



Bioprospección de bacilos asociados a cultivares cubanos de trigo para el control de hongos fitopatógenos

Bioprospecting of bacilli associated with Cuban wheat cultivars for the control of phytopathogenic fungi

^{ID}Yoania Ríos Rocafull¹, ^{ID}Marisel Ortega García¹, ^{ID}Beatriz Ramos García¹, ^{ID}Francisco Gil Vidal¹,
^{ID}Marisol Morales Díaz¹, ^{ID}Yarelis Ortiz Núñez¹, ^{ID}Marcia María Rojas Badía^{2*}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical (INIFAT), Calle 188 #38754 e/ 397 y Linderos, Santiago de las Vegas, Boyeros, La Habana, Cuba

²Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Calle 25 entre H e I, Vedado, La Habana, Cuba

RESUMEN: El trigo es un cultivo de gran importancia para la alimentación a nivel mundial. En Cuba, es una especie relevante por su consumo y las grandes importaciones que se realizan para cubrir las necesidades del país. Dentro de los factores que afectan sus rendimientos se encuentran los hongos fitopatógenos, los cuales sería conveniente manejar con alternativas biológicas. El objetivo del presente estudio fue caracterizar el potencial antagonista de bacilos Gram positivos procedentes de la rizosfera y el interior de plantas de trigo de los cultivares cubanos 'Cuba C-204', 'I 399' y 'M04'. De los 21 microorganismos aislados, el 95 % liberó enzimas líticas (56 % amilasas, 40 % proteasas, 68 % lipasas y 60 % glucanasas); se destacaron siete por sus resultados para tres enzimas y dos por producir todas ellas. Tres bacterias limitaron el crecimiento de *Fusarium* sp., 13 incidieron sobre *Curvularia* sp., cuatro afectaron a *Curvularia* sp., seis a *Bipolaris* sp., y cuatro a *Alternaria* sp., con diferencias en el valor del porcentaje de inhibición entre cepas para cada uno de los patógenos. Dentro de los daños ocasionados a los hongos sobresalen la detención de su crecimiento, el enrollamiento del micelio, la producción de abundantes conidios y la lisis celular. La investigación permitió la selección de los aislados MH2, Mtr2.1, MT3, procedentes del cultivar 'M04', y el aislado Crt2.1, del cultivar 'Cuba C-204', los que se pueden considerar promisorios para nuevos estudios encaminados a la obtención de bioproductos para el control biológico del trigo en Cuba.

Palabras clave: antagonismo, bacterias promotoras del crecimiento vegetal, enfermedades fúngicas, granos.

ABSTRACT: Wheat is a crop of great importance for global food security. In Cuba, it is a relevant species due to its consumption and the significant imports required to meet the country's needs. Among the factors affecting its yields are phytopathogenic fungi, which would be advisable to manage using biological alternatives. The aim of the present study was to characterize the antagonistic potential of Gram-positive bacilli from the rhizosphere and endosphere of wheat plants of the Cuban cultivars 'Cuba C-204', 'I 399', and 'M04'. Out of the 21 microorganisms isolated, 95 % released lytic enzymes (56 % amylases, 40 % proteases, 68 % lipases, and 60 % glucanases); seven stood out for their results for three enzymes, and two for producing all of them. Three bacteria inhibited the growth of *Fusarium* sp., 13 affected *Curvularia* sp., four impacted *Curvularia* sp., six affected *Bipolaris* sp., and four affected *Alternaria* sp., with differences in the percentage of inhibition values among strains for each pathogen. Among the damages caused to the fungi, the most notable were growth arrest, mycelial coiling, abundant conidia production, and cellular lysis. The research allowed for the selection of isolates MH2, Mtr2.1, and MT3, from the cultivar 'M04', and isolate Crt2.1, from the cultivar 'Cuba C-204', which can be considered promising for further studies aimed at developing bioproducts for the biological control of wheat in Cuba.

Key words: antagonism, fungal diseases, grains, plant-growth-promoting bacteria.

*Autor para correspondencia: marciarojasbadia20018@gmail.com

Recibido: 10/01/2026

Aceptado: 14/04/2026

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribucion de los autores: **Conceptualización,** **Curación de datos:** Yoania Ríos Rocafull. **Investigación:** Yoania Ríos Rocafull, Marisel Ortega García, Beatriz Ramos García, José Francisco Gil Vidal. **Metodología:** Yoania Ríos Rocafull, Marisel Ortega García, Beatriz Ramos García, Marisol Morales Díaz. **Supervisión:** Marcia María Rojas Badía. **Escritura del borrador inicial:** Yoania Ríos Rocafull, Marisel Ortega García, Yarelis Ortiz Núñez, Marcia María Rojas Badía. **Escritura y edición final:** Yoania Ríos Rocafull, Marcia María Rojas Badía.

