








## Inhibitory effect of two rare earth elements on the growth of three *Fusarium* species

### Efecto inhibitorio de dos elementos de tierras raras sobre el crecimiento de tres especies del género *Fusarium*

Guadalupe Contreras-Martínez<sup>1</sup> , Liliana Lara-Capistrán<sup>2</sup> , Elia Nora Aquino-Bolaños<sup>3</sup> , Norma Flores-Estévez<sup>1</sup> , Juan Carlos Noa-Carrazana<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, Universidad Veracruzana, Campus para la Cultura, las Artes y el Deporte, Av. Culturas Veracruzanas 101, 91090 Xalapa, Veracruz, Mexico.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana, Circuito Universitario Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa, Veracruz, Mexico.

<sup>3</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, Av. Dr. Luis Castelazo Ayala s/n, 91190, Xalapa, Veracruz, Mexico.

\*Corresponding author

E-mail address: [jnoa@uv.mx](mailto:jnoa@uv.mx) (J. C. Noa-Carrazana)

Article history:

Received: 16 January 2026 / Received in revised form: 10 March 2026 / Accepted: 20 March 2026 / Published online: 27 March 2026.

<https://doi.org/10.29267/mxjb.2026.11.1.49-70>

## ABSTRACT

Agriculture faces considerable economic losses due to phytopathogenic fungi, mainly of the genus *Fusarium*, which affects various vegetables and crops of economic importance. The objective of this study was to evaluate the effect of two rare earth elements (REE) on the development and propagation speed of three species of the genus *Fusarium*, in *in vitro* cultures. A completely randomized experiment design was performed with 10 treatments: T1 (negative control-0  $\mu\text{M}$ ), T2 (25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ), T3 (50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ), T4 (75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ), T5 (100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ), T6 (25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ), T7 (50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ), T8 (75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ), T9 (100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ), T10 (positive control-propiconazole), each with five replicates, using the poisoned medium method. Mycelial growth, inhibition rate, and number of conidia were evaluated for seven days. The statistical analysis showed significant differences in all variables. REE treatments

(T8 and T9) showed the greatest mycelial inhibition and conidial reduction; however, treatment T10 with propiconazole was more effective, although it has been reported as a carcinogen. It is concluded that rare earths generate an inhibitory effect, so it is recommended to continue evaluating higher concentrations and their effect on plants.

**Keywords:** antifungal, biostimulant, gadolinium, hormesis, lanthanides, lanthanum.

## RESUMEN

La agricultura enfrenta pérdidas económicas considerables debido a los hongos fitopatógenos, principalmente del género *Fusarium*, que afectan diversas hortalizas y cultivos de importancia económica. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dos elementos de tierras raras (ETR) sobre el desarrollo y la velocidad de propagación de tres especies del género *Fusarium*, en cultivo *in vitro*. Se realizó un diseño experimental completamente al azar con 10 tratamientos: T1 (control negativo-0  $\mu\text{M}$ ), T2 (25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ), T3 (50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ), T4 (75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ), T5 (100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ), T6 (25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ), T7 (50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ), T8 (75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ), T9 (100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ) y T10 (control positivo-propiconazol), cada uno con cinco réplicas, utilizando el método medio envenenado. Durante siete días se evaluó el crecimiento micelial, tasa de inhibición y número de conidios. El análisis estadístico mostró diferencias significativas en todas las variables. Los tratamientos de ETR (T8, T9) mostraron la mayor inhibición micelial y disminución de conidios, aunque el tratamiento T10 con propiconazol fue más efectivo, pero este ha sido reportado como carcinógeno. Se concluye que las tierras raras generan un efecto inhibitorio, por lo que se recomienda continuar evaluando concentraciones mayores y su efecto en plantas.

**Palabras clave:** Antifúngico, bioestimulante, gadolinio, hormesis, lantánidos, lantano.

## 1. Introducción

Uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura es la aparición de enfermedades fitopatógenas, tanto en cultivos a cielo abierto como en sistemas controlados, como los invernaderos. Estas enfermedades deben ser controladas para asegurar un crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad de diversos cultivos de importancia económica y ecológica. Entre los principales agentes causales se encuentran los hongos fitopatógenos, los cuales, durante el proceso de infección, producen enzimas capaces de degradar polímeros vegetales. Entre estas enzimas destacan las cutinasas y esterases, que facilitan la penetración en los tejidos del hospedante (Canavati-Alatorre *et al.*, 2016; González-Márquez *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2021; Salvatore y Andolfi, 2021). Estas sustancias alteran las funciones fisiológicas de las plantas, provocando síntomas como marchitamiento, inhibición del crecimiento, clorosis, necrosis y la aparición de manchas en las hojas (Peng *et al.*, 2021; Salvatore y Andolfi, 2021).

En particular, el género *Fusarium* se ha identificado como uno de los patógenos vegetales de mayor importancia económica, ya que causa una amplia gama de enfermedades que

ocasionan pérdidas significativas en diversos cultivos. Estos hongos, transmitidos por el suelo, son capaces de sobrevivir durante largos periodos en forma de clamidosporas (Bahadur, 2021). Durante el proceso de infección, el hongo penetra las raíces, se distribuye a través de los tejidos vasculares, coloniza el xilema y ocasiona síntomas como amarillamiento sistémico, marchitez y, en casos severos, la muerte de la planta (Arie, 2019). Hasta la fecha se han utilizado diversos enfoques para prevenir, mitigar o controlar las enfermedades fitopatógenas, que van desde la implementación de buenas prácticas agronómicas y hortícolas hasta el uso intensivo de fertilizantes y funguicidas, de los cuales muchos productores siguen dependiendo en gran medida (Pal y Gardener, 2006). Actualmente, con los avances en la tecnología moderna, se han identificado distintos mecanismos y compuestos que permiten a las plantas defenderse de invasores microbianos. Entre las estrategias de defensa más destacadas se encuentra la producción de péptidos antimicrobianos (AMP), ricos en cisteína, los cuales son compuestos formados por entre 45 y 54 aminoácidos y actúan inhibiendo rápidamente el crecimiento de patógenos. Entre los AMP presentes en plantas se encuentran las  $\alpha$ -defensinas, las proteínas de transferencia de lípidos, las tioniinas, la heveína y las knottinas (Makovitzki *et al.*, 2007).

No obstante, a pesar de la existencia de estos mecanismos de defensa, las plantas continúan siendo vulnerables al ataque de hongos fitopatógenos. Por ello, se han desarrollado diversas investigaciones en laboratorio con el fin de explorar métodos alternativos de control. Entre estos métodos destaca el uso de elementos de tierras raras (ETR), los cuales han demostrado desde hace tiempo poseer actividades antifúngicas y antibacterianas frente a diversos patógenos, como *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Candida albicans* (Qizhuang *et al.*, 2006). Asimismo, se ha encontrado que los ETR pueden ejercer efectos estimulantes en las plantas, cuando se aplican en bajas concentraciones, beneficiando ciertos procesos fisiológicos, bioquímicos, así como el crecimiento desarrollo y rendimiento. Además, favorece la absorción de elementos esenciales y estimulan mecanismos de resistencia frente a factores de estrés abiótico y biótico (Kastori *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2013; Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2018). No obstante, en dosis elevadas pueden generar efectos nocivos en plantas, bacterias y hongos; este fenómeno se denomina hormesis (Kasatkina *et al.*, 2023).

Los ETR han cobrado creciente interés debido a su uso en agricultura, industria y biotecnología, lo que ha incrementado su presencia en distintos ambientes (Kastori *et al.*, 2023; Zhang y Zhou, 2025). A pesar de ello, su interacción con microorganismos, particularmente con hongos fitopatógenos, sigue siendo poco comprendida, lo que limita la evaluación de sus posibles efectos benéficos o antifúngicos. Actualmente, aún no se comprende completamente cuál es el efecto directo de concentraciones moderadas de estos elementos sobre hongos fitopatógenos, ni qué concentraciones o combinaciones de compuestos, como los cloruros de ETR podrían generar efectos antifúngicos en hongos del género *Fusarium*. Dado que las especies de este género tienen un impacto significativo en diversos cultivos agrícolas, por lo que comprender cómo responden a la presencia de estos elementos resulta relevante tanto desde una perspectiva ecológica como fitopatológica. Por consiguiente, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de dos elementos de tierras raras sobre el desarrollo y la velocidad de propagación de tres especies de *Fusarium sp.* en cultivos *in vitro*.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Localización del experimento

El experimento se llevó a cabo entre los meses de noviembre y diciembre de 2023, en las instalaciones del Laboratorio de Fitopatología y Biología Molecular (BioMolFito) del Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (INBIOTECA), ubicado en el *Campus* para la Cultura, las Artes y el Deporte, en Xalapa-Enríquez, Veracruz.

