

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 1 de 30

21.1

FECHA	martes, 20 de junio de 2023
--------------	-----------------------------

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Ciudad

UNIDAD REGIONAL	Sede Fusagasugá
TIPO DE DOCUMENTO	Trabajo De Grado
FACULTAD	Ciencias Agropecuarias
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Agronómica

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
Vásquez Basto	Valeria	1000686213
Hurtado Sandoval	Andres Felipe	1069763778

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
Lizarazo Hernández	Karol
Gracia Rojas	Pilar

TÍTULO DEL DOCUMENTO

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
 Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 2 de 30

Control biológico de la marchitez del banano (*Musa x paradisiaca* L.) causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense utilizando bacterias del género *Pseudomonas* como una alternativa agrosostenible.

SUBTÍTULO
(Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

EXCLUSIVO PARA PUBLICACIÓN DESDE LA DIRECCIÓN INVESTIGACIÓN	
INDICADORES	NÚMERO
ISBN	
ISSN	
ISMN	

AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO	NÚMERO DE PÁGINAS
2023	17

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)	
ESPAÑOL	INGLÉS
1. Antagonistas	Antagonists
2. Bacterias benéficas	Beneficial bacteria
3. Biocontrol	Biocontrol
4. Fitopatógenos	Phytopathogens
5.	

FUENTES (Todas las fuentes de su trabajo, en orden alfabético)

Abo-Zaid GA, Soliman NAM, Abdullah AS, El-Sharouny EE, Matar SM, Sabry SAF. Maximization of Siderophores Production from Biocontrol Agents, *Pseudomonas aeruginosa* F2 and *Pseudomonas fluorescens* JY3 Using Batch and Exponential Fed-Batch Fermentation. Processes. 2020 Apr 12;8(4):455.

Aguado–Santacruz G, Moreno–Gómez B, Jiménez–Francisco B, García–Moya E, Preciado–Ortiz R. Impacto de los sideróforos microbianos y fitosidéforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis. Revista fitotecnia mexicana. 2022;35(1).

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 3 de 30

Akila R, Rajendran L, Harish S, Saveetha K, Raguchander T, Samiyappan R. Combined application of botanical formulations and biocontrol agents for the management of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense (*Foc*) causing *Fusarium* wilt in banana. *Biological Control*. 2011 Jun;57(3):175–83.

Arias Aguirre AR. Medidas de prevención en el manejo de la enfermedad del mal de panamá (*Fusarium oxysporum* R4T) en el cultivo de banano. [Babahoyo]: Universidad Técnica de Babahoyo; 2021.

Bubici G, Kaushal M, Prigigallo MI, Cabanás CGL, Mercado-Blanco J. Biological control agents against *Fusarium* wilt of banana. Vol. 10, *Frontiers in Microbiology*. 2019.

Chaudhari B.L., Patil S.N., Paradeshi J.S., Chaudhari M.A. & Chaudhari C.S. Premier Biocontrol Traits of Pseudomonads: Siderophores, Phenazines or What Else? *Microorganisms for Sustainability*. 2017.

Ch'ng YR, Yong CSY, Othman SN, Mohd Zainudin NAI, Mustafa M. Isolation and Molecular Identification of a Siderophore Producing Bacterium and its Antagonistic Effect against *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Tropical Race 4. *Pertanika J Trop Agric Sci*. 2022 Jan 24;45(1):187–206.

Dirección del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria (CNRF). Ficha técnica *Fusarium* spp. (Hypocreales: Nectriaceae) Podredumbre de raíces. 2020.

Durairaj K, Velmurugan P, Park JH, Chang WS, Park YJ, Senthilkumar P, *et al.* Potential for plant biocontrol activity of isolated *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus stratosphericus* strains against bacterial pathogens acting through both induced plant resistance and direct antagonism. *FEMS Microbiol Lett*. 2017 Dec 15;364(23).

Eljounaidi K, Lee SK, Bae H. Bacterial endophytes as potential biocontrol agents of vascular wilt diseases – Review and future prospects. *Biological Control*. 2016 Dec;103:62–8.

Espinoza Ahumada CA, Gallegos Morales G, Hernández Castillo FD, Ochoa Fuentes YM, Cepeda Siller M, Castillo Reyes F. Antagonistas microbianos a *Fusarium* spp., como agente causal de pudrición de raíces y tallo en melón. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 2019;6(16).

Finagro. Ficha de inteligencia - Banano tipo exportación. Finagro. 2018.

García-Velasco R, Portal-González N, Santos-Bermúdez R, Rodríguez-García A, Companioni-González B. Genetic improvement for resistance to *Fusarium* wilt in banana. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*. 2020 Dec 28;39(1).

Gamez R, Cardinale M, Montes M, Ramirez S, Schnell S, Rodriguez F. Screening, plant growth promotion and root colonization pattern of two rhizobacteria (*Pseudomonas fluorescens* Ps006 and *Bacillus amyloliquefaciens* Bs006) on banana cv. Williams (*Musa acuminata* Colla). *Microbiol Res*. 2019 Mar;220:12–20.

Gómez-Lama Cabanás C, Wentzien NM, Zorrilla-Fontanesi Y, Valverde-Corredor A, Fernández-González AJ, Fernández-López M, *et al.* Impacts of the Biocontrol Strain

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 4 de 30

Pseudomonas simiae PICF7 on the Banana Holobiont: Alteration of Root Microbial Co-occurrence Networks and Effect on Host Defense Responses. *Front Microbiol.* 2022 Feb 15;13.

Ghorbanpour M, Omidvari M, Abbaszadeh-Dahaji P, Omidvar R, Kariman K. Mechanisms underlying the protective effects of beneficial fungi against plant diseases. *Biological Control.* 2018 Feb;117:147–57.

Instituto Colombiano Agropecuario- ICA. ICA amplía y refuerza las medidas, que ya venía implementando, para atender la presencia de *Fusarium* R4T en cultivos de banano en La Guajira. 2019.

Jequé S, Patel P, Patel S, Nikam S, Rane T, Sayyed R. Production of biocontrol traits by banana field fluorescent *Pseudomonads* and comparison with chemical fungicide. 2014.

Köberl M, Dita M, Martinuz A, Staver C, Berg G. Members of Gammaproteobacteria as indicator species of healthy banana plants on *Fusarium* wilt-infested fields in Central America. *Sci Rep.* 2017;7.

Köhl J, Kolnaar R, Ravensberg WJ. Mode of Action of Microbial Biological Control Agents Against Plant Diseases: Relevance Beyond Efficacy. *Front Plant Sci.* 2019 Jul 19;10.

Li S, Ma J, Li S, Chen F, Song C, Zhang H, *et al.* Comparative Transcriptome Analysis Unravels the Response Mechanisms of *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense to a Biocontrol Agent, *Pseudomonas aeruginosa* Gxun-2. *Int J Mol Sci.* 2022 Dec 6;23(23):15432.

Li C, Yang J, Li W, Sun J, Peng M. Direct Root Penetration and Rhizome Vascular Colonization by *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense are the Key Steps in the Successful Infection of Brazil Cavendish. *Plant Dis.* 2017 Dec;101(12):2073–8.

Lv N, Tao C, Ou Y, Wang J, Deng X, Liu H, *et al.* Root-Associated Antagonistic *Pseudomonas* spp. Contribute to Soil Suppressiveness against Banana *Fusarium* Wilt Disease of Banana. *Microbiol Spectr.* 2023 Apr 13;11(2).

Mahachai P, Meesungnoen O, Wattanachaiyingcharoen W, Subsoontorn P. Bacterial biocontrol against *Fusarium* wilt in Pisang Awak (Namwa) Banana. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology.* 2023;28.

Martinez- Guarnizo JC. Modelamiento de la red metabólica de *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 para la síntesis biológica de Fenazina-1-carboxilato.2019.

Martínez-Solórzano GE, Rey-Brina JC, Pargas-Pichardo RE, Manzanilla EE. Marchitez por *Fusarium* raza tropical 4: Estado actual y presencia en el continente americano. *Agronomía Mesoamericana.* 2019 Dec 11;259–76.

Mansoori M, Heydari A, Hassanzadeh N, Rezaee S, Naraghi L. Evaluation of *Pseudomonas* and *Bacillus* bacterial antagonists for biological control of cotton verticillium wilt disease. *J Plant Prot Res.* 2013;53(2).

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 5 de 30

Maulidah NI, Tseng TS, Chen GH, Hsieh HY, Chang SF, Chuang H wen. Transcriptome analysis revealed cellular pathways associated with abiotic stress tolerance and disease resistance induced by *Pseudomonas aeruginosa* in banana plants. *Plant Gene*. 2021 Sep;27:100321.

Molina AB, Fabregar E, Sinohin VG, Yi G, Viljoen A. Recent occurrence of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 in Asia. *Acta Horti*. 2009 May;(828):109–16.

Mon YY, Bidabadi SS, Oo KS, Zheng SJ. The antagonistic mechanism of rhizosphere microbes and endophytes on the interaction between banana and *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. *Physiol Mol Plant Pathol*. 2021 Dec;116:101733.

Motta Escobar S, Salazar Cabezas LD, Sánchez Leal LC. Perspectiva del uso de *Pseudomonas* spp. como biocontrol de fitopatógenos en cultivos de hortalizas en Colombia: una revisión sistemática. *Revista Mutis*. 2022 Mar 29;12(2).

Nayak D, Mishra M, Pradhan B, Sharma K. Evaluation of some bio-control agents in in vitro control of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense, an incitant of banana panama wilt. *J Pharmacogn Phytochem*. 2020;9(3):751–3.

Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA). Análisis de riesgo de plagas *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense raza 4 Tropical (*FocR4T*), como plaga cuarentenaria para la región del OIRSA. San Salvador; 2019.

Párraga C, Espinel R. Análisis de la actividad agrícola como contaminante del agua, alternativas tecnológicas para la desinfección del agua para consumo humano en comunidades rurales y recursos legislativos para la prevención y su conservación. [Guayaquil]: Escuela Superior Politécnica del Litoral; 2010.

Patel R, Mehta K, Prajapati J, Shukla A, Parmar P, Goswami D, *et al*. An anecdote of mechanics for *Fusarium* biocontrol by plant growth promoting microbes. Vol. 174, *Biological Control*. 2022.