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

La alimentación a nivel mundial se sustenta en el consumo de cereales (1). Dentro de ellos, el trigo (*Triticum aestivum* L.) se reconoce como uno de los más destacados por su relevancia para numerosos países (2). Uno de los factores que afectan de manera significativa el rendimiento de la especie vegetal es el ataque de patógenos, fundamentalmente los fúngicos (1). Géneros como *Alternaria*, *Bipolaris*, *Fusarium* y *Curvularia*, producen grandes daños en las hojas y otros órganos de la planta e influyen de forma negativa en procesos fisiológicos de importancia para su crecimiento y desarrollo (2,3). Algunos de estos organismos, además liberan micotoxinas (1), metabolitos secundarios que pueden causar serias enfermedades a los animales y al ser humano (4), por lo que se debe prestar aún más atención a su eliminación.

Para el control de hongos patógenos en la mayoría de los países se utilizan productos químicos, aun cuando se conoce del daño que estos ocasionan al medio ambiente y al hombre, así como sus efectos en la resistencia de las enfermedades y su bioacumulación (5,6). Es por ello, que cada día se insiste con mayor fuerza en el uso de métodos más sostenibles que también sean efectivos, como por ejemplo el control biológico, dentro del cual se incluye el uso de microorganismos endófitos y rizosféricos, destacándose el papel que pueden desempeñar géneros como *Pseudomonas*, *Trichoderma* y *Bacillus*, entre otros (5).

En Cuba, la producción de trigo no satisface la demanda de la población, lo cual hace que se realicen grandes importaciones del grano y subproductos derivados de su procesamiento (7). En el país, este cultivo no está exento al ataque de hongos fitopatógenos, aspecto que incide negativamente en las producciones. Una de las herramientas que se podrían utilizar para su control son las bacterias promotoras del crecimiento vegetal, las que ejercen su efecto contra hongos patógenos mediante la producción de antibióticos, enzimas extracelulares o toxinas, el parasitismo, la competencia por nutrientes o espacio y la inducción de resistencia sistémica, entre otros mecanismos (8,9).

En este sentido, el aislamiento de bacterias asociadas a la especie vegetal y la selección de aquellas que posean características favorables para el control de patógenos resulta importante, con el fin de generar nuevos productos con efecto biocontrol más eficientes y competitivos. Considerando estos elementos el trabajo se propuso como objetivo caracterizar el potencial antagonista de bacilos Gram positivos aislados desde la rizosfera y el interior de tres cultivares cubanos de trigo, para seleccionar bacterias promisorias para el control biológico en la especie vegetal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Aislamiento de bacilos esporulados asociados a cultivares cubanos de trigo

Se seleccionaron al azar plantas de trigo de 30 días de los cultivares cubanos 'Cuba C-204' (variedad comercial), 'I 399' y 'M04', que se encontraban en el Lote 10 de las áreas agrícolas del Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt", INIFAT. El suelo en el cual se sembró el material vegetal, clasificado como Ferralítico Rojo Lixiviado (10), tenía un pH neutro, buen contenido de materia orgánica y predominio del calcio sobre el magnesio (Tabla 1). Las semillas en todos los casos procedieron del Banco Central de Germoplasma de Cuba, que radica en la propia institución.

Métodos de análisis: pH (potenciometría); materia orgánica (Walkley y Black); P_2O_5 (Oniani, por extracción con H_2SO_4); K, Na (fotometría de llama); Ca y Mg (espectrofotometría de absorción atómica) (11).

Las plantas se colocaron en bolsas de plástico y se trasladaron al Laboratorio de Conservación de Bacterias del INIFAT para su procesamiento. Con el suelo asociado a las raíces se conformó una muestra única por cada cultivar, de la cual se tomaron cinco submuestras de 1 g cada una para el aislamiento de los microorganismos. El material vegetal, se lavó y seguidamente, se separaron las raíces, tallos y hojas. Las fracciones de cada órgano se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 4 % durante 5 min y se enjuagaron con agua destilada estéril y se maceraron con la ayuda de un mortero estéril.

Las muestras finales se procesaron según el método de diluciones seriadas (12). Las diluciones 10^{-4} y 10^{-5} se colocaron a 100 °C de temperatura durante 20 min., y posteriormente, se sembraron en el medio de cultivo agar nutriente. Las placas se incubaron durante 24-48 h a 28 °C. Las bacterias diferentes se purificaron mediante siembras por agotamiento y posteriormente, se realizaron tinciones de Gram y se seleccionaron los bacilos esporulados Gram positivos.

Caracterización de la actividad antagonista de los aislados seleccionados

Producción de enzimas líticas

Para evaluar la producción por parte de las bacterias de enzimas amilasas, proteasas y lipasas se utilizó el medio de cultivo agar nutriente con almidón soluble (1 %), leche descremada (10 %) y Tween 80 (1 %), respectivamente.

Tabla 1. Características del suelo donde se encontraban sembradas las plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) que se utilizaron para el aislamiento de las bacterias

pH	Materia orgánica %	P_2O_5 mgkg ⁻¹	K	Na	Ca	Mg
7,20	3,16	33,00	0,49	0,08	20,00	7,50

En todos los casos el período de incubación fue de 72 h y la temperatura de 30 °C. En las placas con almidón se adicionaron 5 mL de la solución de iodo de Gram para la evaluación de las enzimas amilasas y se consideró como una respuesta positiva la aparición de una zona clara alrededor de la colonia bacteriana. Para las enzimas proteolíticas el criterio de presencia de hidrólisis fue una zona clara alrededor de las colonias en el medio con leche, mientras que para las enzimas lipasas se consideró la formación de un halo en el medio con Tween. Para detectar la presencia de enzimas glucanasas se utilizó un medio con 10 g de carboximetilcelulosa (13), el que después del tiempo de incubación se cubrió con una solución de rojo congo (0,1 % en agua destilada) durante 30 min y posteriormente, se lavó dos veces por 5 min con NaCl (1M), contemplando como una respuesta positiva para la liberación de la enzima la aparición de un halo amarillo alrededor de la colonia.