### 2.2. Material biológico

Se utilizaron tres especies del género *Fusarium*: *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Fusarium incarnatum*. Estas cepas se obtuvieron a partir de aislamientos realizados en hortalizas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) y pepino (*Cucumis sativus* L.) en el estado de Veracruz.

### 2.3. Preparación del medio de cultivo

Se utilizó medio de cultivo PDA (papa, dextrosa y agar) para el crecimiento de los hongos. La preparación consistió en hervir 300 g de papa en 1 L de agua destilada durante 30 minutos. Posteriormente, se filtraron 600 mL del extracto de papa en un vaso precipitado de 1 L, al cual se añadieron 20 g de dextrosa, 17 g de agar y 400 mL de agua destilada, hasta completar un volumen final de 1 L.

### 2.4. Preparación de soluciones madre de lantano y gadolinio

Se prepararon soluciones madre de 10 mL para cada compuesto, a una concentración de 20,000  $\mu\text{M}$ . Para ello, se pesaron 74.274 mg de  $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (cloruro de lantano (III) heptahidrato, reactivo ACS, Sigma-Aldrich) y 74.338 mg de  $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (cloruro de gadolinio (III) hexahidrato, 99 %, titulación, Sigma-Aldrich). Cada compuesto se disolvió en agua desionizada hasta obtener una solución homogénea.

### 2.5. Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental completamente al azar con cuatro concentraciones de  $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (25, 50, 75 y 100  $\mu\text{M}$ ). Los tratamientos se aplicaron de manera independiente en tres especies del género *Fusarium*, de modo que cada especie fue evaluada bajo las mismas condiciones experimentales. El experimento incluyó un total de 10 tratamientos: T1) control negativo (hongo sin tratamiento), T2) hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ , T3) hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ , T4) hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ , T5) hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ , T6) hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ , T7) hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ , T8) hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ , T9) hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  y T10) control positivo (hongo tratado con propiconazol, fungicida químico de uso común en diversos cultivos). Cada tratamiento contó con cinco réplicas, resultando un total de 150 unidades experimentales.

## 2.6. Medio de cultivo envenenado con lantano y gadolinio

La aplicación de lantano y gadolinio se realizó mediante el método de cultivo envenenado, siguiendo la metodología descrita por Guerrero-Rodríguez *et al.* (2007), Delgado-Ortiz *et al.* (2018) y Larios-Palacios *et al.* (2020). Para cada tratamiento, se prepararon 150 mL de medio PDA, a los cuales se incorporaron las concentraciones correspondientes de las soluciones madre.

Los volúmenes requeridos se calcularon usando la fórmula:  $V_1C_1=V_2C_2$ , donde  $C_1= 20,000 \mu\text{M}$  (concentración de la solución madre),  $C_2=$  concentración deseada (25, 50, 75 y 100  $\mu\text{M}$ ),  $V_2=$  volumen del medio (150 mL) y  $V_1=$  volumen de solución madre a adicionar. Una vez calculado el volumen correspondiente, este se incorporó al medio PDA (excepto en los controles).

Posteriormente, el medio se vertió en cajas Petri de 90 mm  $\times$  15 mm y se dejó solidificar en una campana de flujo laminar. Cada caja fue inoculada colocando en el centro un disco de micelio de 7 mm de diámetro de las cepas de *Fusarium*, obtenido de cultivos con seis días de crecimiento. Las placas se incubaron a 27 °C y se evaluaron diariamente durante un periodo de siete días.

## 2.7. Evaluación del crecimiento, inhibición micelial y esporulación

El crecimiento micelial se midió durante un periodo de siete días utilizando un vernier. Se registraron tres mediciones por unidad experimental, y se calculó el promedio mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Diámetro del crecimiento micelial (mm)} = \frac{(D_1 + D_2 + D_3)}{3}$$

El porcentaje de inhibición del crecimiento micelial se determinó en comparación con el control negativo, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Tasa de inhibición (\%)} = \left[ \frac{(D_c - D_t)}{D_c} \right] \times 100$$

Donde:  $D_c$  es el diámetro promedio de crecimiento del control y  $D_t$  es el diámetro promedio del tratamiento.

La esporulación se evaluó al séptimo día. Para ello, se obtuvo una suspensión de conidios mediante la adición de 5 mL de agua destilada estéril y el raspado de la superficie de la colonia con una aguja de disección. De la suspensión se tomó 1 mL para el conteo de conidios en una cámara de Neubauer, utilizando un microscopio con objetivo 40x. El número total de conidios por mililitro se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Número de } \frac{\text{conidios}}{\text{mL}} = \left[ \frac{(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5)}{5} \times \frac{1 \text{ Cuadro}}{L \times A \times P (\text{mm}^3)} \times \frac{1000 \text{mm}^3}{1 \text{cm}^3} \times \frac{1 \text{cm}^3}{1 \text{mL}} \right] \times 10,000$$

## 2.8. Análisis estadístico

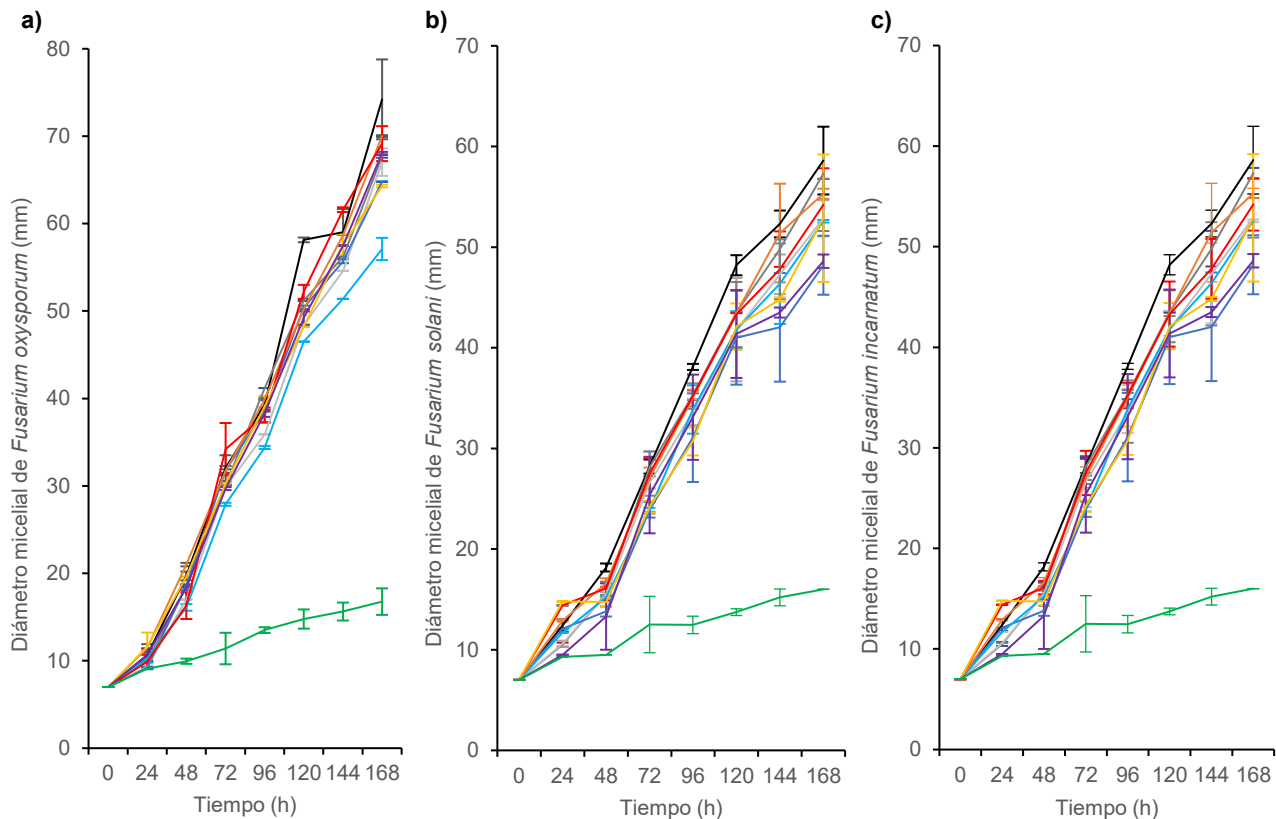
Se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Los datos que cumplieron con los supuestos fueron analizados mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), seguido de comparaciones múltiples utilizando la prueba de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ), para identificar diferencias significativas entre tratamientos. Para los datos que no cumplieron con los supuestos de normalidad, se empleó una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, seguida de la prueba de post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa RStudio (versión 4.5) mediante el uso de los paquetes agricolae, dplyr, tidyr, ggpubr, car, rstatix y multcompView.