Pegg KG, Coates LM, O'Neill WT, Turner DW. The Epidemiology of *Fusarium* Wilt of Banana. *Front Plant Sci*. 2019 Dec 20;10.

Pérez Álvarez S, Coto Arbelo O, Echemendía Pérez M, Ávila Quezada G. *Pseudomonas fluorescens* Migula, biological control or pathogen?. *Rev. Protección Veg*. 2015;30(3).

Prigigallo MI, Gómez-Lama Cabanás C, Mercado-Blanco J, Bubici G. Designing a synthetic microbial community devoted to biological control: The case study of *Fusarium* wilt of banana. *Front Microbiol*. 2022 Aug 5;13.

Robles M. Evaluación in vitro de la actividad antibacteriana de metabolitos secundarios obtenidos a partir de *Pseudomonas* aislados de suelos mineros de Fresnillo. 2016.

Rodríguez-Romero VM. Producción de metabolitos secundarios de *Pseudomonas fluorescens* y su uso en el control de hongos fitopatógenos. 2014.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 6 de 30

Salas-Marina, MA. Análisis molecular de la interacción microorganismo benéfico-planta en dos patosistemas: *Trichoderma-arabidopsis* y *Trichoderma-tomate*.2010.

Sánchez Carrillo R, Guerra Ramírez P. *Pseudomonas* spp. be néficas en la agricultura. Rev Mex De Cienc Agric. 2022 Jun 21;13(4):715–25.

Saritha B, Panneerselvam P, Ganeshamurthy A. Antagonistic potential of mycorrhiza associated *Pseudomonas putida* against soil borne fungal pathogens. Plant Arch. 2015;15(2):763–8.

Secretaría General de la Comunidad Andina. Guía andina para el diagnóstico de *Fusarium* Raza 4 Tropical (R4T) *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense (syn. *Fusarium odoratissimum*) agente causal de la marchitez por *Fusarium* en musáceas (plátanos y bananos). 2020.

Sekhar AC, Thomas P. Isolation and Identification of Shoot-Tip Associated Endophytic Bacteria from Banana cv. Grand Naine and Testing for Antagonistic Activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense . Plant Sci. 2015;06(07):943–54.

Siamak SB, Zheng S. Banana *Fusarium* Wilt (*Fusarium oxysporum* f. sp. cubense) Control and Resistance, in the Context of Developing Wilt-resistant Bananas Within Sustainable Production Systems. Hortic Plant J. 2018 Sep;4(5):208–18.

Shen Z, Thomashow LS, Ou Y, Tao C, Wang J, Xiong W, *et al.* Shared Core Microbiome and Functionality of Key Taxa Suppressive to Banana *Fusarium* Wilt. Research. 2022 Jan;2022.

Solans M, Scervino JM, Messuti MI, Vobis G, Wall LG. Potential biocontrol actinobacteria: Rhizospheric isolates from the Argentine Pampas lowlands legumes. J Basic Microbiol. 2016 Nov;56(11):1289–98.

Spadaro D, Droby S. Development of biocontrol products for postharvest diseases of fruit: The importance of elucidating the mechanisms of action of yeast antagonists. Trends Food Sci Technol. 2016 Jan;47:39–49.

Tao C, Li R, Xiong W, Shen Z, Liu S, Wang B, *et al.* Bio-organic fertilizers stimulate indigenous soil *Pseudomonas* populations to enhance plant disease suppression. Microbiome. 2020 Dec 22;8(1):137.

Thangavelu R, Gopi M. Field suppression of *Fusarium* wilt in banana using combined application of native endophytic and rhizospheric bacterial isolates possessing multiple functions. Phytopathol Mediterr. 2015 Sep;54:241–252.

Vieira LC da S, Borges CV, Costa SN, Gonçalves ZS, Da Silva Pereira BL, Haddad F. Biocontrol de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense por *Pseudomonas* spp. em banana “Prata anã.” Journal of Biotechnology and Biodiversity. 2022 Mar 1;10(1):084–93.

Villa PM, Frías A, & González, G. Evaluación de cepas de *Pseudomonas* sp para el control de hongos fitopatógenos que surgen cultivos de interés económico. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. 2005. (3),40-44.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 7 de 30

Villa-Martínez A, Pérez-Leal R, Morales-Morales HA, Basurto-Sotelo M, Soto-Parra JM, Martínez-Escudero E. Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. Acta Agron. 2014;64(2).

Vinchira-Villarraga DM, Moreno-Sarmiento N. Control biológico: Camino a la agricultura moderna. Rev Colomb Biotecnol. 2019 Jan 1;21(1):2–5.

Wang B, Li R, Ruan Y, Ou Y, Zhao Y, Shen Q. Pineapple–banana rotation reduced the amount of *Fusarium oxysporum* more than maize–banana rotation mainly through modulating fungal communities. Soil Biol Biochem. 2015 Jul;86:77–86.

Yesu I, Ebenezar E. Biological control of wilt disease of hill banana incited by *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense. J Pharmacogn Phytochem. 2021;10:235–40.

Zapata Henao S. Desarrollo de estrategias de control del fitopatógeno *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense (*Foc*) a partir de la diversidad microbiana. Universidad Nacional de Colombia; 2019.

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS

(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

Fusarium oxysporum f. sp. cubense es un hongo fitopatógeno el cual está asociado a la marchitez vascular en plantas de banano, siendo uno de los patógenos más difíciles de controlar dado a su permanencia en el suelo y rápida propagación. Actualmente, los enfoques convencionales para el control de *Fusarium* incluyen el uso de fungicidas que conducen a la alteración del medio ambiente y la microbiota rizosférica. Por lo tanto y a partir de la necesidad de optar por alternativas sustentables y prometedoras al uso exclusivo de fungicidas, en el presente trabajo se planteó una revisión bibliográfica de varios estudios realizados en todo el mundo con certezas y resultados relevantes sobre la eficacia biológica de *Pseudomonas* para el control de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. en banano (*Musa x paradisiaca* L.); referenciando el estado actual de las investigaciones en el uso de bacterias como controladoras biológicas, reportando la existencia de varias especies de *Pseudomonas* y sus diferentes modos de acción como la producción de antibióticos, resistencia sistémica inducida en la planta y detención de algunos componentes de patogenicidad del hongo, entre otros. Lo cual demuestra su utilidad como agente de biocontrol y la importancia del establecimiento de rizobacterias en protocolos de aplicación sostenibles y estrategias de control integradas.

Fusarium oxysporum f. sp. cubense is a phytopathogenic fungus which is associated with vascular wilt in banana plants, being one of the most difficult pathogens to control given its permanence in the soil and rapid spread. Currently, conventional approaches to *Fusarium* control include the use of fungicides leading to alteration of the environment and rhizospheric microbiota. Therefore, and from the need to opt for sustainable and promising alternatives to use exclusive of fungicides, in the present work a bibliographic review of

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 8 de 30

several studies carried out worldwide with certainties and relevant results on biological efficacy of *Pseudomonas* for the control of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. in banana (*Musa x paradisiaca* L.); referencing the current state of research into the use of bacteria as biological controllers, reporting the existence of several species of *Pseudomonas* and their different modes of action such as antibiotic production, induced systemic resistance in the plant and arrest of some pathogenic components of the fungus, among others. This demonstrates its usefulness as a biocontrol agent and the importance of establishing rhizobacteria in sustainable implementation protocols and integrated control strategies.

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X	
2. La comunicación pública, masiva por cualquier procedimiento o medio físico, electrónico y digital.	X	
3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 9 de 30

derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado.

SI ___ NO X .

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 10 de 30

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos) en carta adjunta, expedida por la entidad respectiva, la cual informa sobre tal situación, lo anterior con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

- a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).
- b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.
- c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.
- d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.
- e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.
- f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 11 de 30

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el “Manual del Repositorio Institucional AAAM003”

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. Nombre completo del proyecto.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. ARTÍCULO DE REVISIÓN- VALERIA VÁSQUEZ Y ANDRES HURTADO.pdf	Pdf
2.	
3.	
4.	

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafo)
--------------------------------------	------------------------------

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 12 de 30

Vásquez Basto Valeria	
Hurtado Sandoval Andres Felipe	

21.1-51-20.

Control biológico de la marchitez del banano (*Musa x paradisiaca* L.) causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense utilizando bacterias del género *Pseudomonas* como una alternativa agrosostenible.

Biological control of banana (*Musa x paradisiaca* L.) wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense using bacteria of the genus *Pseudomonas* as an agro-sustainable alternative.

Valeria Vásquez-Basto ¹, Andres Felipe Hurtado-Sandoval ², Karol Lizarazo Hernández ³, Pilar Rojas-Gracia⁴

Resumen

Fusarium oxysporum f. sp. cubense es un hongo fitopatógeno el cual está asociado a la marchitez vascular en plantas de banano, siendo uno de los patógenos más difíciles de controlar dado a su permanencia en el suelo y rápida propagación. Actualmente, los enfoques convencionales para el control de *Fusarium* incluyen el uso de fungicidas que conducen a la alteración del medio ambiente y la microbiota rizosférica. Por lo tanto y a partir de la necesidad de optar por alternativas sustentables y prometedoras al uso de fungicidas, en el presente trabajo se planteó una revisión bibliográfica de varios estudios realizados en todo el mundo con certezas y resultados relevantes sobre la eficacia biológica de *Pseudomonas* para el control de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. en banano (*Musa x paradisiaca* L.); referenciando el estado actual de las investigaciones en el uso de bacterias como controladoras biológicas, reportando la existencia de varias especies de *Pseudomonas* y sus diferentes modos de acción como la producción de antibióticos, resistencia sistémica inducida en la planta y detención de algunos componentes de patogenicidad del hongo, entre otros. Lo cual demuestra su utilidad como agente de biocontrol y la importancia del establecimiento de rizobacterias en protocolos de aplicación sostenibles y estrategias de control integradas.