Efecto de las bacterias sobre el crecimiento de diferentes hongos

Se evaluaron los siguientes hongos fitopatógenos: *Fusarium* sp. (cepas 2022), *Curvularia* sp. (cepa 3579), *Curvularia* sp. (cepa 3388), *Bipolaris* sp. (cepa 2856) y *Alternaria* sp. (cepa 3403), todos conservados en la Colección de Cultivos Puros de Hongos del INIFAT (853 de la Federación Mundial de Colecciones de Cultivos).

En un primer ensayo los aislados bacterianos se inocularon, de dos en dos, cada uno a 20 mm del borde de la placa *Petri* de 90 mm con medio de cultivo agar papa dextrosa (PDA) (BioCen); y en el centro se colocó un disco de 5 mm del patógeno. Se evaluó la acción de la bacteria sobre el crecimiento del hongo mediante una escala cualitativa, donde: (+) indicó que esta limitó el crecimiento del patógeno y (-) que no ejerció ninguna acción sobre este.

En el segundo experimento, los aislados con resultados positivos se inocularon de forma independiente a 20 mm del borde de la placa y en el extremo opuesto se colocó el disco del hongo. Se midió el diámetro del micelio fúngico tanto en las placas donde se inoculó la bacteria como en placas testigos, donde solamente se inoculó el patógeno. Con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de inhibición micelial (IM) como:

$$IM\% = ((dt - di)/dt) \times 100$$

Donde dt: diámetro del micelio en las placas testigo y di: diámetro del micelio en las placas inoculadas (14). Además, se describió el daño ocasionado al hongo mediante observaciones que se realizaron en un microscopio óptico AXIOSKOP 40-Zeiss (40 X de aumento). El periodo de incubación en los dos ensayos osciló entre 7 y 10 días, en dependencia del crecimiento del patógeno (incubadora BINDER, modelo B 28).

En todas las pruebas se utilizaron tres réplicas por cada aislado (igual para los testigos). La temperatura de incubación fue de 28 °C. Para medir las colonias, el halo formado alrededor de estas y el diámetro del micelio fúngico se utilizó un pie de rey mecánico (0,05 cm error).

Diseño experimental y análisis estadístico

Los ensayos se realizaron con un diseño completamente aleatorizado. Para el procesamiento estadístico se comprobó la normalidad y homogeneidad de las varianzas (pruebas de Cochran C, Hartley y Bartlett), y se realizaron Análisis de Varianza. Las medias se compararon mediante Pruebas de Rangos Múltiples de Duncan (5 % de probabilidad de error). Se utilizó el programa STATGRAPHICS *Plus* versión 5.0 (15).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aislamiento de bacilos esporulados asociados a cultivares cubanos de trigo

De las muestras de suelo rizosférico y del interior de las plantas de los cultivares cubanos de trigo 'Cuba C-204', 'I 399' y 'M04' se aislaron 21 bacterias bacilos esporulados Gram positivos. De ellas, seis procedieron de la rizosfera y 15 fueron endófitas y se distribuyeron en siete aislados de cada cultivar, los cuales fueron seleccionados para el desarrollo de la investigación.

Aunque el agar nutriente es un medio de cultivo rico diseñado para el trabajo con bacterias en general, el calentamiento de la muestra limita la presencia de microorganismos que carezcan de estructuras de resistencia como las endosporas y favorece la selección de representantes de la clase Bacilli (16). En otros estudios realizados en trigo con los cultivares 'Cuba C-204' e 'I 399' también se aislaron bacilos Gram positivos esporulados clasificados como representantes de la clase Bacilli (17,18), elemento que indica que es posible encontrar este tipo de microorganismos asociados a cultivares cubanos de la especie vegetal.

Caracterización de la actividad antagonista de los aislados seleccionados

La mayoría de los bacilos procedentes desde las muestras relacionadas con los cultivares cubanos de trigo liberaron enzimas líticas, aunque se debe destacar la respuesta de los aislados CTr2-1, CTr3.1, T14 provenientes del cultivar 'Cuba C-204' y de los aislados MH1.1, MT2, MT3, MR3.1, MTr2.1, asociados al cultivar 'M04', quienes mostraron resultados favorables para tres de las enzimas evaluadas y en particular, de las bacterias codificadas como ITr2 e IH3.1, aisladas desde el cultivar 'I 399', que liberaron todas las enzimas (Tabla 2).