## 3. Resultados

De acuerdo con los análisis de normalidad y homogeneidad de varianzas, la variable crecimiento micelial no cumplió con los supuestos estadísticos ( $p < 0.05$ ). En la prueba de Shapiro-Wilk se obtuvieron los siguientes valores: *F. oxysporum* ( $p = 9.59 \times 10^{-15}$ ), *F. solani* ( $p = 5.56 \times 10^{-15}$ ) y *F. incarnatum* ( $p = < 2.2 \times 10^{-16}$ ). Resultados similares se observaron en la prueba de Levene: *F. oxysporum* ( $p = 1.34 \times 10^{-14}$ ), *F. solani* ( $p = < 2.2 \times 10^{-16}$ ) y *F. incarnatum* ( $p = < 2.2 \times 10^{-16}$ ) (Materiales Suplementarios Fig. S1-S8).

Debido a que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas el crecimiento micelial se analizó mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para cada tiempo de evaluación (24 hasta 168 horas). Los resultados detectaron diferencias significativas entre tratamientos a partir de 24 horas de incubación en las tres especies de *Fusarium* (*F. oxysporum*:  $\chi^2 = 40.51$ , *F. solani*:  $\chi^2 = 44.65$  y *F. incarnatum*:  $\chi^2 = 52.83$ ) (S2). Estas diferencias se mantuvieron hasta las 168 horas, indicando un efecto sostenido de las concentraciones de  $\text{LaCl}_3$  y  $\text{GdCl}_3$  sobre el crecimiento micelial.

El tratamiento T10 (control positivo), presentó el menor diámetro micelial en comparación con los demás tratamientos. Los tratamientos con  $\text{LaCl}_3$  y  $\text{GdCl}_3$ , no difirieron significativamente entre sí, aunque se observó una tendencia de diámetros menores en comparación con T1 (control negativo) en concentraciones más altas (75 a 100  $\mu\text{M}$ ) de ambos compuestos (Figura 1).



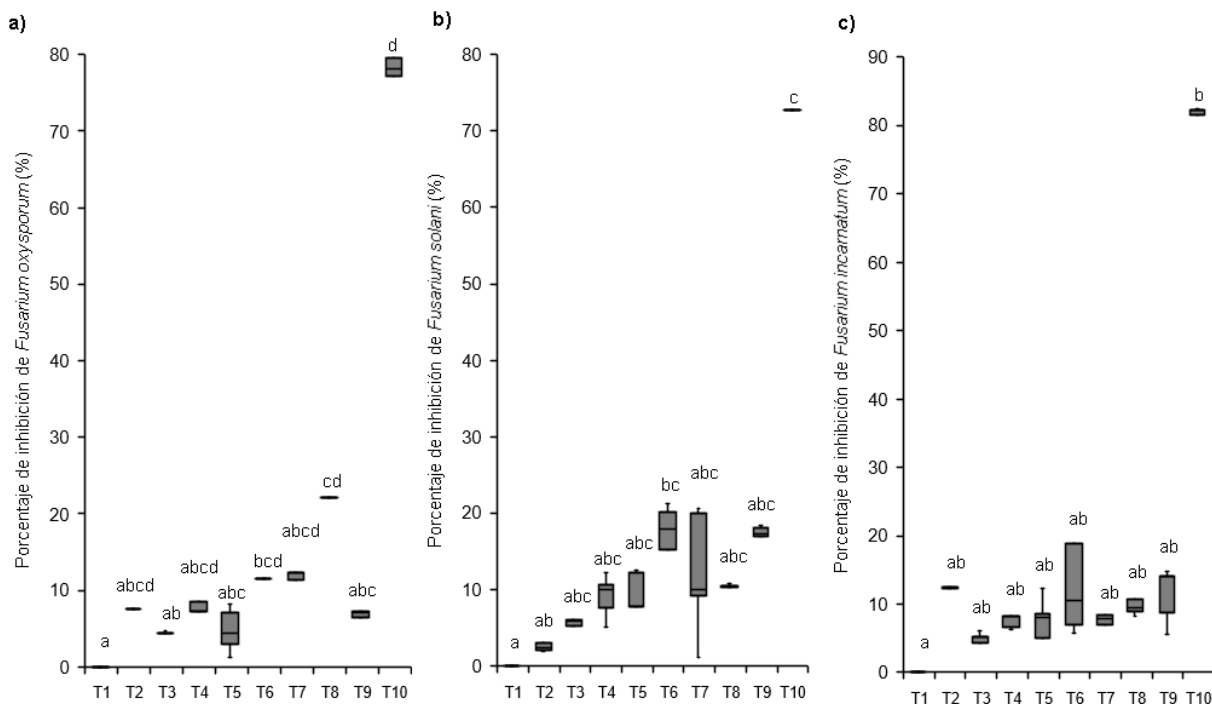
**Fig. 1.** Crecimiento micelial en tres especies del género *Fusarium* en medio *in vitro* bajo diferentes concentraciones de  $\text{LaCl}_3$  y  $\text{GdCl}_3$ . *F. oxysporum* (a), *F. solani* (b) y *F. incarnatum* (c). Mediana  $\pm$  rango intercuartílico (IQR) de acuerdo con la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis seguida de la prueba de Dunn con corrección de Bonferroni ( $\alpha = 0.05$ ). Control negativo (hongo sin tratamiento) (T1-línea negra), hongo con  $25 \mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2-línea gris oscuro), hongo con  $50 \mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3-línea gris), hongo con  $75 \mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4-línea azul), hongo con  $100 \mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5-línea azul claro), hongo con  $25 \mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6-línea naranja), hongo con  $50 \mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7-línea roja), hongo con  $75 \mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8-línea amarilla), hongo con  $100 \mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9-línea púrpura) y control positivo (hongo tratado con propiconazol) (T10-línea verde).

**Fig. 1.** Mycelial growth in three species of the genus *Fusarium* in *in vitro* medium under different concentrations of  $\text{LaCl}_3$  and  $\text{GdCl}_3$ . *F. oxysporum* (a), *F. solani* (b) and *F. incarnatum* (c). Median  $\pm$  interquartile range (IQR) according to the nonparametric Kruskal Wallis test followed by the Dunn test with Bonferroni correction ( $\alpha = 0.05$ ). Negative control (untreated fungus) (T1-black line), fungus with  $25 \mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2-dark gray line), fungus with  $50 \mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3-gray line), fungus with  $75 \mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4-blue line), fungus with  $100 \mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5- light blue line), fungus with  $25 \mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6-orange line), fungus with  $50 \mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7-red line), fungus with  $75 \mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8-yellow line), fungus with  $100 \mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9-purple line) and positive control (fungus treated with propiconazole) (T10-green line).

Para la variable porcentaje de inhibición, en los análisis de normalidad y homogeneidad de varianzas, no cumplieron con los supuestos estadísticos ( $p < 0.05$ ). En la prueba de Shapiro-Wilk indico que los datos de las tres especies no siguieron una distribución normal obteniendo los siguientes valores: *F. oxysporum* ( $p = 1.09 \times 10^{-10}$ ), *F. solani* ( $p = 7.54 \times 10^{-10}$ ) y *F. incarnatum* ( $p = 1.899 \times 10^{-11}$ ). Mientras que en la prueba de Levene mostró homogeneidad de varianzas para *F. oxysporum* ( $p = 0.661$ ) y *F. solani* ( $p = 0.1574$ ), por el contrario *F. incarnatum* no presento homogeneidad ( $p = 0.035$ ) (S3). Por lo tanto, se aplicó una prueba no paramétrica de Kruskal Wallis.

Los resultados mostraron diferencias significativas entre los tratamientos para las tres especies evaluadas (*F. oxysporum*:  $\chi^2 = 41.9$ , *F. solani*:  $\chi^2 = 32.7$  y *F. incarnatum*:  $\chi^2 = 33.8$ ) (S4). En *F. oxysporum*, el tratamiento T10 (control positivo) presentó la máxima inhibición (mediana = 78.16 %), mientras que los tratamientos T8 (75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ) y T6 (25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ) mostraron inhibiciones moderadas (medianas = 22.06 % y 11.55 %, respectivamente), superiores a las observadas en los tratamientos con  $\text{LaCl}_3$  y en T1 (control negativo) (Figura 2a).

Para *F. solani*, T10 nuevamente presentó la mayor inhibición (mediana = 72.76 %), estadísticamente diferente a la mayoría de los otros tratamientos. T6 (25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ) y T9 (100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ) también mostraron inhibiciones significativamente mayores en comparación con T1 (control negativo), con valores de medianas de 17.95 % y 17.27 % respectivamente. Los tratamientos con  $\text{LaCl}_3$  mostraron las inhibiciones más bajas (Figura 2b). Finalmente, en *F. incarnatum* T10 alcanzó la inhibición más alta (mediana = 82.17 %), seguido por T2 y T9 (medianas = 12.40 % y 14.05 %). Principalmente, estos resultados sugieren que  $\text{GdCl}_3$  podría tener un efecto antifúngico leve, dependiendo de la especie de *Fusarium* (Figura 2c).



