



## Marchitez por *Fusarium* raza tropical 4: Estado actual y presencia en el continente americano<sup>1</sup>

### Fusarium wilt by tropical race 4: Current status and presence in the American continent

Gustavo E. Martínez-Solórzano<sup>2</sup>, Juan C. Rey-Brina<sup>2</sup>, Rafael E. Pargas-Pichardo<sup>2</sup>,  
Edwuar Enrique-Manzanilla<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Recepción: 2 de julio, 2019. Aceptación: 23 de octubre, 2019. Este trabajo formó parte de los resultados del proyecto de investigación “Evaluación fitosanitaria de sistemas de producción de banano en el eje bananero del estado Aragua, región Central de Venezuela”, ejecutado por el Centro Nacional de Investigaciones Agrícolas (CENIAP), del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, y financiados con recursos ordinarios de la institución.

<sup>2</sup> Instituto Nacional Investigaciones Agrícolas (INIA), Centro Nacional Investigaciones Agropecuarias (CENIAP). Maracay, Venezuela. martinezgve@yahoo.es (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0003-2599-1712>), jcreyb@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7271-3606>), rpargas\_6@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2297-0799>), emanzanilla@inia.gob.ve (<https://orcid.org/0009-0002-3822-466X>).

## Resumen

**Introducción.** La marchitez por *Fusarium* causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, raza tropical 4, es considerada como la enfermedad más letal de las musáceas, debido que puede sobrevivir en el suelo por más de veinte años, sin control efectivo. **Objetivo.** Reseñar el estado actual y rasgos significativos de esta enfermedad, e indicar riesgo de impacto potencial en países de América Latina y el Caribe ante su reciente reporte en Colombia. **Desarrollo.** Posee varias razas: la raza 1 ataca clones de los subgrupos Silk (*Musa* AAB) y Gros Michel (*Musa* AAA) y fue responsable de la pérdida del mercado bananero mundial en 1958, dominado por este último, fue sustituido por clones Cavendish (*Musa* AAA). La raza 2, ataca clones del subgrupo Bluggoe (*Musa* ABB); y la raza 4, a través de sus variantes tropical y subtropical, a todos los clones Cavendish, y los susceptibles a la raza 1 y raza 2. No existen clones naturales que puedan sustituir los actuales. La raza tropical 4 (R4T), se ha diseminado en diferentes continentes, causa pérdidas multimillonarias, con extrema limitaciones para su erradicación, y recientemente es motivo de preocupación en países de América Latina y el Caribe (LAC), debido a su reciente brote en la Guajira colombiana. **Conclusión.** El deficiente control, y desconocimiento de rasgos del patógeno y la enfermedad, hacen necesario el desarrollo de investigaciones para su diagnóstico temprano, estrategias de manejo, medidas de educación y/o promoción sobre planes de contingencias. Recientemente fue detectada en Colombia, lo cual implica alto riesgo para el resto de los países de la región LAC (con énfasis en Ecuador, Panamá y Venezuela), debido al flujo constante de personas (incluye turistas) y transacciones comerciales, siendo necesaria de manera imperativa una revisión de los análisis de riesgo ante este nuevo escenario.

**Palabras claves:** banano, enfermedad, plátanos, *Musa* AAB, *Musa* AAA.

## Abstract

**Introduction.** Fusarium wilt, caused by the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, tropical race 4, is considered the most lethal disease of the musaceae because it can survive on the ground for more than twenty years,



without effective control. **Objective.** Review the current status and significant features of this disease and indicate the potential impact risk in Latin America and the Caribbean countries in the face of its recent report in Colombia. **Developing.** It has several races: race 1 attacks clones of the Silk (*Musa* AAB) and Gros Michel (*Musa* AAA) subgroups and was responsible for the loss of the world banana market in 1958, dominated by the latter, being replaced by Cavendish clones (*Musa* AAA). Race 2 attacks clones of the Bluggoe subgroup (*Musa* ABB); and race 4, through its tropical and subtropical variants, attacks all Cavendish clones, and those susceptible to race 1 and race 2. There are no natural clones that can replace the current ones. Tropical race 4 (R4T), has spread in different continents, causing multimillion dollar losses, with extreme limitations for its eradication, and recently is a cause for concern in Latin American and Caribbean (LAC) countries, due to its recent report in the Colombian Guajira. **Conclusion.** The deficient control, and ignorance of the traits of the pathogen and the disease, make necessary the development of research for its early diagnosis, management strategies, education measures, and / or promotion of contingency plans. Recently it was detected in Colombia, which implies high risk for the rest of the countries of the LAC region (with emphasis on Ecuador, Panama, and Venezuela), due to the constant flow of people (including tourists) and commercial transactions, being necessary in a way it is imperative to review the risk analysis in this new scenario.