La producción de enzimas líticas es un elemento que se refiere en otras investigaciones para bacilos esporulados Gram positivos, definidos como representantes de la clase Bacilli. Por ejemplo, se ha demostrado para cepas de este grupo la capacidad de liberar enzimas glucanasas, proteasas y amilasas (19). Se debe destacar, que este tipo de compuestos tiene una acción importante sobre las paredes de los hongos, ya que provoca su debilitamiento o lisis, lo que afecta el crecimiento de los patógenos (20). Es por ello, que se considera como uno de los mecanismos de biocontrol que presentan las bacterias promotoras del crecimiento

vegetal. En este sentido, los resultados alcanzados en la investigación brindan elementos de interés para futuros trabajos de obtención de nuevos bioproductos donde se favorezca la presencia de enzimas con el objetivo de garantizar una mayor efectividad en el control del crecimiento de patógenos fúngicos.

Al enfrentar los aislados ante *Fusarium* sp. *Curvularia* sp. *Bipolaris* sp y *Alternaria* sp., se comprobó que 13 de las 21 bacterias tenían algún efecto sobre el crecimiento

de los hongos, aunque solamente dos de ellas alcanzaron resultados positivos sobre tres patógenos (MT3 y MTr2.1), y solo una (MH2) frente a cuatro de estos. Fue relevante la acción de las bacterias en presencia de la cepa 3579 de *Curvularia* sp., pues 11 aislados influyeron sobre el hongo (Tabla 3).

Aun cuando las bacterias mostraran efecto antagonista, su acción sobre los hongos fitopatógenos presentó diferencias (Tabla 4).

Tabla 2. Producción de enzimas líticas por parte de bacilos Gram positivos procedentes del suelo rizosférico o el interior de plantas de cultivares cubanos de trigo (*Triticum aestivum* L.)

Cultivar	Aislado	Liberación de enzimas líticas (Halo en mm)			
		Amilasas	Proteasas	Lipasas	Glucanasas
'Cuba C-204'	CH2.1	36,25	-	-	-
	CR1	-	-	-	-
	CTr1	26,25	-	-	-
	CTr1.1	-	21,00	21,00	-
	CTr2.1	22,25	20,75	20,75	-
	CTr3.1	21,25	22,50	22,50	-
	T14	13,00	-	25,67	2,80
'M04'	MH1.1	3,50	-	11,25	3,25
	MH 2	-	22,25	-	6,00
	MH2.1	-	21,25	-	4,75
	MT2	4,25	-	9,00	2,00
	MT3	3,75	-	11,50	5,00
	MR3.1	3,00	-	25,65	3,75
	MTr2.1	8,50	-	20,50	4,75
'I 399'	IH2	12,50	-	15,75	-
	IH3.1	21,0	32,25	23,50	6,50
	IT1	-	11,50	-	4,75
	IR3	-	-	9,75	-
	ITr2	25,00	34,00	34,75	5,00
	T15	-	-	6,00	2,50
	T16	-	-	20,67	2,50

Tabla 3. Acción antagonista de aislados de la clase Bacilli procedentes del suelo rizosférico o el interior de plantas de cultivares cubanos de trigo (*Triticum aestivum* L.) frente a cinco patógenos fúngicos

Cultivar	Aislados	Patógeno				
		<i>Fusarium</i> sp.	<i>Curvularia</i> sp. (cepa 3579)	<i>Curvularia</i> sp. (cepa 3388)	<i>Bipolaris</i> sp.	<i>Alternaria</i> sp.
Cuba C-204	CH2.1	-	+	-	-	-
	CR1	-	+	-	+	-
	CTr1	+	-	-	-	-
	CTr1.1; CTr2.1	+	+	-	-	-
	CTr3.1	-	-	-	-	-
	T14	-	+	-	-	+
M04	MH1.1, MT2, MR3.1	-	-	-	-	-
	MH2	-	+	+	+	+
	MH2.1	-	+	+	-	-
	MT3	-	+	+	+	-
	MTr2.1	-	+	+	+	-
I 399	H2, IH3.1, IT1, T16	-	-	-	-	-
	IR3	-	-	-	-	+
	ITr2	-	+	-	-	+
	T15	-	+	-	-	-

Se puede apreciar en la [Tabla 4](#) como el aislado CTr2.1 se destacó frente a *Fusarium* sp., mientras que los valores del porcentaje de inhibición para el aislado MT3 fueron altamente significativos en comparación con los otros 10 microorganismos que afectaron a *Curvularia* sp. (cepa 3579). Para la otra cepa de este género utilizada en la investigación (3388), la mayor respuesta de control se obtuvo con los aislados MTr2.1 y MT3. Este último microorganismo además se destacó frente a *Bipolaris* sp junto con el aislado MH2. Para *Alternaria* sp., las cuatro bacterias evaluadas presentaron resultados semejantes. Estas diferencias podrían estar asociadas tanto al patógeno como a la bacteria y la especificidad de los metabolitos que produce con respecto a la especie fúngica presente en la interacción, ya que se apreciaron incluso para hongos pertenecientes al mismo género.

Fusarium agrupa diferentes especies que causan daños a distintos cultivos. Este grupo se incluye dentro de los patógenos que afectan al trigo provocando fusariosis de la

espiga, una de las enfermedades fúngicas más importantes para los cereales a nivel mundial (21), aunque también puede afectar a las semillas (4). Por su parte, el género *Curvularia* sp., provoca daños en cultivos como el trigo (2) y el arroz (*Oryza sativa* L.), donde produce manchas foliares y pudriciones de la raíz (22).