Palabras Clave: Antagonistas, bacterias benéficas, biocontrol, fitopatógenos

Abstract

Fusarium oxysporum f. sp. cubense is a phytopathogenic fungus which is associated with vascular wilt in banana plants, being one of the most difficult pathogens to control given its permanence in the soil and rapid spread. Currently, conventional approaches to *Fusarium* control include the use of fungicides leading to alteration of the environment and rhizospheric microbiota. Therefore, and from the need to opt for sustainable and promising alternatives to use of

¹ Estudiante y semillerista SINAT, programa de Ingeniería Agronómica, facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cundinamarca. <https://orcid.org/0000-0001-8152-9691>, vvasquezb@ucundinamarca.edu.co

² Estudiante y semillerista SINAT, programa de Ingeniería Agronómica, facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cundinamarca. <https://orcid.org/0000-0001-5322-9464>, afhurtado@ucundinamarca.edu.co

³ Director, Docente investigador, líder del Grupo de Investigación Agrobiología Tropical - ABT, Ingeniero Agrónomo, programa de Ingeniería Agronómica, Universidad de Cundinamarca. <https://orcid.org/0000-0003-0185-3729>, klizarazo@ucundinamarca.edu.co

⁴ Codirectora, Docente investigadora, Microbióloga Agrícola y Veterinaria, programa de Ingeniería Agronómica, Universidad de Cundinamarca. <https://orcid.org/0000-0002-2960-4129>, projasg@ucundinamarca.edu.co

fungicidas, in the present work a bibliographic review of several studies carried out worldwide with certainties and relevant results on biological efficacy of *Pseudomonas* for the control of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. in banana (*Musa x paradisiaca* L.); referencing the current state of research into the use of bacteria as biological controllers, reporting the existence of several species of *Pseudomonas* and their different modes of action such as antibiotic production, induced systemic resistance in the plant and arrest of some pathogenic components of the fungus, among others. This demonstrates its usefulness as a biocontrol agent and the importance of establishing rhizobacteria in sustainable implementation protocols and integrated control strategies.

Keywords: Antagonists, beneficial bacteria, biocontrol, phytopathogens.

Introducción

La producción de banano (*Musa x paradisiaca* L.) se cataloga como una de las frutas más importantes del sector agrícola a nivel nacional e internacional, debido al volumen de producción y comercialización, ya que anualmente, tan solo Latinoamérica y el Caribe aportan el 28% de la producción a nivel mundial y cerca de 20 millones de toneladas se consumen localmente (1), lo que indica su importancia en la estabilidad alimentaria y económica de los diferentes países donde se cultiva. En Colombia, cifras de la Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios UGRA (2) demuestran que la producción de banano representa en el PIB agrícola: 5,3% y se cuentan con alrededor de 4.476.922 toneladas de la producción anual; donde para el año 2020 cerca del 86% de la producción nacional de banano fue destinado para la exportación con un total de 1.895.994 toneladas, consolidando al país como un potencial exportador de este producto en el mundo y cuya producción y espacio cultivado ha aumentado progresivamente a lo largo de los años (3), gracias a las condiciones edafoclimáticas favorables y su demanda en el mercado. Sin embargo, las plagas y enfermedades, son algunos de los elementos limitantes para la óptima producción de banano alrededor del mundo, siendo el marchitamiento por *Fusarium*, una de las enfermedades más representativas en términos de producción, causando pérdidas importantes debido a que actúa antes de que esta pueda producir sus primeros racimos, por lo cual es particularmente devastador y no solo por su efecto en la planta, también el patógeno puede sobrevivir en el suelo durante varias décadas mediante la producción de clamidosporas, que volverá a infectar las plantas de banano susceptibles (4).

Actualmente, existen distintas medidas de manejo frente a *Fusarium*, entre las cuales se pueden denotar acciones preventivas, manejo cultural, manejo genético, control físico y químico, siendo este una de las formas más frecuentes en mitigación del patógeno. Sin embargo, la implementación de fungicidas representa un riesgo en temas de salud pública, contaminación ambiental y contribuye al aumento en el deterioro del suelo dado la alta persistencia de las moléculas que incluso pueden llegar a afectar la microbiota; sin contar que el uso excesivo de fungicidas puede permitir que *Fusarium* desarrolle resistencia, haciéndolo costoso para los agricultores locales (5).

Para reducir la posibilidad de que sucedan estos casos por la dependencia a ciertos medios de manejo se pueden adoptar estrategias de control biológico como una alternativa sostenible y promisoria para contrarrestar el efecto negativo del patógeno y el panorama de control se ha centrado en estrategias de manejo integrado que incluyen, entre otras medidas, la aplicación de agentes de control biológico para reducir el impacto del marchitamiento del banano por *Fusarium* en cultivares susceptibles o para aumentar la durabilidad de aquellos que ya son tolerantes (4).

En los últimos años, el control biológico ha cobrado interés en muchos patosistemas (3). Esto se ha debido a un nuevo enfoque productivo, donde se desea incursionar en otras alternativas que no impliquen el uso de agroquímicos, ya que estos causan impactos nocivos al medio ambientales y en términos de salud en general. Por lo cual se han incorporado alternativas de control por géneros microbianos efectivos contra *Fusarium* como son: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Streptomyces*, *Trichoderma* y algunos hongos micorrízicos arbusculares (6). Existen varias investigaciones que apuntan a que el género *Pseudomonas*, poseen distintas cualidades como un potente agente biocontrolador, pues se constituye como un gran ejemplo de la composición de diversos modos de acción, a través de los cuales se ha demostrado que ejerce un control biológico efectivo, incluyendo la capacidad de inhibir al patógeno y permitir que la planta genere resistencia (7). Con base a lo anterior, el objetivo del presente artículo es analizar el efecto de bacterias del género *Pseudomonas* como agente biocontrolador de *Fusarium oxysporum* en banano (*Musa x paradisiaca* L.), a través de una revisión de la literatura sobre este agente de control biológico y analizando los resultados de mayor importancia obtenidos en numerosos estudios.

Materiales y métodos

Esta investigación se desarrolló mediante la consulta de estudios de índole científico, teniendo en cuenta como criterio de evaluación la calidad en la metodología y resultados obtenidos, además del cumplimiento de los criterios de evaluación de la fuente requeridos como la fiabilidad, exactitud, actualidad y la validez de la información contenida.

Este tipo de revisión se cataloga como un diseño de investigación documental, debido a que se basa en el método de teoría fundamentada, donde la técnica de recolección de información que fue empleada es a partir de recopilación documental bibliográfica de diversas fuentes de información primarias y secundarias del siguiente modo:

El estudio se realizó en los idiomas español, portugués e inglés en bases de datos y bibliotecas científicas como el Centro de Gestión del Conocimiento y el Aprendizaje de la Universidad de Cundinamarca que cuenta con recursos y plataformas digitales como Pubmed, ScienceDirect, Scopus, Mcgraw-Hill, Pearson, NCBI, Springer, SciELO, Google Académico, entre otros. Para la búsqueda se utilizaron palabras claves como: "*Pseudomonas*, *Fusarium oxysporum*, Banano, biocontrol de marchitez vascular, entre otros. Con límite por año de publicación en intervalo (2013 -2023), salvo algunos casos donde la factibilidad en la información pudo llegar a ser limitada o por motivo de acontecimientos e información de relevancia, por ende, se recurre a extender la vigencia del año de búsqueda para aquellas excepciones. Adicionalmente, se examinaron las fuentes bibliográficas de los artículos seleccionados con la finalidad de preservar información de otras investigaciones con potencial de inclusión dentro de la revisión.

La presente revisión se basó en tres fases fundamentales: uno. Selección de la temática a trabajar titulada Control biológico de la marchitez del banano (*Musa x paradisiaca* L.) producida por *Fusarium oxysporum* utilizando bacterias del género *Pseudomonas* como una alternativa agrosostenible., dos. Recopilación de artículos científicos con validez científica sobre la temática trabajada, construcción de una matriz de recopilación de información, para discriminar y categorizar por metodología, objetivos y resultados, y tres. Redacción del artículo publicable con interpretaciones de forma gráficas (Gráficos de tendencias, mapas e ilustraciones) o escritas (interpretaciones personales) que logran contemplar la información de forma clara y concisa.

Resultados y discusión

Impacto y distribución de la marchitez por *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense en la producción de banano (*Musa x paradisiaca* L.)

El sector bananero cuenta con diversas dificultades de acuerdo a los diferentes problemas fitosanitarios que se presentan en cultivo como es el caso *Fusarium oxysporum*, considerada una de las enfermedades más letales de las musáceas, debido a su permanencia y longevidad en el suelo por mucho tiempo (8); como lo menciona la Secretaría General de la CAN (9) , ya que cuenta con periodos de permanencia de 20 a 30 años en el suelo y clamidosporas que muestran ser resistentes a la desecación, y a las condiciones ambientales extremas, por lo cual es difícil de controlar y se ha diseminado en diferentes continentes.

Fusarium oxysporum f. sp. cubense (*Foc*) existe como diferentes razas patógenas, clasificadas según su capacidad de causar enfermedades en un conjunto de diferentes cultivares de banano y son catalogadas como *Foc* razas 1, 2, 3 y 4 (10); esta última raza es reportada por el ICA (11) en la reciente declaratoria de emergencia sanitaria por *Fusarium oxysporum* f. sp. Raza 4 Tropical (*Foc* R4T) en la Guajira (Colombia) , donde se miden los posibles impactos y riesgos para el sector bananero en diversos países de Latinoamérica y el Caribe, ya que TR4 es altamente virulento en los cultivares actuales de banano Cavendish, debido a su modo de infección donde las esporas prefieren adherirse primero a la punta de la raíz del banano, antes de que el micelio penetre directamente en la pared celular epidérmica y posteriormente colonice y obstruya los vasos del xilema (10). Aunque TR4 todavía está restringido a Asia y África, Amenaza la exportación global de bananos, especialmente en América. Tan solo en Colombia se cuentan con alrededor de 35.139 unidades productivas agrícolas, que anualmente generan 293.648 empleos directos e indirectos, sin contar que cerca del 86% de la producción Nacional de banano es destinado para la exportación (2). Además, a nivel internacional se espera un crecimiento de los sitios dedicados al cultivo de banano del 50 % para el 2070, pero dicha perspectiva se ve amenazada debido a la rápida dispersión de TR4 hacia otros continentes y países como África (Mozambique); Asia (Malasia, Indonesia , Taiwán, China, Filipinas, India, entre otros); Oriente Medio (Jordania, Israel , Líbano, Pakistán,); Oceanía (Australia) (12); y la facilidad de propagación de esta enfermedad fúngica transmitida por el suelo, gracias a la alta supervivencia de las clamidosporas de *Fusarium* en la tierra.