**Keywords:** banana, disease, plantains, production, *Musa* AAB, *Musa* AAA.

## Introducción

Las musáceas comestibles (plátano o banano), por sus valores nutritivos, se ubican entre los principales alimentos y frutas producidas (148 millones de Tm en 2016); representan un alimento básico para más de 400 millones de personas a nivel mundial (Soto, 2011; FAO, 2017; Dita et al., 2018). La producción y superficie de las mismas se han incrementado a través de los años, y ante la evidencia de un cambio climático, que implica aumento de la temperatura, se espera un incremento del 50 % en el área sembrada de estos cultivos, en los trópicos y subtrópicos, para el año 2070 (Bubici et al., 2019).

Entre las principales limitaciones fitosanitarias en la producción de musáceas se encuentran Moko (*Ralstonia solanacearum*), Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) y marchitez por *Fusarium* (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) (*Foc*) (Dita et al., 2010; Zheng et al., 2018), esta última considerada entre las diez enfermedades vegetales más importantes en la historia de la agricultura, así como la más letal y peligrosa, al no existir control y perpetuarse en el suelo durante largo periodo (Moore et al., 1995; Buddenhagen, 2009; Li et al., 2015).

La marchitez por *Fusarium* a través de la raza 1 (R1), ha sido considerada como la primera epidemia causada por este patógeno, que originó pérdidas en el mercado internacional de banano a finales de la década de los 50, dominado por el clon Gros Michel (*Musa* AAA), siendo sustituido por clones Cavendish, los cuales aun están vigentes (Bubici et al., 2019), y representan 40 % de la producción mundial. Por cuanto, la repercusión económica de una segunda epidemia de la marchitez por *Fusarium*, causada en este caso por la raza 4 (R4), sería más dramática que la primera.

En la actualidad, esta nueva raza de *Foc*, raza 4, ataca los clones Cavendish y tiene una rápida propagación, estando presente en veinte países, de 135 productores de bananos; es motivo de preocupación a nivel global, con énfasis en la región de América Latina y el Caribe (FAO, 2017; Zheng et al., 2018; Bubici et al., 2019; García-Bastidas et al., 2019; ICA, 2019; Galvis, 2019; Rodríguez, 2019). Desde su primer reporte, en el sureste asiático en 1967, ha tenido transcendencia intercontinental, al reportarse en África en el año 2013 (Chittarath et al., 2018; Dita et al., 2018; Hung et al., 2018; Maymon et al., 2018; Zheng et al., 2018), y en el continente americano (García-Bastidas et al., 2019; ICA, 2019; Galvis, 2019; Rodríguez, 2019).

Este trabajo tuvo como objetivo reseñar el estado actual y rasgos significativos de esta enfermedad, e indicar riesgo de impacto potencial en países de América Latina y el Caribe ante su reciente reporte en Colombia.

## Agente causal de la enfermedad

La marchitez por *Fusarium* es una enfermedad causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f sp. *cubense* (*Fusarium odoratissimum*). Actualmente, según García-Bastidas et al. (2019), con capacidad de producir estructuras de resistencia (clamidosporas), constantemente liberadas al invadir el huésped, que puede o no mostrar síntomas visibles (Bai et al., 2013; Guo et al., 2015; Dita et al., 2018; Warman y Aitken, 2018). Las clamidosporas le permiten al patógeno adaptarse a condiciones extremas y perpetuarse en el suelo en ausencia de hospederos por más de veinte años, lo que limita su control (Moore et al., 1995; Buddenhagen, 2009).

El hongo puede colonizar malezas y otras plantas sin interés económico, y crecer saprofiticamente en desechos, lo que aumenta el potencial de producción de clamidosporas (Hennessy et al., 2005; Dita et al., 2018). Presenta cuatro razas (R1, R2, R3, R4), determinadas de acuerdo con los subgrupos de musáceas que afecta; también posee diferentes linajes evolutivos o grupos de compatibilidad vegetativa (VCG), que componen su población, conociéndose al menos veinticuatro (Ploetz, 2015; Dita et al., 2018). Puede diseminarse por distintos medios, a través de diferentes estructuras del patógeno (hifas, conidios, clamidosporas), para dar inicio a la enfermedad de carácter sistémico, que termina con la muerte de la planta.