Bipolaris y *Alternaria* se incluyen dentro de los patógenos identificados en semillas de trigo, aunque se conoce que pueden afectar los demás órganos de la planta (2,4). *Bipolaris sorokiniana* es un hongo de relevancia para esta especie vegetal (23), que causa pudrición de la raíz, tizón de la hoja, tizón de la plántula y mancha borrosa y generar una reducción de hasta un 85 % del rendimiento en cereales (24). En muestras con síntomas de la mancha borrosa se detectó también la presencia de *A. alternata*, especie que incluso se catalogó como potenciador del daño (23).

Los géneros *Fusarium* y *Alternaria* además producen micotoxinas (1), metabolitos secundarios que pueden causar serias enfermedades a animales y al ser humano (4).

Tabla 4. Inhibición del crecimiento de patógenos fúngicos por parte de bacterias asociadas a tres cultivares cubanos de trigo (*Triticum aestivum* L.)

Patógeno	Aislado	Inhibición micelial (%)
Fusarium sp.	CTr1	37,58 b
	CTr1.1	25,55 c
	CTr2.1	58,87 a
Curvularia sp. (cepa 3579)	ESx: 1,2398	
	CH2.1	44,79 bc
	CR1	39,23 de
	CTr1.1	44,79 bc
	CTr2.1	32,57 f
	T14	35,16 ef
	MH2	47,39 bc
	MH2.1	32,94 f
	MT3	52,95 a
	MTr2.1	35,16 ef
	ITr2	41,83 cd
	T15	34,42 ef
Curvularia sp. (cepa 3388)	ESx: 1,7291	
	MH2	29,26 b
	MH2.1	31,48 b
	MT3	35,18 ab
	MTr2.1	39,63 a
Bipolaris sp.	ESx: 2,1583	
	MH2	51,06 ab
	CR1	47,19 bc
	MT3	53,86 a
	MTr2.1	45,53 c
Alternaria sp.	ESx: 1,4639	
	T14	76,67
	MH2	75,23
	IR3	73,09
	ITr2	73,09
	ESx: 1,3567 ns	

Medias con letras distintas difieren estadísticamente para cada hongo, según ANOVA con Prueba de Rangos Múltiples de Duncan (5 % de probabilidad de error)

Por tal razón, su control tiene un valor agregado. Por ejemplo, *F. chlamydosporum* libera moniliformina, una de las toxinas principales descritas para este género fúngico, mientras que *F. graminearum* y *F. culmorum* producen zearalenona, considerada un compuesto carcinogénico. Para *Alternaria*, por su parte, una de las toxinas más destacadas es el alternariol (1). Estas referencias ilustran la importancia de establecer estrategias de control para estos géneros fúngicos, donde el uso de medios biológicos tiene gran atractivo por su menor residualidad respecto a compuestos de síntesis química (5).

Se debe destacar que las bacterias que alcanzaron los resultados más relevantes en cuanto a actividad antifúngica no fueron las más destacadas en la producción de enzimas líticas, ni en el halo de hidrólisis ni en la diversidad de compuestos liberados. En este sentido, existen otros mecanismos descritos para géneros de la clase Bacilli que están involucrados en su acción como biocontrol. Dentro de estos se encuentran la liberación de péptidos de síntesis no ribosomal (NRPs) y policétidos (PKs) que tienen acción antimicrobiana, la producción de hormonas, la capacidad de colonización, la formación de biopelículas y la competencia por espacio y nutrientes, la síntesis de acil homoserin lactonas (AHSL), la producción de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y la inducción de resistencia sistémica (ISR) (25). En estos aspectos se deberá profundizar en estudios posteriores.

Los péptidos de síntesis no ribosomal producidos por especies de *Bacillus* como las iturinas, fenacinas, entre otros, han mostrado acción antibacteriana y antifúngica, con efectividad frente a *Fusarium*, *Alternaria*, *Sclerotium*, *Cercospora* y *Colletotrichum*. Cepas de *B. siamensis* presentaron actividad frente a *F. oxysporum formae speciales* (fsp) *cubense* (FOCTR4) (26), elemento que se asoció con la producción de una gran variedad de sideróforos por parte de la bacteria (27). Por otra parte, se demostró la acción de cepas de *Bacillus* sobre *C. tuberculata*, con valores de porcentaje de inhibición micelial cercanos al 30 % (28), similar a los alcanzados en el presente estudio para los cuatro aislados seleccionados. Estos autores, relacionaron el efecto inhibitorio con la producción de metabolitos volátiles y difusibles por parte de las bacterias.

Otros estudios destacaron el potencial de *Bacillus* para el control de *Bipolaris sorokiniana*, con un alto porcentaje de inhibición para el hongo en condiciones *in vitro*, así como la presencia en esta bacteria de genes asociados a la actividad antagonista relacionados con la producción de antibióticos, sideróforos, entre otras sustancias (24). También se refiere la acción de *B. subtilis* frente a *Alternaria*, con resultados *in vitro* superiores a los alcanzados por plaguicidas comerciales (29).