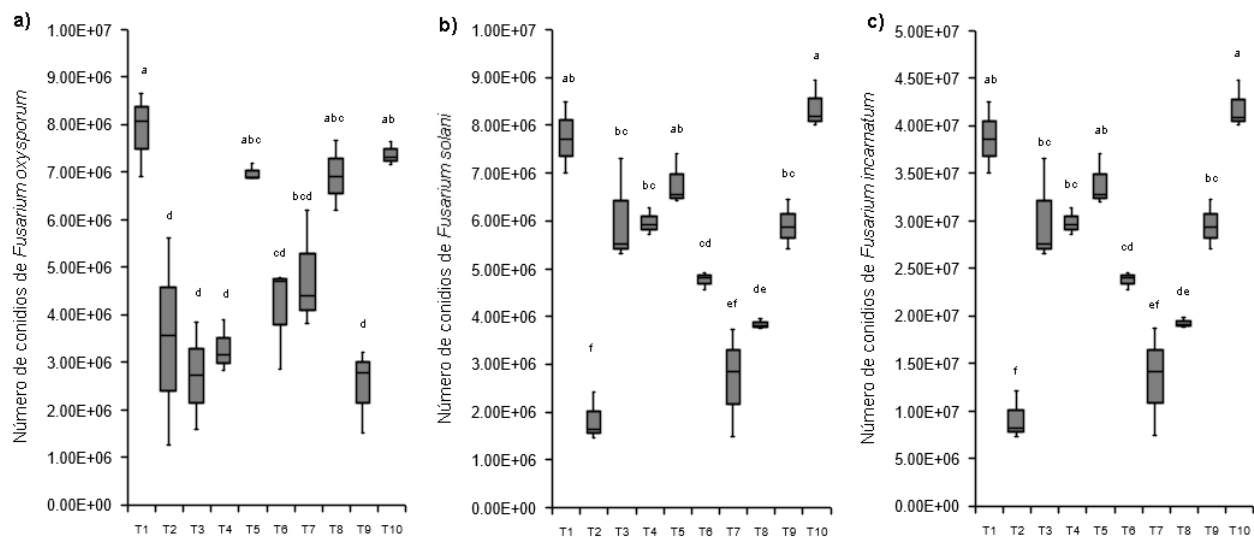
**Fig. 2.** Porcentaje de inhibición en tres especies del género *Fusarium* en medio *in vitro* bajo diferentes concentraciones de  $\text{LaCl}_3$  y  $\text{GdCl}_3$ . *F. oxysporum* (a), *F. solani* (b) y *F. incarnatum* (c). Mediana  $\pm$  rango intercuartílico (IQR) de acuerdo con la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis seguida de la prueba de Dunn con corrección de Bonferroni ( $\alpha= 0.05$ ). Control negativo (hongo sin tratamiento) (T1), hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2), hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3), hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4), hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5), hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6), hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7), hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8), hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9) y control positivo (hongo tratado con propiconazol) (T10).

**Fig. 2.** Percentage of inhibition in three species of the genus *Fusarium* in *in vitro* medium under different concentrations of  $\text{LaCl}_3$  and  $\text{GdCl}_3$ . *F. oxysporum* (a), *F. solani* (b) and *F. incarnatum* (c). Median  $\pm$  interquartile range (IQR) according to the nonparametric Kruskal Wallis test followed by the Dunn test with Bonferroni correction ( $\alpha= 0.05$ ). Negative control (untreated fungus) (T1), fungus with 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2), fungus with 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3), fungus with 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4), fungus with 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5), fungus with 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6), fungus with 50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7), fungus with 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8), fungus with 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9) and positive control (fungus treated with propiconazole) (T10).

En los análisis de normalidad y homogeneidad de varianzas, la variable número de conidios cumplió con los supuestos estadísticos ( $p>0.05$ ). En la prueba de Shapiro-Wilk se obtuvieron los siguientes valores: *F. oxysporum* ( $p= 0.934$ ), *F. solani* ( $p= 0.964$ ) y *F. incarnatum* ( $p= 0.964$ ). Resultados similares se observaron en la prueba de Levene: *F. oxysporum* ( $p= 0.585$ ), *F. solani* ( $p= 0.754$ ) y *F. incarnatum* ( $p= 0.754$ ) (S5).

Debido a que los datos cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, el número de conidios se analizó mediante un ANOVA de una vía seguido de la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) (S6, S7 y S8). En *F. oxysporum* el número de conidios se redujo significativamente entre los tratamientos T3 (50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ) y T9 (100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ) ( $2.71 \times 10^6$  y  $2.4 \times 10^6$  conidios, respectivamente) en comparación con T10 (control negativo) ( $7.88 \times 10^6$  conidios). Por otro lado, T1 (control positivo) y los tratamientos con concentraciones altas de 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  y 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  presentaron valores similares al control negativo (Figura 3a).

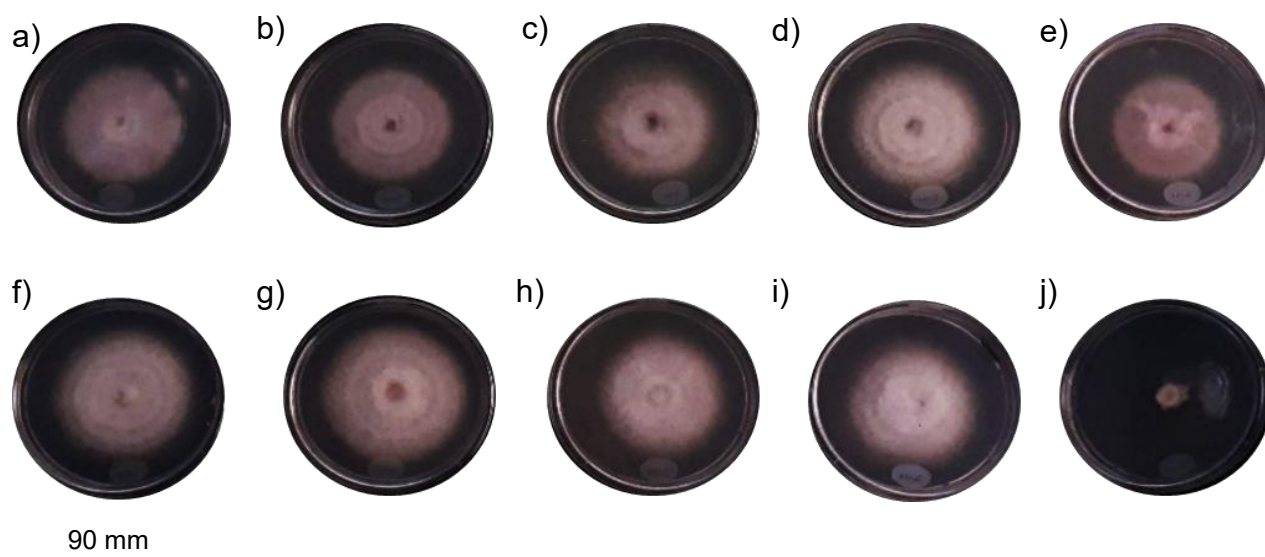
En *F. solani*, se observó una reducción marcada en T2 (25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ) y T7 (50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ) ( $1.8 \times 10^6$  y  $2.6 \times 10^6$  conidios, respectivamente). Las concentraciones más altas de  $\text{LaCl}_3$  (100  $\mu\text{M}$ ) no mostraron diferencias significativas con T10 (control positivo), que presentó el mayor número de conidios (Figura 3b). Finalmente, en *F. incarnatum* los tratamientos T2 (25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ ) y T7 (50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ) ( $9.1 \times 10^6$  y  $1.3 \times 10^7$ ) mostraron reducciones significativas en el número de conidios respecto al control negativo ( $3.8 \times 10^7$ ). En cambio, los tratamientos T3, T4, T5 y T9 no mostraron diferencias significativas y fueron similares a T10, que presentó el mayor número de conidios (Figura 3c).



**Fig. 3.** Número de conidios en tres especies del género *Fusarium* en medio *in vitro* bajo diferentes concentraciones de LaCl<sub>3</sub> y GdCl<sub>3</sub>. *F. oxysporum* (a), *F. solani* (b) y *F. incarnatum* (c). Medias ± DE con letras distintas sobre las barras indican diferencia significativa (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Control negativo (hongo sin tratamiento) (T1), hongo con 25 μM LaCl<sub>3</sub> (T2), hongo con 50 μM LaCl<sub>3</sub> (T3), hongo con 75 μM LaCl<sub>3</sub> (T4), hongo con 100 μM LaCl<sub>3</sub> (T5), hongo con 25 μM GdCl<sub>3</sub> (T6), hongo con 50 μM GdCl<sub>3</sub> (T7), hongo con 75 μM GdCl<sub>3</sub> (T8), hongo con 100 μM GdCl<sub>3</sub> (T9) control positivo (hongo tratado con propiconazol) (T10).