## Inicio de la enfermedad

La enfermedad causada por *Fusarium oxysporum* f sp. *cubense* inicia cuando las clamidosporas latentes en el suelo germinan ante el estímulo de exudados de raíces de plantas hospederas. El micelio y los conidios se originan de seis a ocho horas después, con formación de nuevas clamidosporas entre dos a tres días después (Guo et al., 2015; Li et al., 2017). Por lo general, la infección se produce a través de raíces secundarias, terciarias o a través de heridas (Moore et al., 1995; Pérez, 2004; Dita et al., 2010; SAGARPA, 2012; Li et al., 2017). Al realizarse la penetración, una vez superadas las barreras del huésped, se producen microconidias e hifas gruesas, que se convertirán en nuevas clamidosporas en los espacios intra e intercelulares (Dita et al., 2018; Warman y Aitken, 2018). Diez días después, en los vasos del xilema, se pueden encontrar hifas que se desarrollaran en el xilema del rizoma, a lo largo de las uniones de las células epidérmicas de la raíz, e inclusive se pueden observar en la superficie de las raíces (Guo et al., 2015; Li et al., 2017).

Cuando la marchitez por *Fusarium* (*Foc*) alcanza la zona vascular de las raíces laterales, ocurre la infección del rizoma, obstruyendo los vasos xilemáticos e interfiriendo con la absorción de nutrientes y el transporte de agua hacia la parte superior (pseudotallo y hojas) (Guo et al., 2015; Li et al., 2017). Después de diecisiete días se observan gran cantidad de hifas en el pseudotallo, pudiendo morir la planta veinticuatro días después, liberándose gran cantidad de clamidosporas al suelo (Moore et al., 1995; Pérez, 2004; Dita et al., 2010; SAGARPA, 2012; Xiao et al., 2013; Li et al., 2017).

Durante la mayoría de los intentos por generar la infección del *Foc*, la entrada del patógeno puede ser bloqueada por la pared celular de las raíces, que además de representar una fuente de nutrientes para los patógenos, también es una barrera para acceder al interior (Cantu et al., 2008; Underwood, 2012).

En la pared celular se pueden desencadenar varias acciones como respuesta inmediata a la infección y que tienen impacto en la resistencia u otras defensas del huésped (Guo et al., 2015; Fan et al., 2017; Dita et al., 2018). De allí que, el desarrollo y la expresión de los síntomas en campo puedan variar.

## Hospederos

Se han identificado cuatro razas del patógeno, donde la raza 1 (R1) ataca clones de los subgrupos Silk (destaca banano Manzano, *Musa* AAB) y Gros Michel (*Musa* AAA). La R2 ataca clones del subgrupo Bluggoe, y la R4 con sus variantes tropical (R4T) y subtropical (R4ST), atacan todos los clones del subgrupo Cavendish, y aquellos susceptibles a R1 y R2, no existiendo clones naturales que puedan sustituir los actuales (Moore et al., 1995; Pérez, 2004; SAGARPA, 2012; Dita et al., 2018). Sin embargo, otras plantas deben ser consideradas como hospederos, tales como las malezas, que pueden estar en condición asintomática, lo que facilita la supervivencia de *Foc* (Hennessy et al., 2005; Dita et al., 2018). *Foc* R1 fue encontrado en *Paspalum fasciculatum*, *Panicum purpurescens*, *Ixophorus unisetus* (Poaceae) y *Commelina diffusa* (Commelinaceae) en América Central; mientras que, *Foc* RST4 se reportó en *Paspalum* spp., y *Amaranthus* spp. (Amaranthaceae) en Australia (Dita et al., 2018), y *Foc* RT4 se encontró en las raíces de *Chloris inflata* (Poaceae), *Euphorbia heterophylla* (Euphorbiaceae), *Cyanthillium cinereum* y *Tridax procumbens* (Asteraceae), que crecen en plantaciones de bananos infestadas en Australia (Hennessy et al., 2005).