Además de los hongos incluidos en el estudio, géneros como *Cladosporium* y *Corynespora* también han sido afectados por cepas pertenecientes a la clase Bacilli (19), lo que demuestra su gran potencial para el control de patógenos fúngicos de alta incidencia en diferentes especies vegetales. Algunas de las sustancias anteriormente referidas podrían haber sido liberadas por los aislados seleccionados en la investigación, lo que explicaría su acción superior con respecto a otros que se destacaron en la producción de enzimas líticas. Diferencias en la concentración de estos metabolitos y su diversidad pueden provocar los distintos resultados alcanzados para cada uno de ellos.

La Tabla 5 resume los principales daños que las bacterias ocasionaron a los patógenos. Nótese que en algunos casos la detención del crecimiento del hongo estuvo asociada a elementos como el enrollamiento del micelio y la producción de abundantes conidios, lo cual podría constituir un criterio de selección con el objetivo de potenciar la acción biocontrol de un producto elaborado a partir de estas bacterias.

Otras investigaciones también comentan el daño que causan especies de *Bacillus* en la germinación de los conidios, la extensión y morfología del tubo germinativo, la membrana plasmática de los conidios y las hifas, lo cual conduce a la muerte de hongos fitopatógenos como *Botrytis cinerea* (30). Destacan igualmente, el papel de compuestos liberados por especies de *Bacillus*, en particular las fengicinas, en la modificación de la permeabilidad de las membranas de patógenos fúngicos donde se incluye la especie *F. graminearum* (31).

En otros estudios géneros incluidos en la clase Bacilli han mostrado tanto mecanismos indirectos como mecanismos directos de estimulación del crecimiento vegetal. Se ha destacado su potencial para fijar nitrógeno y solubilizar

Tabla 5. Daños provocados por bacilos Gram positivos esporulados asociados a cultivares cubanos de trigo (*Triticum aestivum* L.) a diferentes patógenos fúngicos

Daño	Patógenos afectados
Marcada línea de detención del crecimiento del hongo. No hay contacto hongo-bacteria. En el borde del crecimiento del hongo se produce enrollamiento del micelio y abundantes conidios	<i>Bipolaris</i> sp.
Marcada línea de detención del crecimiento del hongo. No hay contacto hongo-bacteria. No se observa enrollamiento del micelio pero si hay producción de conidios	<i>Curvularia</i> sp (cepa 3579), <i>Bipolaris</i> sp., <i>Alternaria</i> sp.
Marcada afectación del crecimiento del hongo	<i>Fusarium</i> sp, <i>Curvularia</i> sp (cepa 3579)
La bacteria crece encima del hongo y provoca lisis celular del micelio	<i>Curvularia</i> sp (cepa 3579)
El hongo y la bacteria interactúan. El hongo se debilita en la zona de contacto. Hay producción abundante de conidios	<i>Fusarium</i> sp., <i>Bipolaris</i> sp.
El hongo y la bacteria interactúan. El hongo se debilita en la zona de contacto. No hay formación de conidios	<i>Curvularia</i> sp.
No se observa afectación en el hongo. Este no interactúa con la bacteria.	<i>Bipolaris</i> sp.

fosfato de calcio, hierro y aluminio, con índices de solubilización entre 1,30 y 2,59 (19), valores que incluso pueden ser mayores, según los resultados de otros trabajos (32). A ello se une la ventaja desde el punto de vista tecnológico que tiene este grupo de bacterias por su versatilidad metabólica, presentar estructuras que le confieren resistencia ante condiciones de estrés, lo que les permitiría una mayor viabilidad en el suelo una vez que sean aplicados (14,33).

Considerando los elementos anteriormente mencionados, es un resultado promisorio demostrar que los microorganismos en estudio asociados al cultivo del trigo, posean características favorables para el control biológico, ya que estas podrían permitir contrarrestar el ataque de patógenos y estimular el crecimiento de la especie vegetal mediante la aplicación de bioproductos con un efecto integral sobre la especie vegetal (19).

De los aislados bacterianos se destacaron de manera particular el MTr2.1, el MT3 y el CTr2.1 por su acción significativa frente a los patógenos y el MH2, único que mostró actividad frente a cuatro de las cinco especies fúngicas. Estas bacterias son promisorias para futuros trabajos donde se valore su potencial como principios activos de nuevos controles biológicos para el cultivo del trigo en Cuba.