**Fig. 3.** Number of conidia in three species of the genus *Fusarium* in *in vitro* medium under different concentrations of LaCl<sub>3</sub> and GdCl<sub>3</sub>. *F. oxysporum* (a), *F. solani* (b) and *F. incarnatum* (c). Means ± SD with different letters on the bars indicate a significant difference (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Negative control (untreated fungus) (T1), fungus with 25 μM LaCl<sub>3</sub> (T2), fungus with 50 μM LaCl<sub>3</sub> (T3), fungus with 75 μM LaCl<sub>3</sub> (T4), fungus with 100 μM LaCl<sub>3</sub> (T5), fungus with 25 μM GdCl<sub>3</sub> (T6), fungus with 50 μM GdCl<sub>3</sub> (T7), fungus with 75 μM GdCl<sub>3</sub> (T8), fungus with 100 μM GdCl<sub>3</sub> (T9) and positive control (fungus treated with propiconazole) (T10).

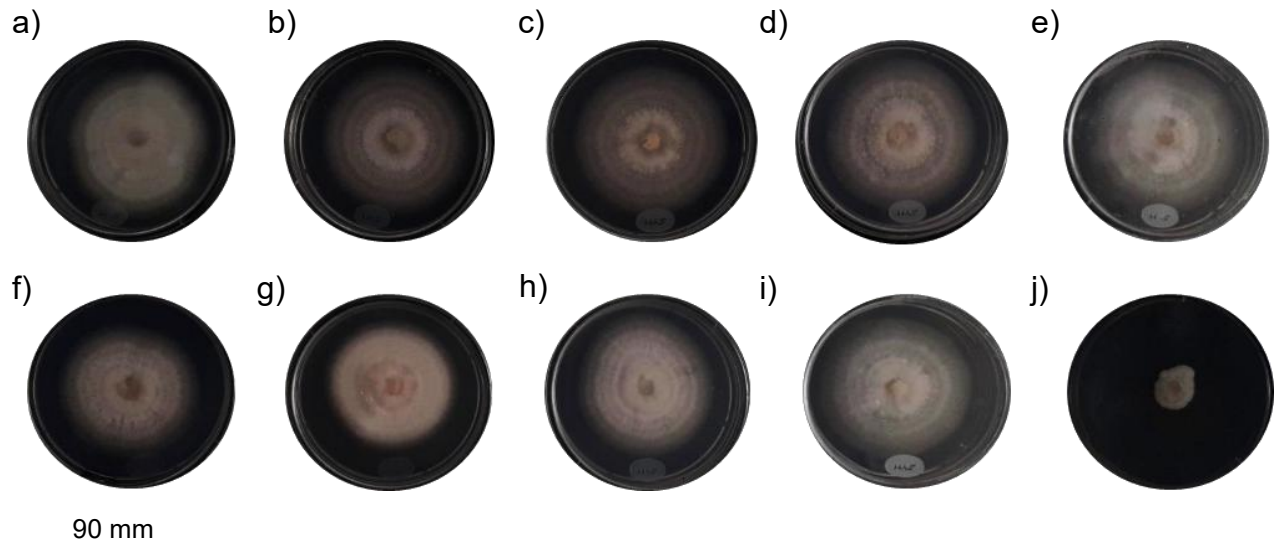
Se observó que *F. oxysporum* fue afectado por la presencia de lantánidos en el medio de cultivo (Figura 4). En comparación con T1 (control negativo), los tratamientos 100 μM de LaCl<sub>3</sub> y GdCl<sub>3</sub> mostraron visualmente una reducción en el diámetro micelial al incorporar estas sales en el medio, lo cual concuerda con las tendencias observadas en las figuras anteriores. Sin embargo, es importante mencionar que T10 (control positivo) presentó la mayor inhibición del crecimiento micelial en comparación con el resto de los tratamientos. Asimismo, se observaron diferencias en la tonalidad del micelio al aplicar concentraciones elevadas de lantánidos, principalmente con LaCl<sub>3</sub>, donde las colonias presentaron una coloración más clara y una textura menos densa respecto al control. Estos cambios podrían estar asociados con alteraciones en la síntesis de pigmentos o con el estrés fisiológico inducido por lantano lo que ocasionó una esporulación masiva de conidios como se describió previamente (Figura 3).



**Fig. 4.** Crecimiento de *F. oxysporum* en medio de PDA bajo diferentes concentraciones de lantánidos. Control negativo (hongo sin tratamiento) (T1) (a), hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2) (b), hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3) (c), hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4) (d), hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5) (e), hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6) (f), hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7) (g), hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8) (h), hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9) (i) y control positivo (hongo tratado con propiconazol) (T10) (j). La barra indica 90 mm del tamaño de la caja Petri.

**Fig. 4.** Growth of *F. oxysporum* in PDA medium under different concentrations of lanthanides. Negative control (untreated fungus) (T1) (a), fungus with 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2) (b), fungus with 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3) (c), fungus with 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4) (d), fungus with 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5) (e), fungus with 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6) (f), fungus with 50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7) (g), fungus with 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8) (h), fungus with 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9) (i) and positive control (fungus treated with propiconazole) (T10) (j). The bar indicates 90 mm of the size of the petri dish.

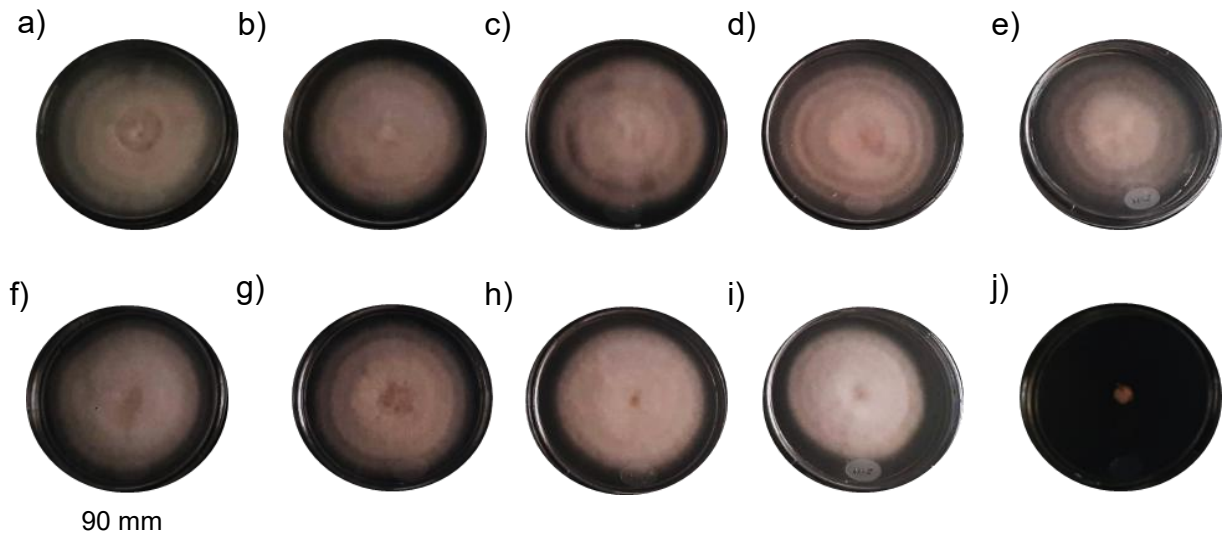
En cambio, *F. solani* mostró que el uso de lantánidos, particularmente en concentraciones de 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6) y 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9) produjo inhibiciones significativamente mayores en comparación con el control negativo lo cual se respalda con los resultados de inhibición y crecimiento micelial (Figura 1 y 2). Asimismo, se observaron tonalidades del micelio diferentes en los tratamientos con 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ , 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ , 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$ , 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  y 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (Figura 5). Estos cambios, se relacionan con el uso de concentraciones más altas, lo que podrían estar asociados a un estrés inducido por lantánidos ocasionando una mayor esporulación de conidios.



**Fig. 5.** Crecimiento de *F. solani* en medio de PDA bajo diferentes concentraciones con lantánidos. Control negativo (hongo sin tratamiento) (T1) (a), hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2) (b), hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3) (c), hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4) (d), hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5) (e), hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6) (f), hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7) (g), hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8) (h), hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9) (i) y control positivo (hongo tratado con propiconazol) (T10) (j). La barra indica 90 mm del tamaño de la caja Petri.

**Fig. 5.** Growth of *F. solani* in PDA medium under different concentrations with lanthanides. Negative control (untreated fungus) (T1) (a), fungus with 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2) (b), fungus with 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3) (c), fungus with 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4) (d), fungus with 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5) (e), fungus with 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6) (f), fungus with 50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7) (g), fungus with 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8) (h), fungus with 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9) (i) and positive control (fungus treated with propiconazole) (T10) (j). The bar indicates 90 mm of the size of the petri dish.