El *Foc* puede sobrevivir como endófito en plantas distintas a las musáceas, y cuando el cultivo de banano es reiniciado en el área, las malezas pueden actuar como reservorio del inóculo (Hennessy et al., 2005). Bajo esta perspectiva, la práctica de cultivos de cobertura, como práctica de salud del suelo, control de malezas y prevenir la erosión, crea dudas ante la posibilidad de encontrar huéspedes secundarios del patógeno, siendo necesaria mayor investigación al respecto (Dita et al., 2018).

## Síntomas

Los síntomas externos, aparecen inicialmente como amarillamiento en los bordes de hojas viejas, que se extiende hacia las más jóvenes. Gradualmente colapsan, quedando colgadas de la base de la nervadura central alrededor del pseudotallo. Las hojas más jóvenes son las últimas en mostrar los síntomas y, frecuentemente permanecen erectas. También se pueden desarrollar grietas longitudinales en el pseudotallo. El desarrollo de la planta no se detiene por la infección y las hojas que emergen son más pequeñas y descoloridas.

La lámina de las hojas nuevas puede reducirse considerablemente y mostrar deformaciones. A nivel de los frutos, no se han observados síntomas o anomalías, excepto el tamaño de los dedos, que pueden afectarse como consecuencia de los daños desarrollados en las plantas (Moore et al., 1995; Pérez, 2004; SAGARPA, 2012; Dita et al., 2013; Ploetz, 2015).

Los síntomas internos constan de decoloración vascular, que inicia con amarillamiento en los tejidos vasculares de las raíces y del cormo, que se torna color café y avanza hacia los haces vasculares del pseudotallo, siendo indicativo de obstrucción de estos (SAGARPA, 2012; Dita et al., 2013; Ploetz, 2015). El sistema de monocultivo perenne, utilizado para el banano, propicia los ciclos continuos de la enfermedad, aumentando la acumulación de inóculo.

## Diseminación

A nivel de campo, al comienzo de la marchitez por *Fusarium*, las plantas infectadas pueden estar distribuidas al azar, pero a partir de ese momento el principal proceso de difusión se origina de planta a planta, pudiendo definir un patrón agregado, comúnmente visto en muchas áreas (Meldrum et al., 2013). La dispersión se produce por movimiento pasivo de propágulos del patógeno (Dita et al., 2018). A continuación, se indican las posibles vías:

## Material vegetal

El material vegetal es el medio más importante e implica altos riesgos a nivel local o regional (OIRSA, 2009; Dita et al., 2010; 2018). Adicionalmente, restos de plantas enfermas pueden ser utilizadas en compost o lixiviados, lo que genera sustratos contaminados.

Las plantas madres infectadas pueden contaminar a los retoños con las estructuras fúngicas que pueden estar en forma asintomática (Dita et al., 2018), pero representan una fuente de inóculo. La dispersión rápida de *Foc*, por hijos asintomáticos, fue determinante para la propagación de *Foc* R1 que devastó las bananeras de Gros Michel en el siglo pasado (Pérez, 2004; Dita et al., 2018; Bubici et al., 2019). Por cuanto el material de siembra ha sido y sigue siendo uno de los factores más importantes y determinantes para la difusión de la enfermedad (Dita et al., 2010; 2018; Bubici et al., 2019). Existe la posibilidad de otras vías de diseminación, al respecto Dita et al. (2018), señalaron que existen reportes sobre hallazgos de estructuras del patógeno en el peciolo y ADN en las hojas; mientras que Bubici et al. (2019), indicaron referencias sobre otras especies de *Fusarium*, que pueden ser diseminadas a través de las frutas, relacionándose con las medidas implementadas por Australia para el control de frutas proveniente de Filipinas, asumiendo que *Foc* RT4 podría moverse a través de infecciones asintomáticas en las coronas de los clúster o manos.

Adicionalmente cabe destacar que, en algunos países, las hojas y vainas secas del pseudotallo pueden ser utilizadas como envolturas de algunos alimentos o en artesanías.

## Agua

Las lluvias pueden originar salpicaduras que transportan propágulos del patógeno o suelo infectados, logrando la dispersión a corta distancia. Igual comportamiento se genera por las escorrentías, desbordamiento de canales o ríos (Dita et al., 2018). El incremento en el consumo de banano Cavendish y la disminución de su producción en China por *Foc* RT4, ha originado su expansión a nuevas áreas, aumentando el riesgo de introducción de esta enfermedad en otros países vecinos (Hung et al., 2018). Su rápida propagación en China ha sido asociada al material de siembra infectado y al agua de riego del río Pearl o su desbordamiento (Dita et al., 2018).