Colonización de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense en tejido de plátano.

Fusarium oxysporum f. sp. cubense (*Foc*) está clasificado como una enfermedad de marchitez vascular, este hongo se considera un hemibiotrofo, dado que el patógeno crea una relación biotrófica con el huésped en el proceso de infección inicial, provocando la muerte de los tejidos del huésped al continuar la relación en forma de necrótrofo (13); autores como Pegg *et al.* (14) afirman que normalmente la colonización del patógeno ocurre en la zona radicular de la planta debido a la presencia de las clamidosporas en el suelo las cuales son resultado de vainas y hojas senescentes provenientes de prácticas culturales como el deshoje, que aumentan el riesgo de que estas regresen al suelo y generen mayor probabilidad de colonización.

Existen múltiples ciclos de infección por *Fusarium*, sin embargo, el ciclo de infección de *Foc* TR4 empieza con la presencia del inóculo, el cual puede estar presente en el suelo o logra permanecer y subsistir como endófito en plantas diferentes a la familia Musaceae (8).

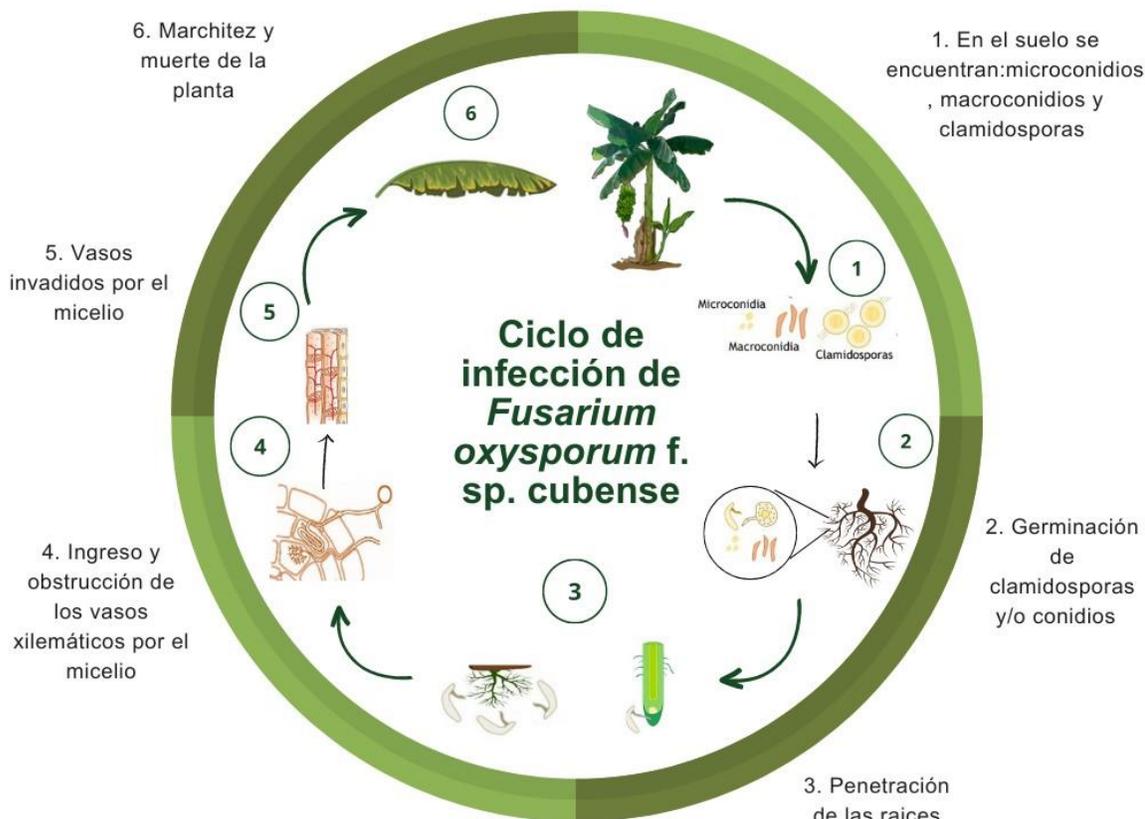


Figura 1. Ciclo de infección por *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense

Fuente: elaboración propia

La inoculación sucede en el momento en que los conidios y/o clamidosporas presentes en el suelo surgen ante la aparición de secreciones provenientes de la zona radicular del banano; mientras que las primeras son un tipo de esporas que colonizan al huésped y pueden dividirse en dos: micro y macroconidios, por otro lado, las clamidosporas además de colonizar directamente al huésped, pueden llegar a presentar resistencia a condiciones ambientales adversas, lo cual permite la supervivencia del hongo por periodos de tiempo prolongados (15). Iniciándose la infección en las fases iniciales del cultivo, puede invadir los tejidos del xilema del sistema radicular y propagarse por medio del sistema vascular de los pseudotallo. Sin embargo, es difícil monitorear el proceso de infección y los primeros signos de infección, como la decoloración o el marchitamiento de las hojas, aparecen varias semanas o varios meses después de la infección (16), por lo general, después del ingreso de las esporas en el huésped, el micelio fúngico ingresa al xilema y crece en sentido acrópeto, obstruyendo el tejido, y así mismo minimizando el transporte de fotoasimilados, además, las toxinas que libera el hongo hacen que las hojas se tornen de un tono amarillo (15).

Respecto a la infección del patógeno, la transferencia inicial desde las raíces es lenta, tarda cuatro semanas por cada setenta y cinco centímetros en progresar. Pero en vasos de xilema maduros, el patógeno viaja con cada nueva generación de esporas cada treinta centímetros durante tres días. Una vez alcanzado el tejido del rizoma, el patógeno puede infectar todo el pseudotallo en menos de dos semanas, aunque el huésped reacciona a infección tratando de

desarrollar una pared de gel sobre y agregada a la placa que impide el avance fúngico (16), aun así otros autores como Martínez *et al.* (8) indican que el avance de la infección es más rápido ya que después de 17 días, se observan numerosas hifas en el pseudotallo y, finalmente, la planta muere después de 24 días, liberando grandes cantidades de clamidosporas en el suelo.

Estrategias de control del marchitamiento por *Foc* empleados en la actualidad.

En la actualidad, algunos métodos tradicionales, como el control químico (p. ej. , fumigantes y fungicidas del suelo) de TR4, es de los métodos de control ampliamente usados ya que sus efectos son promisorios en el control y/o disminución de la enfermedad por marchitez vascular por *Fusarium*. Autores como Arias (17), reportan su funcionalidad a partir la práctica de diversas pruebas en condiciones *in vitro*; con la aplicación de fungicidas como propiconazol y procloraz, comprobando que son capaces de inhibir el crecimiento del micelio de *Foc* RT4, pero pese a su capacidad de control de *Foc* tiene efectos adversos que por razones ecológicas y económicas, está generando preocupaciones ya que el uso de plaguicidas va a alterar la comunidad biológica que interactúa en un mismo espacio físico con el cultivo y causando un impacto ambiental, que en el caso de los cultivos del banano, los riesgos relacionados con los fungicidas son: 1) La persistencia en el tiempo respecto al medio ambiente por la baja biodegradabilidad, especialmente los fosforados y los clorados. 2) Posibilidad de percolación al subsuelo hasta los acuíferos 3) Generación de resistencia a las plagas, lo que aumenta las periodicidades de empleamiento. 4) Disminución de entomopatógenos y del control biológico. 5) Resurgimiento de plagas ya controladas, por la obtención de resistencia 6) Afectación de los polinizadores (18).

Es posible que se necesiten otras estrategias de manejo que generen efectos similares sin generar un impacto ambiental, como lo es la rotación de cultivos como práctica de gestión, en general, es un medio muy eficaz para moderar las enfermedades transferidas por el suelo (19). Recientemente, Wang *et al.* (20) investigaron la influencia de los sistemas de rotación de cultivos de piña-banano y maíz-banano de dos años en la densidad de población de *Foc* .Sus resultados mostraron que la rotación de piña y banano fue más efectiva que la de maíz y banano para reducir los niveles de *Foc* y suprimir la incidencia de la enfermedad ocasionada por *Fusarium*; otros autores reportan la importancia de implementar otras medidas , como el uso de algunos extractos de plantas que también muestran actividad antifúngica y, por lo tanto, son adecuados para reducir el crecimiento del micelio tanto en pruebas de campo como de invernadero (10), además del manejo genético, el cual se presenta como una alternativa eficiente al desarrollar métodos que permitan seleccionar cultivares susceptibles y resistentes a *Fusarium oxysporum* a través de programas de mejoramiento genético con sistemas de elección en lo que respecta a la resistencia del banano a *Foc* como son: 1) La elección *ex vitro* e *in vivo* por medio de la infección de propágulos de banano con esporas provenientes del hongo bajo invernadero y en condiciones de campo; 2) cambios heredables inducidos a partir de mutagénesis *in vitro* , como lo demuestran García-Velasco *et al.* (21) quienes emplearon esta técnica por medio de metanosulfonato de etilo, con el fin de obtener cultivares de banano (*Musa* spp., AAA) que presentara resistencia a *Foc* RT4 ; cuyos resultados demostraron que las plantas regeneradas con los cultivares resistentes demostraron una disminución en la incidencia de la enfermedad en comparación a las plantas control.

Teniendo en cuenta la urgencia del mal de Panamá, el control biológico ofrece un enfoque suplementario para el control de la enfermedad, la implementación de agentes de control biológico se ha catalogado como una estrategia de manejo de enfermedades respetuosa con el medio ambiente, además, los endófitos bacterianos en una sola planta huésped no se restringen a una sola especie sino que comprenden varios géneros y especies, siendo los géneros

bacterianos *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Enterobacter* y *Pseudomonas* los más frecuentemente aislados (19).

Estos endófitos bacterianos podrían optimizar el crecimiento y estado del huésped vegetal a través de varios modos de acción; estos modos incluyen la antibiosis (producción de antibióticos), la promoción del crecimiento, estímulo de defensas del huésped (resistencia sistémica inducida, ISR), el parasitismo, la competencia y la interferencia de señales (detección de quórum) (22), existiendo un interés creciente en los últimos años en el uso de estas bacterias como agentes de biocontrol.