CONCLUSIONES

Asociadas a plantas de los cultivares cubanos de trigo 'Cuba C-204', 'I 399' y 'M04' se pueden encontrar bacterias con potencial para el control de hongos fitopatógenos que afectan esta especie vegetal. En especial los aislados MH2, MTr2.1, MT3 y CTr2.1, seleccionados por su efecto antagonista frente a *Fusarium* sp., *Curvularia* sp., *Bipolaris* sp y *Alternaria* sp., se consideran promisorios para la formulación de bioproductos destinados al manejo de estos patógenos en Cuba.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto "Lucha biológica en trigo: identificación de nuevos microorganismos benéficos en interacción con diferentes cultivares (PS223MY003-124)", del Programa Sectorial de Ciencia, Tecnología e Innovación "Salud Animal y Vegetal", por el soporte financiero para la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Deligeorgakis C, Magro C, Skendi A, Gebrehiwot HH, Valdramidis V, Papageorgiou M. Fungal and toxin contaminants in cereal grains and flours: systematic review and meta-Analysis. *Foods*. 2023 Dec;12(23):4328. Available from: <https://doi.org/10.3390/foods12234328>.
- Błaszczak L, Salamon S, Mikołajczak K. Fungi inhabiting the wheat endosphere pathogens. 2021 Oct;10(10):1288. Available from: <https://doi.org/10.3390/pathogens10101288>.
- Patiño-Moscote MA, Osorio-Guerrero KV, Flórez-Gómez DL, Sarmiento-Moreno LF, Vargas-Ramírez DN. Identificación molecular y prevalencia de contaminantes fúngicos en semillas de cultivos semestrales. *Scientia Agropecuaria*. 2023 Jul-Sept;14(3):347- 358. Available from: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.030>.
- Martín I, Gálvez L, Guasch L, Palmero D. Fungal pathogens and seed storage in the dry state. *Plants*. 2022 Nov;11(22):3167. Available from: <https://doi.org/10.3390/plants11223167>.
- Pandit MA, Kumar J, Gulati S, Bhandari N, Mehta P, Katyal R, et al. Major biological control strategies for plant pathogens. *Pathogens*. 2022 Feb;11(2):273. Available from: <https://doi.org/10.3390/pathogens11020273>.
- Calefi GG, Silva NBS, Alhatlani BY, Abdallah EM, Martins CHG. Harnessing nature's arsenal: sustainable plant-based strategies for phytopathogen control. *Front. Microbiol*. 2025 Feb 4;16:1588462. Available from: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1588462>.
- Casanovas Cosío E, Suárez del Villar Labastida A, Álvarez Sánchez A, Avileira Cruz I. Valoración de la seguridad alimentaria cubana a partir de la superficie agrícola explotada y los rendimientos agrícolas. *Rev Univ Soc*. 2022 Sep-Oct;14(5):304-14. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S2218-36202022000500304&lng=es
- Kumari E, Kumari S, Das SS, Mahapatra M, Sahoo JP. Plant growth-promoting bacteria (PGPB) for sustainable agriculture: current prospective and future challenges. *AgroEnvironmental Sustainability*. 2023 Jun;1(3):274-285. Available from: <https://doi.org/10.59983/s2023010309>.
- Wei X, Xie B, Wan C, Song R, Zhong W, Xin S, et al. Enhancing soil health and plant growth through microbial fertilizers: mechanisms, benefits, and sustainable agricultural practices. *Agronomy*. 2024 Mar;14(3):609. Available from: <https://doi.org/10.3390/agronomy14030609>.
- Clasificación de los suelos de Cuba. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas e Instituto de Suelos. Mayabeque, Cuba: Ediciones INCA: 2015, 91p. Available from: <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/index>
- Paneque PVM, Calaña NJM, Calderón VM, Borges BY, Hernández GTC, Caruncho CM. Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos. La Habana, Cuba: Ediciones INCA; 2010. 157 p. Available from: <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/index>
- Madigan MT, Bender KS, Buckley DH, Sattley WM, Stahl DA. Brock biology of microorganisms. 15th ed. New York. Pearson; 2018. 1058 p. Available from: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292235196_A31976983/preview-9781292235196_A31976983.pdf
- Herrera A. Manual de medios de cultivo. Editorial Científico Técnica; 1985. 87 p. Available from: <https://biblioteca.casa-delacultura.gob.ec/bib/57747>