Finalmente, en *F. incarnatum*, el tratamiento T1 (control negativo) mostró un crecimiento micelial homogéneo y coloración clara, característicos del desarrollo normal del hongo. En contraste, los tratamientos con  $\text{LaCl}_3$  producen una ligera reducción en el diámetro del micelio, siendo más evidente a concentraciones de 75 y 100  $\mu\text{M}$ . Asimismo, los tratamientos con  $\text{GdCl}_3$  mostraron una inhibición más pronunciada del crecimiento destacando a T9 (100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$ ). Además, se apreciaron variaciones en la tonalidad del micelio, tornándose más pálido o presentando zonas menos densas en concentraciones altas de lantánidos, lo que podría reflejar una respuesta de estrés fisiológico (Figura 6). T10 (control positivo) presentó nuevamente la inhibición más marcada.



**Fig. 6.** Crecimiento de *F. incarnatum* en medio de PDA bajo diferentes concentraciones con lantánidos. Control negativo (hongo sin tratamiento) (T1) (a), hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2) (b), hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3) (c), hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4) (d), hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5) (e), hongo con 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6) (f), hongo con 50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7) (g), hongo con 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8) (h), hongo con 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9) (i) y control positivo (hongo tratado con propiconazol) (T10) (j). La barra indica 90 mm del tamaño de la caja Petri.

**Fig. 6.** Growth of *F. incarnatum* in PDA medium under different concentrations with lanthanides. Negative control (untreated fungus) (T1) (a), fungus with 25  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T2) (b), fungus with 50  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T3) (c), fungus with 75  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T4) (d), fungus with 100  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  (T5) (e), fungus with 25  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T6) (f), fungus with 50  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T7) (g), fungus with 75  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T8) (h), fungus with 100  $\mu\text{M}$   $\text{GdCl}_3$  (T9) (i) and positive control (fungus treated with propiconazole) (T10) (j). The bar indicates 90 mm of the size of the petri dish.

#### 4. Discusión

Los hongos patógenos como *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Fusarium incarnatum* son agentes causales de enfermedades devastadoras que afectan a diversas hortalizas, provocando pérdidas totales para los agricultores en todo el mundo. Ante esta problemática, se han implementado diversas estrategias de control, incluyendo métodos culturales, físicos, químicos (Ajilogba y Babalola, 2013) y el uso de promotores de crecimiento como lo son los elementos de tierras raras (ETR) que brindan un efecto bioestimulante y defensa contra factores de estrés en las plantas (Kaur *et al.*, 2024). Los resultados de este estudio muestran que la aplicación de los elementos de tierras raras, lantano ( $\text{LaCl}_3$ ) y gadolinio ( $\text{GdCl}_3$ ) mediante el método de medio envenenado, pueden generar un efecto antifúngico leve. Esto concuerda con reportes previos que indican que los iones de las tierras raras presentan actividades antibacterianas, antifúngicas e incluso nematocidas comparables a las de los iones de cobre, ampliamente empleados como metales antibacterianos (Wakabayashi *et al.*, 2016).

En particular, las concentraciones de 100  $\mu\text{M}$  tanto de  $\text{LaCl}_3$  como de  $\text{GdCl}_3$  mostraron un efecto inhibitorio sobre el crecimiento micelial. No obstante, es importante considerar que las sales utilizadas en este estudio se encontraban en forma de cloruros, por lo que parte del efecto observado podría estar asociada a la presencia del ión cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) en el medio de cultivo. Diversos estudios han señalado que cambios en la composición iónica del medio pueden alterar el crecimiento micelial, la presión osmótica y otros procesos fisiológicos de los hongos en condiciones *in vitro* (Van Long *et al.*, 2017). Asimismo, se ha demostrado que la incorporación de sales como  $\text{NaCl}$  o  $\text{CaCl}$  en medios de cultivo puede modificar el crecimiento micelial, la germinación de esporas y la esporulación de hongos debido al estrés osmótico generado en el medio (Liu *et al.*, 2021). Por lo tanto, el efecto inhibitorio observado podría deberse a la presencia conjunta de los iones de los ETR y del ión cloruro, interviniendo sobre el metabolismo de *Fusarium*.

Por el contrario, el tratamiento control positivo evidenció una mayor inhibición del crecimiento micelial sobre las tres especies de *Fusarium* (Figuras 1 y 2). Sin embargo, cabe señalar que este producto químico ha sido reportado como carcinógeno y potencialmente nocivo para la salud humana (Sandoval-Chávez *et al.*, 2011), además de provocar efectos negativos sobre la actividad microbiana y la fertilidad del suelo (Sliti *et al.*, 2024). La búsqueda de alternativas al uso de fungicidas convencionales como el propiconazol, cuyos efectos sobre el microbiota del suelo y su potencial carcinogénico han sido ampliamente documentados, ha conducido al estudio de agentes moduladores del metabolismo fúngico, incluyendo cationes metálicos que alteran el crecimiento y la producción enzimática de hongos patógenos (Chamorro-Mejía *et al.*, 2024; Hernández-Sánchez *et al.*, 2024). Igualmente, el aprovechamiento de residuos agroindustriales como sustrato en procesos de biocontrol fúngico representa una estrategia prometedora y sostenible (Rodríguez-González *et al.*, 2025).

En contraste, los tratamientos con elementos de tierras raras en concentraciones de 75  $\mu\text{M}$  y 100  $\mu\text{M}$  mostraron una inhibición leve en las tres especies de *Fusarium*, con un efecto ligeramente mayor del gadolinio en comparación con el lantano. Diversos estudios han reportado que el lantano ejerce efectos antimicrobianos positivos debido a sus propiedades antioxidantes y la formación de complejos metálicos de  $\text{La (III)}$ , capaces de inducir estrés e inhibición en hongos (Mehwish *et al.*, 2019), especialmente en plantas fertilizadas con ETR. Sin embargo, en este estudio observó que la interacción directa de estos elementos con los hongos solo estimuló una esporulación masiva de conidios (Figura 3) en concentraciones altas (75 y 100  $\mu\text{M}$ ), lo que sugiere que el efecto antifúngico es leve y dependiente de la especie y la concentración.

Por otro lado, el lantano ha sido descrito como un agente con potencial fungistático, capaz de generar estrés en los hongos y limitar su crecimiento, tal como reporta Aragón-Muriel y Polo-Cerón (2013) en su investigación sobre la síntesis, caracterización, comportamiento térmico y actividad antifúngica de complejos de  $\text{La (III)}$ . En comparación, los efectos reportados del gadolinio sobre los hongos son escasos. En conjunto, estos resultados sugieren que los efectos de los ETR sobre los hongos fitopatógenos dependen de la especie fúngica, la concentración del elemento y las condiciones de interacción *in vitro*. De manera que,

LaCl<sub>3</sub> y GdCl<sub>3</sub> podrían afectar la regulación de genes relacionados con la biosíntesis de cisteína y metionina, los cuales están asociados con la formación de pigmentos en *Fusarium* (Zhao *et al.*, 2022), así como inducir una respuesta de estrés que conlleva una reducción en la pigmentación de las especies (Mao *et al.*, 2022). Tal como se observa en las figuras 4, 5 y 6. No obstante, es importante considerar que los resultados obtenidos en este estudio se generaron bajo condiciones *in vitro*, las cuales presentan ciertas limitaciones debido a la ausencia de la planta hospedera. Por consiguiente, es necesario realizar estudios futuros bajo condiciones de invernadero o en sistemas planta-patógeno que permita evaluar con mayor precisión la eficacia de las concentraciones utilizadas y su interacción con estos dos iones.

Cabe resaltar, que diversos estudios sobre la interacción planta-patógeno-ETR, han reportado efectos bioestimulantes en plantas, tales como la activación de genes relacionados con rutas de defensas dependientes de ácido jasmónico y etileno (Batista-Oliveira *et al.*, 2021), la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Kastori *et al.*, 2024), así como mejoras en la altura de las plantas, la capacidad fotosintética, la biomasa radicular, el rendimiento, el contenido de lignina en la pared celular y la actividad de enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa (SOD), peroxidasa (POD) y catalasa (CAT) (Cao *et al.*, 2023). En este contexto, los resultados obtenidos sugieren que LaCl<sub>3</sub> y GdCl<sub>3</sub> no ejercen una fuerte inhibición directa sobre el crecimiento del hongo en cultivo *in vitro*. Esto indica que su efecto protector se debería principalmente a la activación de mecanismos de defensa en la planta, más que a una toxicidad directa sobre el patógeno, aunque en este estudio se observó una esporulación masiva de conidios posiblemente asociada a una respuesta de estrés.