Con base en los análisis comparativos de la secuencia del genoma de *Foc* RT4 e interpretación filogeográfica, Zheng et al. (2018) llegaron a la conclusión que las cepas de Laos, Vietnam y Birmania, están genéticamente relacionadas y guardan similitud con la cepa de Yunnan, China; las cepas de Filipinas y Pakistán están muy relacionadas con posible origen en Filipinas; y las del Líbano y Jordania están relacionadas entre sí.

Un efecto indirecto del agua se da cuando plántulas *in vitro*, en condiciones de aclimatación en invernaderos, son regadas con agua contaminada con *Foc*, pudiendo comportarse como plantas asintomáticas que se venden y/o distribuyen como plantas sanas (Dita et al., 2018).

## Suelo

El *Foc* no se mueve a distancias significativas en el suelo sin la presencia de raíces hospedantes, materiales vegetales u otros agentes dispersantes; por cuanto el transporte de partículas de suelo que contengan propágulos *Foc*, a través de raíces, residuos de plantas infectadas, agua, viento, insectos, animales, herramientas, maquinaria, neumáticos, zapatos y otros equipos, es posible (Dita et al., 2018). De igual manera, es posible detectar niveles significativos del inóculo en el suelo adherido a los zapatos después de una visita de campo (Dita et al., 2018).

Los sustratos o enmiendas orgánicas utilizadas con plantas distintas a las musáceas, también pueden ser portadores del patógeno, tal como se ha evidenciado en Centroamérica en el sistema agroforestal café-bananos,

donde *Foc* R1 se dispersa a través de sustratos utilizados en plántulas de café. Por lo tanto, el creciente comercio de sustratos (incluye aquellos con las fibras de coco producidas en Asia) es potencialmente peligroso para la dispersión de *Foc* a niveles transcontinentales (Dita et al., 2018).

### Aire

Huracanes, ciclones, tifones o vientos intensos, pueden aumentar la diseminación de *Foc*, al transportar restos vegetales contaminados, agua, suelo, entre otros, pudiéndose convertir en un agente dispersante. No obstante, la producción y dispersión del inóculo aéreo de *Foc* en condiciones de campo, así como su potencial para infectar las musáceas a través de tejidos por encima del suelo, tienen que ser más investigados (Dita et al., 2018).

### Animales

En algunas zonas productoras de Australia, se han implementado campañas para reducir las poblaciones de cerdos, ya que son reconocidos como vectores de enfermedades fúngicas transmitidas por el suelo. De igual manera, no se puede obviar el papel potencial de roedores como ratas silvestres o topos, muy frecuentes en campos de América Central (Dita et al., 2018).

No menos importante son los nematodos y gorgojos; al respecto, estudios recientes indicaron que, estos últimos, pueden transportar esporas viables de *Foc* en sus exoesqueletos (Meldrum et al., 2013). Por cuanto, insectos como *Metamasius hemipterus*, deben ser tomados en cuenta, al igual que otros como los mosquitos (*Bradysia* spp.) que pueden ser vectores de *Fusarium* spp., en invernaderos y viveros (Dita et al., 2018).

### Elementos antropogénicos

Los riesgos de la introducción de *Foc* a través de factores antropogénicos son altos, basados en el movimiento de mercancías de origen vegetal, plantas, flores, artesanía, entre otros. Todo equipo agrícola, ropa, calzado, herramientas, contenedores, entre otros, utilizados en áreas infestadas con *Foc*, pueden transportar y difundir el patógeno en áreas libres de enfermedad (Dita et al., 2013; 2018; Bubici et al., 2019).

## Distribución mundial

*Foc* R4 se reportó por primera vez en Taiwán en 1967, en clones Cavendish (inicialmente confundida con la R1), pero fue hasta 1977 que se confirmó a través de pruebas de patogenicidad; en 1989 se indicó que la misma correspondía al VCG 01213. Al respecto, Zheng et al. (2018) señalaron que este primer reporte fue originado por plantas infectadas provenientes de Sumatra (Indonesia), lo cual indica esta última zona como punto de origen de la enfermedad.