Clasificación de modos de acción del género *Pseudomonas* para el control de *Fusarium oxysporum*.

La efectividad del biocontrol de un patógeno por medio de microorganismos endófitos antagonistas es determinada principalmente por los modos de acción que actúan sobre la inhibición de la enfermedad; como es el caso del género *Pseudomonas* spp. las cuales son rizobacterias endofíticas beneficiosas y muy versátiles, que comprenden más de cien especies (7), donde las cepas son habitantes autóctonos de la endosfera, rizosfera y/o filosfera de las plantas, y pueden llegar a exhibir capacidades de biocontrol y promoción del crecimiento vegetal bajo diferentes condiciones experimentales (23).

En esta investigación se estimó por varios autores los modos de acción identificados por *Pseudomonas* en el control de *Foc* como lo son:

(1) Competencia de nutrientes y espacio, ya que la competencia puede ser un modo eficaz de control, si el antagonista se encuentra en el momento y lugar adecuado en cantidades favorables y puede usar los recursos limitados de forma más eficiente que los patógenos (24), lo cual puede ocurrir por la producción de sideróforos, los cuales son capaces de quelar el hierro presente en el medio, por tanto no quedará disponible para los fitopatógenos como lo explica Villa *et al.* (25) ya que los sideróforos son capaces de inhibir enfermedades causadas por hongos y bacterias fitopatógenas por la competencia con el ión férrico donde forman quelatos causando la inhibición del patógeno por no disponer del mismo. Ciertos sideróforos son más eficientes al momento de quelar el hierro y algunas especies del género *Pseudomonas* segregan diferentes tipos que determinan la eficiencia para colonizar distintos ambientes como es el caso del tipo hidroximato, de los cuales se hallan la ferribactina y pseudobactina, de los cuales se hallan la ferribactina y pseudobactina, aun así otras se categorizan por ser productoras de moléculas apeladas pioverdinas del tipo catecol (26).

(2) Producción de antibióticos, en *Pseudomonas* se han estudiado muchos metabolitos de antibióticos como DAPG, pirrolnitrina y fenazina. Muchos antibióticos se producen sólo cuando una población microbiana alcanza ciertos umbrales (27). Este fenómeno de detección de quórum está bien descrito para *Pseudomonas* productoras de fenazina, las cuales son compuestos con características antimicrobianas debido a su capacidad de reacción de óxido-reducción; según Sánchez *et al.* (28) su modo de acción consta en la alteración de la reacción redox de metabolitos clave dentro de la célula, mediante difusión o inserción en la membrana celular, donde actúan como agentes reductores y desacoplan la fosforilación oxidativa y la creación de radicales superóxido y peróxido de hidrógeno, los cuales presentan cierta toxicidad en el organismo y se utilizan directamente como inhibidores del crecimiento; entre los procedentes de fenazina elaborados por *Pseudomonas* spp. se encuentran piocianina, enazina-1-carboxamida, ácido fenazina-1-carboxílico (29), como es el caso de *Pseudomonas aeruginosa*, de la cual autores

como Martínez (30) reportan que está relacionada con la generación de fenazina-1-Carboxilato (PCA), y este compuesto bajo concentraciones de PCA iguales o menores a 50 µg/ml es probable que inhiba hasta el 60% del crecimiento fúngico de *Fusarium oxysporum*.

(3) Promoción del crecimiento vegetal, los mecanismos que estimulan el crecimiento de las plantas por bacterias promotoras de crecimiento (PGPR) como *Pseudomonas*, incluyen, entre otros, la capacidad de producir hormonas vegetales como auxinas, citoquininas, giberelinas y etileno (31), que hacen que los PGPR contribuyan a una mayor proliferación de los pelos radiculares aumentando así la absorción de elementos como N, Fe y P.

(4) Parasitismo, está mediado por la penetración física del micoparásitos en las hifas del huésped a través del desarrollo de órganos peculiares como los haustorios y la secreción de varias enzimas o metabolitos secundarios (32), que conducen a la degradación de las estructuras fúngicas, seguida de la absorción de nutrientes/metabolitos del hongo huésped.

(5) Modulación de la señalización molecular, activación de la reacción de la planta tras el ataque de patógenos; el antagonista debe tener la capacidad de utilizar características específicas que faciliten su adherencia, colonización y multiplicación. Muy a menudo, esta propiedad se asocia con la formación de biopelículas, en las que las microcolonias quedan atrapadas en matrices hidratadas de biomoléculas producidas por microorganismos (24), lo cual conduce a la importancia de la formación de biofilms y la localización del quorum sensing (QS) en los sistemas de biocontrol.

(6) Inducción de resistencia sistémica o local, los estímulos que inducen resistencia y cebado pueden liberarse de agentes de control biológico microbiano (ACBM) específicamente seleccionados. Sin embargo, las plantas también están expuestas a estímulos de otros orígenes, por ejemplo, de hongos o bacterias patógenos, herbívoros o estrés abiótico (27). Por lo tanto, es probable que los cultivos que crecen en entornos con alta carga microbiana, se exponen con frecuencia a dichos estímulos que inducen ciertos niveles de resistencia.

La respuesta sistémica inducida (ISR) es activa en presencia de un espectro de hongos y bacterias patógenas y está regulada por moléculas señalizadoras como el etileno (ET) y ácido jasmónico (AJ), así lo demuestran Salas (33) quienes observaron que las plantas producen una respuesta ISR cuando se inoculan con la rizobacteria colonizadora de raíces *Pseudomonas fluorescens*, por lo que AJ y ET pueden regular esta vía de defensa, y los genes marcadores para estas dos hormonas son proteínas tipo heveína, endoquitinasa, defensina, aunque existen otros inducidos solo por AJ los cuales son las proteínas de almacenamiento vegetativo, lox 1 (lipoxigenasa 1) y pal 1 (fenilalanina amonio lasa). A diferencia de la respuesta sistémica adquirida (SAR), que requiere la previa acumulación de ácido salicílico como se evidencia en el estudio indagado por Motta *et al.* (34), donde la cepa de *Pseudomonas aeruginosa* logró aumentar las concentraciones de ácido salicílico en las láminas foliares, permitiendo la activación de la vía de SAR, después de la colonización de la zona radicular de las plantas por rizobacterias, desencadenando la respuesta de resistencia en las plantas.

En resumen, cada modo de acción tiene una relación directa con el control de *Foc* por lo cual en el siguiente gráfico se muestra los niveles de relación involucrados con la inhibición del patógeno.

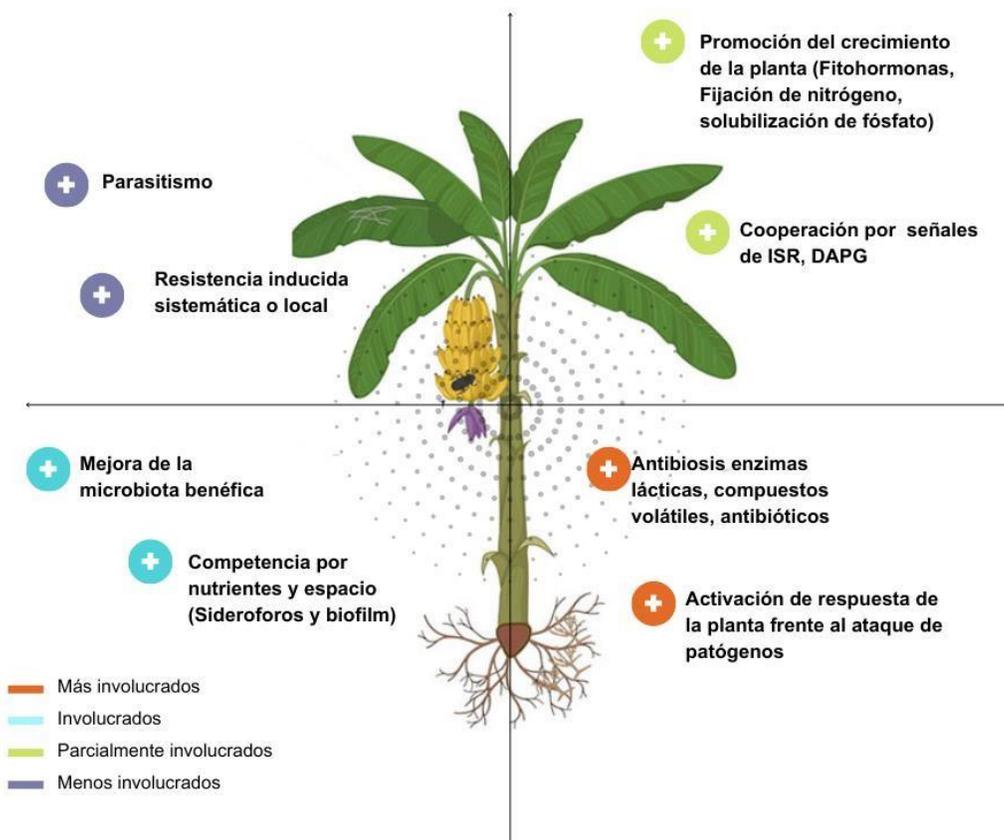


Figura 2. Modos de acción de las bacterias del género *Pseudomonas*.

Fuente: elaboración propia

Después de recopilar y analizar la bibliografía propuesta, se pudo identificar el impacto de *Fusarium oxysporum* sobre el banano (*Musa x paradisiaca* L.), así como las estrategias generales de manejo de la enfermedad con énfasis en el control biológico. Por lo tanto, se muestra una revisión parcial de la literatura sobre uno de los agentes de biocontrol utilizados ante a *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense (*Foc*) como lo son las bacterias del género *Pseudomonas* spp., destacando su importancia y categorizando diversos modos de acción que intervienen en la inhibición de la enfermedad y que se constituyen como interacciones negativas entre las cepas de *Pseudomonas* y patógenos como se puede ver en la Tabla 1.