## 5. Conclusión

Los tratamientos con lantánidos tuvieron un efecto inhibitorio significativo sobre el crecimiento y la esporulación de *F. oxysporum*, *F. solani* y *F. incarnatum*, alterando procesos fisiológicos clave de estas especies. En comparación con el control negativo, esta inhibición fue estadísticamente significativa únicamente en las concentraciones más altas de las sales. La intensidad de la respuesta varió de acuerdo con la especie y la concentración aplicada, lo que sugiere diferencias en la tolerancia o en los mecanismos de defensa frente al estrés iónico. Además, el gadolinio demostró ser más efectivo que el lantano, especialmente en concentraciones de 75 y 100 µM. Estos hallazgos aportan evidencia con potencial biotecnológico sobre el uso de lantánidos como agentes inhibidores de patógenos, y destacan la necesidad de continuar con investigaciones que profundicen en los mecanismos de interacción planta-patógeno-lantánidos, con el fin de comprender mejor sus mecanismos de acción en los sistemas agroproductivos.

## Agradecimientos

Al instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, por brindarme el respaldo institucional y académico necesario y a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación

(SECIHTI), por la beca otorga (N° 1027882) para realizar mis estudios de Doctorado (G.C.M).

## Contribución de los autores

**Guadalupe Contreras-Martínez:** Metodología, software, análisis formal, investigación, recursos, curación de datos, redacción: preparación del borrador original, visualización. **Liliana Lara-Capistrán:** Conceptualización, metodología, validación, recursos, supervisión. **Elia Nora Aquino-Bolaños:** Validación y redacción: revisión-edición. **Norma Flores-Estévez:** Recursos, validación y redacción: revisión-edición. **Juan Carlos Noa-Carrazana:** Conceptualización, metodología, validación, recursos, redacción: revisión y edición, supervisión y administración del proyecto.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## Referencias

Ajilogba, C.F., Babalola, O.O., 2013. Integrated management strategies for tomato *Fusarium* wilt. *Biocontrol Sci.* 18 (3), 117-127. <https://doi.org/10.4265/bio.18.117>

Aragón-Muriel, A., Polo-Cerón, D., 2013. Synthesis, characterization, thermal behavior, and antifungal activity of La (III) complexes with cinnamates and 4-methoxyphenylacetate. *J. Rare Earths.* 31 (11), 1106-1113. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60412-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60412-8)

Arie, T., 2019. *Fusarium* diseases of cultivated plants, control, diagnosis, and molecular and genetic studies. *J. Pestic Sci.* 44 (4), 275-281. <https://doi.org/10.1584/jpestics.J19-03>

Bahadur, A., 2021. Current Status of *Fusarium* and Their Management Strategies. In *Fusarium - An Overview of the Genus*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100608>

Batista-Oliveira, J.S., Formey, D., Torres, M., Aragón, W., Romero-Contreras, Y.J., Maruri-López, I., Tromas, A., Schwan-Estrada, K.R.F., Serrano, M., 2021. Gadolinium protects *Arabidopsis thaliana* against *Botrytis cinerea* through the activation of JA/ET-induced defense responses. *Int. J. Mol. Sci.* 22 (9), 4938. <https://doi.org/10.3390/ijms22094938>

Canavati-Alatorre, M.S., Águila, I., Barraza-Soltero, I.K., Castellón, E., Correa-Barrón, A.L., Sánchez-López, E., Conde-Avila, V., González-Marquez, A., Méndez-Iturbide, D., Ruvalcaba, D., Sánchez, C., 2016. Growth and cutinase activity of *Fusarium culmorum* grown in solid-state fermentation. *Mex. J. Biotechnol.* 1 (2), 8–19. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2016.1.2.8>

Cao, X., Chen, X., Liu, Y., Wang, C., Yue, L., Elmer, W.H., White, J.C., Wang, Z., Xing, B., 2023. Lanthanum silicate nanomaterials enhance sheath blight resistance in rice: mechanisms of action and soil health evaluation. *ACS nano*. 17 (16), 15821-15835. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c03701>

Chamorro-Mejía, A., Jaramillo-Quintero, L.P., Sánchez, C., 2024. Production of esterase by *Fusarium culmorum* grown in the presence of different concentrations of di(2-ethylhexyl) phthalate and calcium ion in submerged fermentation. *Mex. J. Biotechnol.* 9 (4), 1–13. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2024.9.4.1>

Delgado O., J.C., Ochoa F., Y.M., Beltrán B., M., Cerna C., E., 2018. Evaluación *in vitro* de la actividad antifúngica del extracto de *Heliopsis longipes* en cepas de *Sclerotium cepivorum* y *Sclerotinia sclerotiorum*. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9 (4), 871-877. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i4.337>

Gómez-Merino, F.C. and Trejo-Téllez, L.I., 2018. The Role of Beneficial Elements in Triggering Adaptive Responses to Environmental Stressors and Improving Plant Performance. In: Vats, S. (eds) *Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants*. Springer, Singapore. pp. 137-172. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-9029-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-9029-5_6)

González-Márquez, A., Loera-Corral, O., Viniegra-González, G., Sánchez, C., 2019. Production of cutinolytic esterase by *Fusarium culmorum* grown at different apple cutin concentrations in submerged fermentation. *Mex. J. Biotechnol.* 4 (4), 50–64. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2019.4.4.50>

Guerrero-Rodríguez, E., Solis-Gaona, S., Hernández-Castillo, F.D., Flores-Olivas, A., Sandoval-López, V., 2007. Actividad Biológica *in vitro* de Extractos de *Flourensia cernua* D.C. en Patógenos de Postcosecha: *Alternaria alternata* (Fr.:Fr.) Keissl., *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz., y *Sacc.* Y *Penicillium digitatum* (Pers.:Fr.) Sacc. *Rev. Mex. Fitopatol.* 25 (1), 48-53.

Hernández-Sánchez, B., Santacruz-Juárez, E., Díaz, R., Sánchez-Martínez, J.A., Sánchez, C., 2024. Diversification of nitrogen sources to enhance the esterase activity during the degradation of the endocrine disruptor di(2-ethylhexyl) phthalate by *Fusarium culmorum*. *Mex. J. Biotechnol.* 9 (4), 30–51. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2024.9.4.30>

Kasatkina, E.A., Shumilov, O.I., Kirtsideli, I.Y., Makarov, D.V., 2023. Hormesis and Low Toxic Effects of Three Lanthanides in Microfungi Isolated from Rare Earth Mining Waste in Northwestern Russia. *Toxics*. 11 (12), 1010. <https://doi.org/10.3390/toxics11121010>

Kastori, R.R., Putnik-Delić, M.I., Maksimović, I.V., 2023. Rare earth elements application in agriculture. *Acta Agric. Serb.* 28 (56). <https://doi.org/10.5937/AASer2356087K>

Kastori, R., Putnik-Delić, M., Maksimović, I., 2024. Rare earth elements, microorganisms, and control of plant diseases. *Contemp. Agric.* 73, 228-237. <https://doi.org/10.2478/contagri-2024-0028>

Kastori, R., Maksimović, I., Zeremski-Škorić, T., Putnik-Delić, M., 2010. Rare earth elements: Yttrium and higher plants. *Zborn. Mat. Srp. Prir. Nauke.* (118), 87-98. <https://doi.org/10.2298/ZMSPN1018087K>

Kaur, P., Mahajan, M., Gambhir, H., Khan, A., Khan, M.I.R., 2024. Rare earth metallic elements in plants: Assessing benefits, risks and mitigating strategies. *Plant Cell Rep.* 43 (9), 216. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03305-9>

Larios-Palacios, O.E., López-Vázquez, Y., Curiel-Rodríguez, A., Ruíz-Espinoza, F.J., Solano-Vidal, R., Serrato-Cruz, M.A., 2020. Evaluación *in vitro* de métodos contra *Botrytis cinerea*. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 11(3), 593-606. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i3.2077>

Liu, D., Wang, X., Zhang, X., Gao, Z., 2013. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings. *Plant Soil Environ.* 59 (5), 196-200. <https://doi.org/10.17221/760/2012-PSE>

Liu, Y., Gong, X., Li, M., Si, H., Zhou, Q., Liu, X., Fan, Y., Zhang, X., Han, J., Gu, S., Dong, J., 2021. Effect of osmotic stress on the growth, development and pathogenicity of *Setosphaeria turcica*. *Front. Microbiol.* 12, 706349. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.706349>

Makovitzki, A., Viterbo, A., Brotman, Y., Chet, I., Shai, Y., 2007. Inhibition of fungal and bacterial plant pathogens *in vitro* and in planta with ultrashort cationic lipopeptides. *Appl. Environ. Microbiol.* 73 (20), 6629-36. <https://doi.org/10.1128/AEM.01334-07>

Mao, X., Wu, Z., Chen, F., Zhou, M., Hou, Y., 2022. FfCOX17 is Involved in Fumonisin Production, Growth, Asexual Reproduction, and Fungicide Sensitivity in *Fusarium fujikuroi*. *Toxins.* 14 (7), 427. <https://doi.org/10.3390/toxins14070427>

