, Sinaloa. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 12(4):671-684. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2678>
- Mandal, S., and C.S. Cramer. 2021. Comparing visual and image analysis techniques to quantify *Fusarium* basal rot severity in mature onion bulbs. Horticulturae 7(6):156. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7060156>
- Marín-Guirao J.I., M. de Cara-García, y J.C. Tello-Marquina. 2019. Efecto de la biodesinfección de suelos sobre las comunidades fúngicas edáficas asociadas a cultivos hortícolas. Ecosistemas 28(3):63-72. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1708>
- Marlatt M.L., Correll J.C., Kaufmann P., and Cooper P.E. 1996. Two genetically distinct populations of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 3 in the United States. Plant Disease 80:1336-1342. https://www.apsnet.org/publications/plantdisease/backissues/Documents/1996Articles/PlantDisease80n12_1336.PDF
- Mohamed-Zubi W.S., M.H. Mohd, N.M.I. Mohamed-Nor, and L. Zakaria. 2021. *Fusarium* species in Mangrove soil in northern peninsular Malaysia and the soil physico-chemical properties. Microorganisms 9(3):497. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030497>
- Nash, S.M., and W.C. Snyder. 1962. Quantitative estimations by plate counts of propagules of the bean root rot *Fusarium* field soil. Phytopathology 52(6):567-572. <https://garfield.library.upenn.edu/classics1982/A1982NZ58200001.pdf>
- Rodríguez-Yzquierdo, G., B.O. Olivares, A. González-Ulloa, R. León-Pacheco, J.C. Gómez-Correa, M. Yacomelo-Hernández, et al. 2023. Soil predisposing factors to *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* Tropical Race 4 on banana crops of Guajira, Colombia. Agronomy 13:2588. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102588>
- Samaddar, S., K.D.S. Schmidt, N. Devarajan, J.A. McGarvey, and S.K. Pires. 2021 Role of soil in the regulation of human and plant pathogens: soils' contributions to people. Philosophical Transactions. Royal Society B 376:20200179. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0179>
- Sharma, S., P. Kumari, P. Thakur, G.S. Brar, N.A. Bouquellah and A.E. Hesham. 2022. Synthesis and characterization of $\text{Ni}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles for potent antifungal activity against dry rot of ginger (*Fusarium oxysporum*). Scientific Reports 12:20092. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22620-3>
- SIAP. 2024. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesca. Avances de siembra y cosecha en México. Disponible en https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/ (Consulta diciembre 2024).
- Tello J.C., F. Vares, y A. Lacasa. 1991. Análisis de Muestras. En Manual de laboratorio: diagnóstico de hongos, bacterias y nematodos fitopatógenos. pp. 39-72. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Tirado-Ramírez, M.A.; G.A. López-Urquidez, L.A. Amarillas-Bueno, J.E. Retes-Manjarrez, G.T.A. Vega, J.E. López-Avendaño, and C.A. López-Orona. 2021. Identification and virulence of *Fusarium falciforme* and *Fusarium brachygibbosum* as causal agents of basal rot on onion in Mexico. Canadian Journal Plant Pathology 43(5):722-733. <https://doi.org/10.1080/07060661.2021.1894241>
- Vetrova, S., K. Alyokhina, I. Engalycheva, E. Kozar, K. Mukhina, M. Sletova, et al. 2024. Identification and pathogenicity of *Fusarium* species associated with onion basal rot in the Moscow Region of Russian Federation. Journal of Fungi 10(5):331. <https://doi.org/10.3390/jof10050331>

- Wang H., R. Chen, Y. Sheng, W. Jiang, R. Zhang, X. Chen, et al. 2021. Impact of three soil textures on the fungal community structure in rhizosphere soils of *Malus hupehensis* Rehd. Seedlings. HortScience 56(5):572-578. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15688-21>
- Xia, Q., T. Rufty, and W. Shi. 2020. Soil microbial diversity and composition: Links to soil texture and associated properties. Soil Biology and Biochemistry 149:107953. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107953>.
- Yan, H., and B. Nelson Jr. 2022. Effects of soil type, temperature, and moisture on development of *Fusarium* root rot of soybean by *Fusarium solani* (FSSC 11) and *Fusarium tricinctum*. Plant Disease 106(11):2974-2983. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-21-2738-RE>.