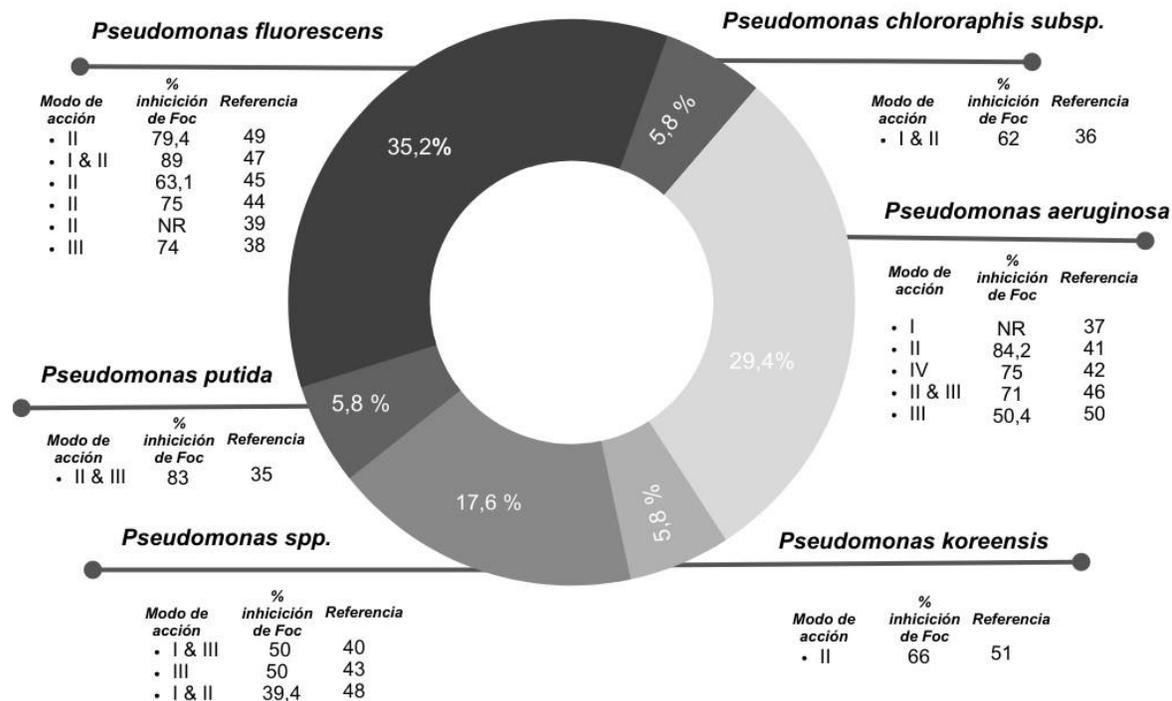
Tabla 1. Clasificación de modos de acción de cepas de *Pseudomonas* para el control de patógenos.

Categoría	Modo de acción
I	Alta capacidad de colonización de la superficie de la planta, tejidos internos (endofitismo) y/o estructuras fitopatógenas.
II	Versatilidad en la elaboración de metabolitos y/o antibióticos supresores de diversos fitopatógenos.
III	Capacidad de usar nutrientes específicos en el nicho de destino, como exudados de plantas, que les permitan competir con muchos componentes de la microbiota asociada a las plantas
IV	Capacidad para desencadenar respuestas de defensa en las plantas hospederas

Fuente: elaboración propia

Aplicación de cepas del género *Pseudomonas* y su efecto para inhibir el marchitamiento por *Fusarium* sp. en plantas de banano.

De los diferentes casos presentados se asoció las rizobacterias como biocontroladoras de *Foc* a partir de diversos modos de acción para su inhibición, en los casos reportados se encontró que tanto como *Pseudomonas fluorescens* y *Pseudomonas aeruginosa* son especies que se relacionaban más con un control real de la enfermedad, ya que del total de investigaciones 66% tienen relación con alguna de estas especies, mostrando así su utilidad para su uso, casos como el de *Pseudomonas putida* la cual solo se reporta un caso pero con una inhibición superior al 83% tiene una perspectiva favorable respecto a su investigación lo cual se puede sugerir como una especie efectiva como biocontroladora de *Foc* (Gráfica 1).



Gráfica 1. Agentes de biocontrol del género *Pseudomonas* spp. implementados en el manejo de la marchitez por *Fusarium* en banano.

Fuente: Elaboración propia

Las especies que presentaron mayores porcentajes de inhibición fueron *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Pseudomonas putida*, principalmente por su capacidad de suprimir el crecimiento micelial y el efecto del patógeno en la planta mediado por varios modos de acción. Respecto a la inhibición de *Foc* en relación a la información categorizada, en el caso de *Pseudomonas fluorescens* presentó mejores resultados con los modos de acción I y II con una inhibición superior al 80%, ya que en los resultados expuestos por Mahachai *et al.* (47) las cepas de *P. fluorescens*, incluida la PfD90 (tratamiento utilizado en el estudio), demostró la capacidad de inducir la respuesta de defensa en las plantas de banano, incluida la expresión de peroxidasa, polifenol oxidasa y fenilalanina amoníaco liasa; lo cual determinó la eficacia del biocontrol y pudo explicarse no solo por el hecho de la antibiosis directa, sino por la influencia de otros factores en esta cepa como la alta colonización de raíces, la interacciones con otras rizobacterias, que se determinaron como efectos indirectos de biocontrol. Mientras que *Pseudomonas aeruginosa* presentó una efectividad comparable entre un rango del 70% al 80% de inhibición, este resultado fue mediado por varios modos de acción que incluyen los tipos I, II, III y IV; para *P. aeruginosa* en lo que respecta al modo de acción I, los ensayos de Sekhar *et al.* (37) dieron a conocer la asociación ubicua de endófitos bacterianos en las puntas de los brotes del cultivar Grand Naine y la colonización intracelular por las bacterias endófitas, además de conferir resistencia a los patógenos de las plantas es otro efecto positivo logrado por la colonización competitiva de raíces, la síntesis aleloquímica bacteriana y la inducción de

resistencia sistémica. En el tipo III, autores como Abo-Zaid *et al.* (52) reportan que algunos aislados de *Pseudomonas*, como lo es *P. aeruginosa*, es productor de sideróforos y fue eficiente en la disminución de la enfermedad, lo cual podría explicarse por su capacidad para quelar y reducir la cantidad de iones férricos disponibles en la rizosfera (competencia por la nutrición del hierro), restringiendo al patógeno en la rizósfera y reduciendo su capacidad para colonizar las raíces. Además, Solans *et al.* (53) informaron que esta misma especie productora de sideróforos puede inducir resistencia sistémica en las plantas, lo que reduce la infección por patógenos, incluyendo otros mecanismos, que pueden ayudar a suprimir y controlar patógenos fúngicos, como la producción de compuestos antifúngicos y enzimas líticas, lo cual se resume en el modo de acción IV.

Mientras que para el modo de acción II, Durairaj *et al.* (54) revelaron que las cepas de *Pseudomonas aeruginosa* son altas productoras de metabolitos secundarios asociados con la actividad antibacteriana, esto se debe a que *Pseudomonas* es un género en el que se han identificado varias especies como productoras de metabolitos antimicrobianos incluyendo compuestos como: pirrolnitrina (PRN), fenazinas, 2,4-diacetilfluoroglucinol (DAPG), piocianina, pioluteorina, viscosinamida y cianuro de hidrógeno, que se reportan como biocontroladores, al igual que otros metabolitos como N-mercapto-4-formylcarbostyryl, quien ha presentado efectividad frente *Fusarium oxysporum* (55).

Con base lo descrito anteriormente, en cuanto a la producción de derivados de fluoroglucinol como agente de control, Rodríguez (56) informaron que estos compuestos actúan sobre el plasmalema celular y generalmente provocan la disrupción del contenido celular, lo que resulta en daños en la morfología de las hifas y problemas de crecimiento. Por otro lado, los mismos autores documentaron que la producción de fenazina por parte de *P. fluorescens* es un factor determinante en el biocontrol de *F. oxysporum*; aparentemente reduciendo el crecimiento de colonias fúngicas debido a que se propagan a través de la membrana, actuando como agente reductor, así provocando la formación de O_2^- , H_2O_2 u OH , que son tóxicos para las células y afectan la morfología celular induciendo el proceso de muerte. En lo reportado por Li *et al.* (41) *P. aeruginosa* muestra la capacidad de producir quitinasa, como también lipasa; por lo tanto, los resultados del biocontrol se centran en los cambios principalmente en la síntesis de membrana y pared celular, el daño antioxidante y la autofagia en las células *Foc* TR4. Lo cual demuestra que estas cepas pueden descomponer la quitina y tener una alta actividad proteolítica y actividad de amilasa, junto con una mayor producción de sideróforos y soluciones de fosfato que favorecen el crecimiento de las plantas.

También se observaron resultados favorables para la especie *Pseudomonas putida* con rangos del 70% al 80% de inhibición causado principalmente por el modo de acción II y III, y en concordancia con lo anterior, Saritha *et al.* (57) mencionan que *P. putida* mostró positivo a la producción de sideróforos, amoníaco y de cianuro de hidrógeno, al igual que para proteasa, actividades de quitinasa, ureasa y ACC desaminasa.

Finalmente se encontró rangos de 40% a 50% en reportes de artículos científicos en los cuales no se reportó una especie y se categorizó por el género (*Pseudomonas* spp.), siendo el control efectuado por los modos de acción I, II y III, de los cuales se observó una menor efectividad respecto a el control de *Foc*, en un estudio realizado por Shen *et al.* (48) los resultados del ensayo de doble cultivo mostraron que tan sólo 6,4 cepas de *Pseudomonas* spp. antagonizaron a *Foc* RT4, con total de 56 cepas antagónicas recuperadas del suelo que suprimió la enfermedad, lo cual muestra que el biocontrol depende ampliamente de las especies a manejar implicando una necesidad de conocimiento mayor a cómo actúan y logran inhibir al patógeno.

Panorama de investigación sobre el uso de *Pseudomonas* spp. en el mundo

Por medio de la revisión de las distintas investigaciones de carácter científico, se denota en la Figura 3 que gran parte de los estudios se han realizado en el continente asiático, destacando India, China, Taiwán, Tailandia y Malasia en cuanto a la producción de material investigativo, seguido del continente europeo, con Italia, y finalizando en América Latina, con hallazgos realizados en Brasil y Colombia.