Mehwish Aftab, M.A., Tariq Mahmud, T.M., Basra, M.A.R., Aqsa Gulzar, A.G., Sumaira Basharat, S.B., Junaid, H.M., 2019. Schiff base, 6-amino-2-[(4-(dimethylamino) benzylidene) amino] hexanoic acid and its lanthanide (III) complexes have antioxidant and antimicrobial activities. *Pak. J. Zool.* 51 (1), 167-172. <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2019.51.1.167.172>

Pal, K.K., Gardener, B.M., 2006. Biological control of plant pathogens. *Plant Health Instr.* 2 (5), 1117-1142. <https://doi.org/10.1094/PHI-A-2006-1117-02>

Peng, Y., Li, S.J., Yan, J., Tang, Y., Cheng, J.P., Gao, A.J., Yao, X., Ruan, J.J., Xu, B.L., 2021. Research Progress on Phytopathogenic Fungi and Their Role as Biocontrol Agents. *Front. Microbiol.* 12, 670135. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.670135>

Qizhuang, H., Jing, Y., Hui, M., Hexing, L., 2006. Studies on the spectra and antibacterial properties of rare earth dinuclear complexes with L-phenylalanine and o-phenanthroline. *Mater. Lett.* 60 (3), 317-320. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.08.051>

Rodríguez-González, L.V., Martínez-Medina, G.A., Torres-Leon, C., Chávez-González, M.L., Lafuente-Rincón, D.F., Rodríguez-González, J., Flores-Loyola, E., Aguilar, C.N., Ramírez-Guzmán, N., 2025. Agroindustrial residues exploration to maximize metabolites production in fungal biocontrol co-culture. *Mex. J. Biotechnol.* 10 (2), 64–88. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2025.10.2.64-88>

Salvatore, M.M., Andolfi, A., 2021. Phytopathogenic Fungi and Toxicity. *Toxins.* 13 (10), 689. <https://doi.org/10.3390/toxins13100689>

Sandoval-Chávez, R.A., Martínez-Peniche, R.Á., Hernández-Iturriaga, M., Fernández-Escartín, E., Arvizu-Medrano, S., Soto-Muñoz, L., 2011. Postharvest biological and chemical control of *Fusarium stilboides* on bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *Rev. Chapingo, Ser. Hortic.* 17 (2), 161-172. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2011.17.018>

Sliti, A., Singh, V., Ibal, J.C., Jeong, M., Shin, J.H., 2024. Impact of propiconazole fungicide on soil microbiome (bacterial and fungal) diversity, functional profile, and associated dehydrogenase activity. *Environ Sci Pollut Res.* 31 (5), 8240-8253. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31643-w>

Van Long, N.N., Rigalma, K., Coroller, L., Dadure, R., Debaets, S., Mounier, J., Vasseur, V., 2017. Modelling the effect of water activity reduction by sodium chloride or glycerol on conidial germination and radial growth of filamentous fungi encountered in dairy foods. *Food microbiol.* 68, 7-15. <http://doi.org/10.1016/j.fm.2017.06.014>

Wakabayashi, T., Ymamoto, A., Kazaana, A., Nakano, Y., Nojiri, Y., Kashiwazaki, M., 2016. Antibacterial, antifungal and nematicidal activities of rare earth ions. *Biol. Trace Elem. Res.* 174 (2), 464-470. <https://doi.org/10.1007/s12011-016-0727-y>

Zhao, F., Yuan, Z., Wen, W., Huang, Z., Mao, X., Zhou, M., Hou, Y., 2022. FgMet3 and FgMet14 related to cysteine and methionine biosynthesis regulate vegetative growth, sexual reproduction, pathogenicity, and sensitivity to fungicides in *Fusarium graminearum*. *Front. Plant Sci.* 13, 1011709. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1011709>

Zhang, W., Zhou, L., 2025. Reflections and challenges of rare-earth elements in agricultural applications: high promotion and low inhibition, detection of pesticide residues, and traceability and anticounterfeiting of agricultural products. *J. Agric. Food Chem.* 73 (42), 26472-26492. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c09117>

## Material suplementario

**S1.** Análisis de los supuestos estadísticos para el diámetro micelial de las tres especies de *Fusarium*.

**S1.** Analysis of the statistical assumptions for the mycelial diameter of the three *Fusarium* species.

Especie	Prueba estadística	W	p-valor	Prueba de homogeneidad	F	p-valor
<i>F. oxysporum</i>	Shapiro-Wilk	0.90931	$9.593 \times 10^{-15}$	Levene	10.508	$1.344 \times 10^{-14}$
<i>F. solani</i>	Shapiro-Wilk	0.90661	$5.561 \times 10^{-15}$	Levene	12.080	$<2.2 \times 10^{-16}$
<i>F. incarnatum</i>	Shapiro-Wilk	0.88303	$<2.2 \times 10^{-16}$	Levene	12.638	$<2.2 \times 10^{-16}$

**S2.** Análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis para la variable diámetro micelial en tres especies *Fusarium*.

**S2.** Nonparametric Kruskal-Wallis analysis for the variable mycelial diameter in three *Fusarium* species.

Especie	Prueba estadística	$\chi^2$	GI	p-valor
<i>F. oxysporum</i>	Kruskal-Wallis	40.513	9	$6.134 \times 10^{-6}$
<i>F. solani</i>	Kruskal-Wallis	44.655	9	$1.069 \times 10^{-6}$
<i>F. incarnatum</i>	Kruskal-Wallis	52.834	9	$3.142 \times 10^{-8}$

**S3.** Análisis de los supuestos estadísticos para el porcentaje de inhibición de las tres especies de *Fusarium*.

**S3.** Analysis of the statistical assumptions for the percentage of inhibition of the three *Fusarium* species.

Especie	Prueba estadística	W	p-valor	Prueba de homogeneidad	F	p-valor
<i>F. oxysporum</i>	Shapiro-Wilk	0.583	$1.098 \times 10^{-10}$	Levene	0.7498	0.6618
<i>F. solani</i>	Shapiro-Wilk	0.63832	$7.546 \times 10^{-10}$	Levene	1.5708	0.1574
<i>F. incarnatum</i>	Shapiro-Wilk	0.52786	$1.899 \times 10^{-11}$	Levene	2.2833	0.03571

**S4.** Análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis para el porcentaje de inhibición de las tres especies *Fusarium*.

**S4.** Nonparametric Kruskal-Wallis analysis for the percentage of inhibition of the three *Fusarium* species.

Espece	Prueba estadística	$\chi^2$	Gl	p-valor
<i>F. oxysporum</i>	Kruskal-Wallis	41.915	9	3.406 x10 <sup>-6</sup>
<i>F. solani</i>	Kruskal-Wallis	32.664	9	1.528 x10 <sup>-4</sup>
<i>F. incarnatum</i>	Kruskal-Wallis	33.837	9	9.538 x10 <sup>-5</sup>

**S5.** Análisis de los supuestos estadísticos para número de conidios de las tres especies de *Fusarium*.

**S5.** Analysis of the statistical assumptions for the number of conidia of the three *Fusarium* species.

Espece	Prueba estadística	W	p-valor	Prueba de homogeneidad	F	p-valor
<i>F. oxysporum</i>	Shapiro-Wilk	0.93457	0.0650	Levene	0.8448	0.5855
<i>F. solani</i>	Shapiro-Wilk	0.96493	0.4112	Levene	0.6355	0.7541
<i>F. incarnatum</i>	Shapiro-Wilk	0.96493	0.4112	Levene	0.6355	0.7541

**S6.** Análisis de varianza para la variable número de conidios de *F. oxysporum*.

**S6.** Analysis of variance for the variable number of conidia of *F. oxysporum*.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p
Tratamientos	9	1.174x10 <sup>14</sup>	1.304x10 <sup>13</sup>	11.53	3.82x10 <sup>-6</sup>
Error	20	2.262x10 <sup>13</sup>	1.131x10 <sup>12</sup>		

**S7.** Análisis de varianza para la variable número de conidios de *F. solani*.

**S7.** Analysis of variance for the variable number of *F. solani* conidia.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p
Tratamientos	9	1.205x10 <sup>14</sup>	1.339x10 <sup>13</sup>	31.58	6.65x10 <sup>-10</sup>
Error	20	8.480x10 <sup>12</sup>	4.240x10 <sup>11</sup>		

**S8.** Análisis de varianza para la variable número de conidios de *F. incarnatum*.

**S8.** Analysis of variance for the variable number of conidia of *F. incarnatum*.

<b>Fuente de variación</b>	<b>gl</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamientos	9	$3.013 \times 10^{15}$	$3.347 \times 10^{14}$	31.58	$6.65 \times 10^{-10}$
Error	20	$2.120 \times 10^{14}$	$1.060 \times 10^{13}$		