14. Vera Loor M, Bernal A, Vera D, Leiva M, Rivero A, Agustín A. Antagonismo in vitro de bacterias endófitas formadoras de endosporas frente a *Moniliophthora roreri* H.C Evans. Revista de Protección Vegetal. 2020;35(2). 8 p. Available from: <http://scie-lo.sld.cu/pdf/rpv/v35n2/2224-4697-rpv-35-02-e04.pdf>.
15. STATGRAPHICS Plus version 5.0 [software]. Herndon, VA: Statgraphics Technologies, Inc.; 2000.
16. Rodríguez-Hernández MG, Gallegos-Robles MÁ, Rodríguez-Sifuentes L, Fortis-Hernández M, Luna-Ortega JG, González-Salas U. Cepas nativas de *Bacillus* spp. como una alternativa sostenible en el rendimiento de forraje de maíz. Terra Latinoamericana. 2020;38(2):313-21. Available from: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.690>.
17. Ríos Y, García M, Sánchez J, Álvarez B. Potencialidades de la diversidad bacteriana asociada al trigo (*Triticum aestivum* L.) para estimular su crecimiento. Agrisost. 2022;28:1-10. Available from: <https://revistas.reduc.edu.cu/index.php/agrisost/article/view/4045>.
18. Govin-Sanjudo A, Rojas Badia MM, Jacquard C, Esmaeel Q. Exploring *Fusarium* Biocontrol, drought Tolerance, and plant growth promotion by *Bacillus* strains from Cuban wheat varieties. Biological Control. 2025 Jan;205:105776. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2025.105776>.
19. Rojas-Badía MM, Heydrich-Pérez M, Sánchez-Castro D, Tejera-Hernández B, Ríos-Rocafull Y, Lugo-Moya D. Bacterias del género *Bacillus* con potencialidades para la sostenibilidad agrícola en Cuba. Anales de la Academia de Ciencias de Cuba. 2022;12(1). Available from: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1067>.
20. Blanco EL, Castro Y. Antagonismo de rizobacterias sobre hongos fitopatógenos, y su actividad microbiana en el potencial biofertilizante, bioestimulante y biocontrolador. Revista Colombiana de Biotecnología. 2021 Jan-Jun;23(1):6-16. Available from: <http://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v23n1.84808>.
21. Xue AG, Chen Y, Seifert K, Guo W, Blackwell BA, Harris LJ, et al. Prevalence of *Fusarium* spp. causing head blight of spring wheat, barley, and oat in Ontario during 2001-2017. an J Plant Pathol. 2022;44(3):392-402. Available from: <https://doi.org/10.1080/07060661.2022.2087104>.
22. Sandoval-Martínez ME, Osnaya-González M, Soto-Rojas L, Nava-Díaz C. Hongos asociados al manchado del grano del arroz: una revisión. Rev Fitotec Mex. 2022;45(4):509-517. Available from: <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.4.509>.
23. Mata-Santoyo CI, Leyva-Mir SG, Camacho-Tapia M, Tovar-Pedraza JM, Huerta-Espino J, Villaseñor-Mir HE, García-León E. Aggressiveness of *Bipolaris sorokiniana* and *Alternaria alternata* isolates on wheat cultivars in Mexico. Rev Mex Fitopatol. 2018;36(3):432-43. Available from: <http://dx.doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1803-3>.
24. Valenzuela-Ruiz V, Parra-Cota FI, Santoyo G, de los Santos-Villalobos S. Potential biocontrol mechanisms of *Bacillus* sp. TSO2 against *Bipolaris sorokiniana*, spot blotch in wheat. ev Mex Fitopatol. 2022;40(2):230-9. Available from: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2201-1>.
25. Pedraza LA, López CA, Uribe-Vélez D. Mecanismos de acción de *Bacillus* spp. (Bacillaceae) contra microorganismos fitopatógenos durante su interacción con plantas. Acta Biol Colomb. 2020 Jan-Apr;25(1):112-25. Available from: <https://doi.org/10.1546/abc.v25n1.75045>.
26. Kulkova I, Dobrzyński J, Kowalczyk P, Bełżeczki G, Kramkowski K. Plant Growth Promotion Using *Bacillus cereus*. Int J Mol Sci. 2023 Jun;24(11):9759. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijms24119759>.
27. Shen N, Li S, Li SY, Zhang H, Jiang M. The siderophore-producing bacterium, *Bacillus siamensis* Gxun-6, has an antifungal activity against *Fusarium oxysporum* and promotes the growth of banana. gypt J Biol Pest Control. 2022;32(1):34. Available from: <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00533-7>.
28. Toledo-Hernández E, Peña-Chora G, Toribio-Jiménez J, Romero-Ramírez Y, Bolaños-Dircio A, Velázquez-del Valle MG, Hernández-Lauzardo AN, León-Rodríguez R, Silvana Vero S. Isolated rhizobacteria of *Jatropha curcas* L.: antagonistic activity of phytopathogens and plant growth promoter. Rev Chapingo Ser Cienc For Ambient. 2021;27(2):181-98. Available from: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.04.029>.
29. Zárate-Ramos A, Quero-Carrillo AR, Miranda-Jiménez L, Nava-Díaz C, Robles-Yerena L. Fungicides and *Bacillus subtilis* against fungi isolated from commercial seed of side oats grama (*Bouteloua curtipendula*). Rev Mex Fitopatol. 2022;40(1):103-15. Available from: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2104-4>.
30. Orozco-Mosqueda MdC, Kumar A, Fadji AE, Babalola OO, Puopolo G, Santoyo G. Agroecological management of the grey mould fungus *Botrytis cinerea* by plant growth-promoting Bacteria. Plants. 2023 Jan;12:637. Available from: <https://doi.org/10.3390/plants12030637>.
31. Ali MA, Ahmed T, Ibrahim E, Rizwan M, Chong KP, Yong JWH. A review on mechanisms and prospects of endophytic bacteria in biocontrol of plant pathogenic fungi and their plant growth-promoting activities. Heliyon. 2024 Feb 29;10(4):e31573. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31573>.
32. Mejía-Bautista MÁ, Cristóbal-Alejo J, Pacheco-Aguilar JR, Reyes-Ramírez A. *Bacillus* spp. en el crecimiento y rendimiento de *Capsicum chinense* Jacq. Rev Mex Cienc Agríc. 2022 Jan;13(1):115-26. Available from: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2842>.
33. Tsoetsi T, Nephali L, Malebe M, Tugizimana, F. *Bacillus* for Plant Growth Promotion and stress resilience: what have we learned?. Plants. 2022 sep;11(19):2482. Available from: <https://doi.org/10.3390/plants11192482>.