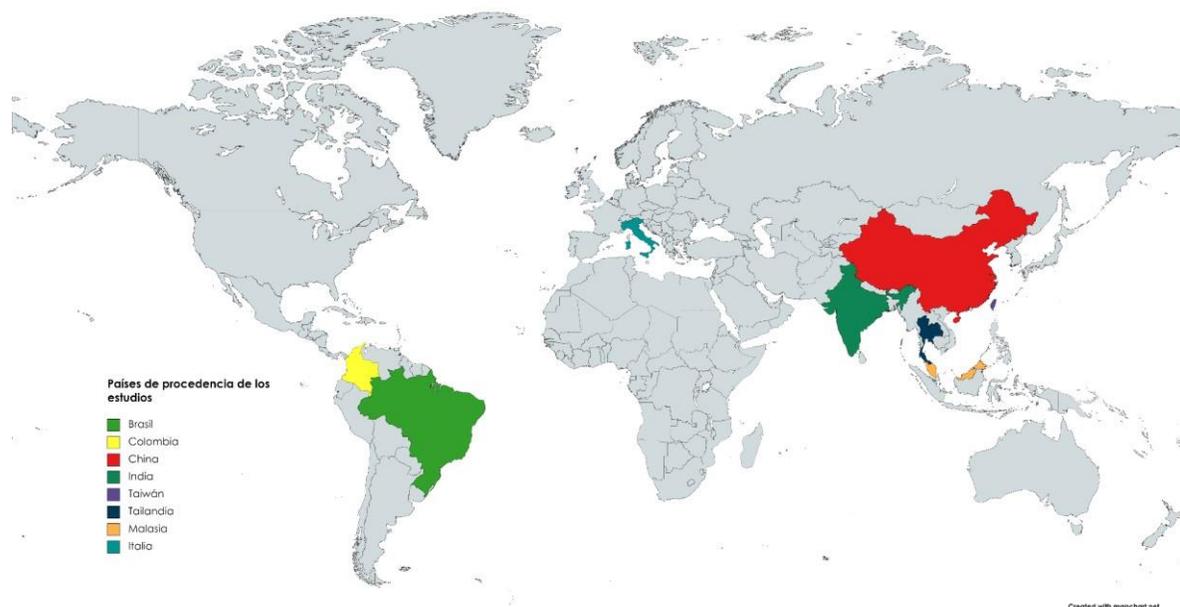


Figura 3. Reporte geográfico de los estudios recolectados.

Fuente: Mapchart, modificado por autores

Respecto al continente asiático donde se reporta el mayor número de investigaciones, es posible que se deba a la propagación de *Foc* TR4 la cual se ha agravado. Sin contar con la diseminación del patógeno y sus principales afectaciones en la industria a lo largo de los años, como lo acontecido en Filipinas en el año 2006, donde los agricultores abandonaron hectáreas de plantaciones de banano debido a *Foc* TR4, lo que resultó en una pérdida anual de alrededor de \$ 3 mil millones y el sustento de aproximadamente 66,000 familias (58), y como consecuencia, en 2014, la Federación de Cooperativas de Mindanao (FEDCO) aconsejó a los productores de banano cambiar a la palma aceitera en campos comprometidos por *Foc*.

Dado este panorama sobre las zonas productoras históricamente afectadas en el continente asiático, y la problemática de la diseminación de la enfermedad, se abrió paso a la implementación de nuevas alternativas para el control de *Foc*, como el caso de *Pseudomonas* spp.

El control biológico mediado por bacterias del género *Pseudomonas* spp. ha resultado ser una alternativa eficaz, sin embargo, su uso en Colombia se ve limitado, ya que, en comparación con los productos de síntesis química, en Colombia los productos de origen biológico tienen una contribución de alrededor del 10% del total de productos ofrecidos a nivel comercial, incidiendo

en que su implementación en campo sea cada vez menos frecuente (59). Por tanto, en la actualidad las cepas genéticamente modificadas representan un amplio potencial en el refuerzo de los mecanismos de biocontrol de parte de esta rizobacteria. Este enfoque ofrece un panorama extenso para futuras investigaciones. Así mismo, es de suma importancia impulsar la investigación en Colombia con el fin de asentar la posibilidad de aplicar pruebas *in vivo* en cultivos domésticos con productos elaborados a partir de cepas de *Pseudomonas* spp. (34).

Conclusiones

La presente revisión bibliográfica, permitió establecer los rangos de inhibición de *Foc*, principalmente por las especies *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas aeruginosa*, las cuales tienen mayor correlación respecto al biocontrol con rangos efectivos de inhibición de la enfermedad del 50% a 80%, es por ello que el control biológico mediado por *Pseudomonas* spp. aumenta la probabilidad de aminorar la incidencia y severidad de *Foc*, sin repercusiones negativas, por lo cual es necesario estudios destinados a la sustitución de plaguicidas con métodos ambientalmente más seguros; en el caso de esta alternativa.

De los datos analizados en este trabajo de investigación bibliográfica, se reportó que un solo modo de acción no incurre en el control de *Foc*, al contrario, por cada especie se dio en evidencia uno o más casos efectivos mediado por varios modos de acción que incluyen los cuatro tipos categorizados, por ende, probablemente, la supresión del patógeno esté relacionado con las especies de *Pseudomonas* y su capacidad de generar más de un solo modo de acción.

Se sugiere que el control biológico mediado por *Pseudomonas* spp. puede contribuir en gran medida en la inhibición de *Foc*, por ende, se deben aplicar esfuerzos para validar los resultados disponibles, con miras en profundizar el conocimiento sobre estas rizobacterias y mejorar su eficacia mediante el establecimiento de protocolos de aplicación efectivos y su inclusión en estrategias de control integradas.

Agradecimientos

Los integrantes de este grupo agradecen al docente y tutor Karol Lizarazo Hernández, quien con su apoyo y enseñanza crítica contribuyó en la construcción del presente artículo, a la docente y codirectora Pilar Rojas Gracia, por brindarnos asesoría y de igual manera, a los docentes que forman parte del programa de Ingeniería Agronómica y directivos de la Universidad de Cundinamarca por incentivar a los estudiantes por medio de estos proyectos, a la investigación e innovación en el sector agrícola.

Declaración de conflicto de intereses:

Los autores declaramos expresamente que no existe algún tipo de contribución externa u otras que puedan influenciar los resultados presentados y dar lugar a conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Köberl M, Dita M, Martinuz A, Staver C, Berg G. Members of Gammaproteobacteria as indicator species of healthy banana plants on *Fusarium* wilt-infested fields in Central America. *Sci Rep.* 2017;7.
2. Finagro. Ficha de inteligencia - Banano tipo exportación. Finagro. 2018.
3. Bubici G, Kaushal M, Prigigallo MI, Cabanás CGL, Mercado-Blanco J. Biological control agents against *Fusarium* wilt of banana. Vol. 10, *Frontiers in Microbiology.* 2019.
4. Villa-Martínez A, Pérez-Leal R, Morales-Morales HA, Basurto-Sotelo M, Soto-Parra JM, Martínez-Escudero E. Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agron.* 2014;64(2).
5. Patel R, Mehta K, Prajapati J, Shukla A, Parmar P, Goswami D, *et al.* An anecdote of mechanics for *Fusarium* biocontrol by plant growth promoting microbes. Vol. 174, *Biological Control.* 2022.
6. Espinoza Ahumada CA, Gallegos Morales G, Hernández Castillo FD, Ochoa Fuentes YM, Cepeda Siller M, Castillo Reyes F. Antagonistas microbianos a *Fusarium* spp., como agente causal de pudrición de raíces y tallo en melón. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios.* 2019;6(16).
7. Pérez Álvarez S, Coto Arbelo O, Echemendía Pérez M, Ávila Quezada G. *Pseudomonas fluorescens* Migula, biological control or pathogen?. *Rev. Protección Veg.* 2015;30(3).
8. Martínez-Solórzano GE, Rey-Brina JC, Pargas-Pichardo RE, Manzanilla EE. Marchitez por *Fusarium* raza tropical 4: Estado actual y presencia en el continente americano. *Agronomía Mesoamericana.* 2019 Dec 11;259–76.
9. Secretaría General de la Comunidad Andina. Guía andina para el diagnóstico de *Fusarium* Raza 4 Tropical (R4T) *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense (syn. *Fusarium odoratissimum*) agente causal de la marchitez por *Fusarium* en musáceas (plátanos y bananos). 2020.
10. Siamak SB, Zheng S. Banana *Fusarium* Wilt (*Fusarium oxysporum* f. sp. cubense) Control and Resistance, in the Context of Developing Wilt-resistant Bananas Within Sustainable Production Systems. *Hortic Plant J.* 2018 Sep;4(5):208–18.
11. Instituto Colombiano Agropecuario- ICA. ICA amplía y refuerza las medidas, que ya venía implementando, para atender la presencia de *Fusarium* R4T en cultivos de banano en La Guajira. 2019.
12. Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA). Análisis de riesgo de plagas *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense raza 4 Tropical (FocR4T), como plaga cuarentenaria para la región del OIRSA. San Salvador; 2019.
13. Mon YY, Bidabadi SS, Oo KS, Zheng SJ. The antagonistic mechanism of rhizosphere microbes and endophytes on the interaction between banana and *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. *Physiol Mol Plant Pathol.* 2021 Dec;116:101733.
14. Pegg KG, Coates LM, O'Neill WT, Turner DW. The Epidemiology of *Fusarium* Wilt of Banana. *Front Plant Sci.* 2019 Dec 20;10.
15. Dirección del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria (CNRF). Ficha técnica *Fusarium* spp. (Hypocreales: Nectriaceae) Podredumbre de raíces. 2020.
16. Li C, Yang J, Li W, Sun J, Peng M. Direct Root Penetration and Rhizome Vascular Colonization by *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense are the Key Steps in the Successful Infection of Brazil Cavendish. *Plant Dis.* 2017 Dec;101(12):2073–8.
17. Arias Aguirre AR. Medidas de prevención en el manejo de la enfermedad del mal de panamá (*Fusarium oxysporum* R4T) en el cultivo de banano. [Babahoyo]: Universidad Técnica de Babahoyo; 2021.
18. Párraga C, Espinel R. Análisis de la actividad agrícola como contaminante del agua, alternativas tecnológicas para la desinfección del agua para consumo humano en comunidades

rurales y recursos legislativos para la prevención y su conservación. [Guayaquil]: Escuela Superior Politécnica del Litoral; 2010.

19. Eljounaidi K, Lee SK, Bae H. Bacterial endophytes as potential biocontrol agents of vascular wilt diseases – Review and future prospects. *Biological Control*. 2016 Dec;103:62–8.

20. Wang B, Li R, Ruan Y, Ou Y, Zhao Y, Shen Q. Pineapple–banana rotation reduced the amount of *Fusarium oxysporum* more than maize–banana rotation mainly through modulating fungal communities. *Soil Biol Biochem*. 2015 Jul;86:77–86.

21. García-Velasco R, Portal-González N, Santos-Bermúdez R, Rodríguez-García A, Companioni-González B. Genetic improvement for resistance to Fusarium wilt in banana. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*. 2020 Dec 28;39(1).

22. Mansoori M, Heydari A, Hassanzadeh N, Rezaee S, Naraghi L. Evaluation of *Pseudomonas* and *Bacillus* bacterial antagonists for biological control of cotton verticillium wilt disease. *J Plant Prot Res*. 2013;53(2).

23. Gómez-Lama Cabanás C, Wentzien NM, Zorrilla-Fontanesi Y, Valverde-Corredor A, Fernández-González AJ, Fernández-López M, *et al*. Impacts of the Biocontrol Strain *Pseudomonas simiae* PICF7 on the Banana Holobiont: Alteration of Root Microbial Cooccurrence Networks and Effect on Host Defense Responses. *Front Microbiol*. 2022 Feb 15;13.

24. Spadaro D, Droby S. Development of biocontrol products for postharvest diseases of fruit: The importance of elucidating the mechanisms of action of yeast antagonists. *Trends Food Sci Technol*. 2016 Jan;47:39–49.

25. Villa PM, Frías A, & González, G. Evaluación de cepas de *Pseudomonas* sp para el control de hongos fitopatógenos que surgen cultivos de interés económico. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. 2005. (3),40-44.

26. Aguado–Santacruz G, Moreno–Gómez B, Jiménez–Francisco B, García–Moya E, Preciado–Ortiz R. Impacto de los sideróforos microbianos y fitosidóforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis. *Revista fitotecnia mexicana*. 2022;35(1).

27. Köhl J, Kolnaar R, Ravensberg WJ. Mode of Action of Microbial Biological Control Agents Against Plant Diseases: Relevance Beyond Efficacy. *Front Plant Sci*. 2019 Jul 19;10.

28. Sánchez Carrillo R, Guerra Ramírez P. *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Rev Mex De Cienc Agric*. 2022 Jun 21;13(4):715–25.

29. Chaudhari B.L., Patil S.N., Paradeshi J.S., Chaudhari M.A. & Chaudhari C.S. Premier Biocontrol Traits of Pseudomonads: Siderophores, Phenazines or What Else? *Microorganisms for Sustainability*. 2017.

30. Martínez- Guarnizo JC. Modelamiento de la red metabólica de *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 para la síntesis biológica de Fenazina-1-carboxilato. 2019.

31. Gamez R, Cardinale M, Montes M, Ramirez S, Schnell S, Rodriguez F. Screening, plant growth promotion and root colonization pattern of two rhizobacteria (*Pseudomonas fluorescens* Ps006 and *Bacillus amyloliquefaciens* Bs006) on banana cv. Williams (*Musa acuminata* Colla). *Microbiol Res*. 2019 Mar;220:12–20.

32. Ghorbanpour M, Omidvari M, Abbaszadeh-Dahaji P, Omidvar R, Kariman K. Mechanisms underlying the protective effects of beneficial fungi against plant diseases. *Biological Control*. 2018 Feb;117:147–57.

33. Salas-Marina, MA. Análisis molecular de la interacción microorganismo benéfico-planta en dos patosistemas: *Trichoderma-arabidopsis* y *Trichoderma-tomate*. 2010.

34. Motta Escobar S, Salazar Cabezas LD, Sánchez Leal LC. Perspectiva del uso de *Pseudomonas* spp. como biocontrol de fitopatógenos en cultivos de hortalizas en Colombia: una revisión sistemática. *Revista Mutis*. 2022 Mar 29;12(2).

35. Thangavelu R, Gopi M. Field suppression of *Fusarium* wilt in banana using combined application of native endophytic and rhizospheric bacterial isolates possessing multiple functions. *Phytopathol Mediterr*. 2015 Sep;54:241–252.

36. Prigigallo MI, Gómez-Lama Cabanás C, Mercado-Blanco J, Bubici G. Designing a synthetic microbial community devoted to biological control: The case study of *Fusarium* wilt of banana. *Front Microbiol.* 2022 Aug 5;13.
37. Sekhar AC, Thomas P. Isolation and Identification of Shoot-Tip Associated Endophytic Bacteria from Banana cv. Grand Naine and Testing for Antagonistic Activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense . *Plant Sci.* 2015;06(07):943–54.
38. Tao C, Li R, Xiong W, Shen Z, Liu S, Wang B, *et al.* Bio-organic fertilizers stimulate indigenous soil *Pseudomonas* populations to enhance plant disease suppression. *Microbiome.* 2020 Dec 22;8(1):137.
39. Vieira LC da S, Borges CV, Costa SN, Gonçalves ZS, Da Silva Pereira BL, Haddad F. Biocontrol de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense por *Pseudomonas* spp. em banana “Prata anã.” *Journal of Biotechnology and Biodiversity.* 2022 Mar 1;10(1):084–93.
40. Köberl M, Dita M, Martinuz A, Staver C, Berg G. Members of Gammaproteobacteria as indicator species of healthy banana plants on *Fusarium* wilt-infested fields in Central America. *Sci Rep.* 2017 Mar 27;7(1):45318.
41. Li S, Ma J, Li S, Chen F, Song C, Zhang H, *et al.* Comparative Transcriptome Analysis Unravels the Response Mechanisms of *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense to a Biocontrol Agent, *Pseudomonas aeruginosa* Gxun-2. *Int J Mol Sci.* 2022 Dec 6;23(23):15432.
42. Maulidah NI, Tseng TS, Chen GH, Hsieh HY, Chang SF, Chuang H wen. Transcriptome analysis revealed cellular pathways associated with abiotic stress tolerance and disease resistance induced by *Pseudomonas aeruginosa* in banana plants. *Plant Gene.* 2021 Sep;27:100321.
43. Lv N, Tao C, Ou Y, Wang J, Deng X, Liu H, *et al.* Root-Associated Antagonistic *Pseudomonas* spp. Contribute to Soil Suppressiveness against Banana *Fusarium* Wilt Disease of Banana. *Microbiol Spectr.* 2023 Apr 13;11(2).
44. Akila R, Rajendran L, Harish S, Saveetha K, Raguchander T, Samiyappan R. Combined application of botanical formulations and biocontrol agents for the management of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense (*Foc*) causing *Fusarium* wilt in banana. *Biological Control.* 2011 Jun;57(3):175–83.
45. Nayak D, Mishra M, Pradhan B, Sharma K. Evaluation of some bio-control agents *in vitro* control of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense, an incitant of banana panama wilt. *J Pharmacogn Phytochem.* 2020;9(3):751–3.
46. Jaque S, Patel P, Patel S, Nikam S, Rane T, Sayyed R. Production of biocontrol traits by banana field fluorescent *Pseudomonads* and comparison with chemical fungicide. 2014.
47. Mahachai P, Meesungnoen O, Wattanachaiyingcharoen W, Subsoontorn P. Bacterial biocontrol against *Fusarium* wilt in Pisang Awak (Namwa) Banana. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology.* 2023;28.
48. Shen Z, Thomashow LS, Ou Y, Tao C, Wang J, Xiong W, *et al.* Shared Core Microbiome and Functionality of Key Taxa Suppressive to Banana *Fusarium* Wilt. *Research.* 2022 Jan;2022.
49. Yesu I, Ebenezar E. Biological control of wilt disease of hill banana incited by *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense. *J Pharmacogn Phytochem.* 2021;10:235–40.
50. Ch’ng YR, Yong CSY, Othman SN, Mohd Zainudin NAI, Mustafa M. Isolation and Molecular Identification of a Siderophore Producing Bacterium and its Antagonistic Effect against *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Tropical Race 4. *Pertanika J Trop Agric Sci.* 2022 Jan 24;45(1):187–206.
51. Zapata Henao S. Desarrollo de estrategias de control del fitopatógeno *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense (*Foc*) a partir de la diversidad microbiana. Universidad Nacional de Colombia; 2019.
52. Abo-Zaid GA, Soliman NAM, Abdullah AS, El-Sharouny EE, Matar SM, Sabry SAF. Maximization of Siderophores Production from Biocontrol Agents, *Pseudomonas aeruginosa* F2

- and *Pseudomonas fluorescens* JY3 Using Batch and Exponential Fed-Batch Fermentation Processes. 2020 Apr 12;8(4):455.
53. Solans M, Scervino JM, Messuti MI, Vobis G, Wall LG. Potential biocontrol actinobacteria: Rhizospheric isolates from the Argentine Pampas lowlands legumes. J Basic Microbiol. 2016 Nov;56(11):1289–98.
54. Durairaj K, Velmurugan P, Park JH, Chang WS, Park YJ, Senthilkumar P, *et al.* Potential for plant biocontrol activity of isolated *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus stratosphericus* strains against bacterial pathogens acting through both induced plant resistance and direct antagonism. FEMS Microbiol Lett. 2017 Dec 15;364(23).
55. Robles M. Evaluación *in vitro* de la actividad antibacteriana de metabolitos secundarios obtenidos a partir de *Pseudomonas* aislados de suelos mineros de Fresnillo. 2016.
56. Rodríguez-Romero VM. Producción de metabolitos secundarios de *Pseudomonas fluorescens* y su uso en el control de hongos fitopatógenos. 2014.
57. Saritha B, Panneerselvam P, Ganeshamurthy A. Antagonistic potential of mycorrhiza associated *Pseudomonas putida* against soil borne fungal pathogens. Plant Arch. 2015;15(2):763–8.
58. Molina AB, Fabregar E, Sinohin VG, Yi G, Viljoen A. Recent occurrence of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 in Asia. Acta Hort. 2009 May;(828):109–16.
59. Vinchira-Villarraga DM, Moreno-Sarmiento N. Control biológico: Camino a la agricultura moderna. Rev Colomb Biotecnol. 2019 Jan 1;21(1):2–5.