Diversos reportes con sintomatología similares en clones Cavendish fueron indicados en Filipinas en 1970, en Australia entre 1977 y 1999 (en zonas cercanas a Darwin en la región norte), y a partir de 1990 en Indonesia y Malasia (Molina et al., 2009; Hermanto et al., 2010). Se considera posible que la expansión de la enfermedad en esos países se originó por movimiento de material infectado y migraciones de productores.

Para finales del año 2000, la enfermedad se encontraba en Java, Sumatra, Sulawesi, Halmahera, Borneo, provincia de Papua, Nueva Guinea, isla de Mindanao en Filipinas, territorio norte de Australia y en China continental (áreas cercanas al Delta del río Pearl, Guangdong, donde se presume que fue introducida desde Taiwán).

Desde entonces los reportes se han incrementado de manera exponencial (Molina et al., 2009; Hermanto et al., 2010; Vézina, 2019).

En el año 2013, se reportó la presencia de *Foc* R4 en Jordania y Mozambique, lo que implicó que por primera vez se reportara su incidencia fuera de la región del Sureste de Asia y el Pacífico (Ordoñez et al., 2015; Ploetz, et al., 2015; Vézina, 2019). Extraoficialmente se observaron plantas con síntomas típicos de la enfermedad entre los años 2013 y 2014 en Pakistán y Líbano, pero el reporte oficial se emitió para el año 2015 (Ordoñez et al., 2015; Vézina, 2019). Ese mismo año, de manera extraoficial, se reportaron plantas con síntomas similares a *Foc* RT4 en India, en el estado de Bihar, y posteriormente, en los estados de Uttar Pradesh, Madhya Pradesh y Gujarat, lo cual se confirmó oficialmente en 2017 (Damodaran et al., 2018; Thangavelu et al., 2019). En 2016 fue señalada en Laos e Israel, y en el 2018 en Birmania (Zheng et al., 2018) y en año 2019 en la zona de la Guajira colombiana, Colombia (AUGURA, 2019; Galvis, 2019; García-Bastidas et al., 2019; ICA, 2019; Rodríguez, 2019).

### Impacto potencial en América Latina y el Caribe (LAC)

El primer reporte de *Foc* a nivel mundial fue en 1874 en Australia, a través de la R1, se reportó dieciséis años después (en 1890) en el continente americano (Molina et al., 2009). A partir de allí, transcurrieron 69 años (hasta 1959) para que el mercado internacional de banano sucumbiera por la raza 1, lo que hizo necesario el uso de clones Cavendish. Desde ese momento y hasta el primer reporte de un ataque de *Foc* a estos nuevos clones por una nueva raza (R4), en 1967, transcurrieron ocho años, coincidiendo con Dita et al. (2018), quienes indicaron que, por lo general, los cultivares resistentes son efectivos por menos de diez años. A partir del primer reporte de la R4 y hasta el primer reporte de su presencia en latitudes fuera de la región donde se originó (región asiática) en 2013, transcurrieron 46 años, y desde ese momento hasta su último reporte en 2018, pasaron cinco años.

Las medidas de contención de la enfermedad funcionaron hasta el momento de ser doblegadas por el tránsito indiscriminado de material contaminado (vegetal, suelo, agua, entre otros). A lo cual se le debe sumar la gran expansión de la superficie sembrada de clones Cavendish en sistemas de monocultivo, conjuntamente con la ausencia de conocimientos básicos del patógeno y la enfermedad, falta de medidas de cuarentena y/o planes de contingencia, que han conllevado a un comportamiento casi exponencial en su diseminación.

Una vez que *Foc* R4 llegue a una finca libre de enfermedades, la epidemia se podría desarrollar con dinámicas de propagación similares a las de *Foc* R1 (Ploetz et al., 2015; Dita et al., 2018; Bubici et al., 2019), siendo eminente el poder destructivo que representa esta raza, tanto en los países donde la enfermedad ya está presente (aun extendiéndose), como en los que todavía están libres de ella, con énfasis en países productores de la región de LAC.

El impacto de esta nueva raza en la producción de banano ha sido grande, al punto que antes de 1970, en Taiwán, se reportaban 50 000 ha de banano Cavendish para exportación, y se redujo a 5000 ha a principio de 1970, de las cuales 4000 ha estaban severamente afectadas por la enfermedad (Su et al., 1986; Molina et al., 2009; Vézina, 2019). Para el año 2017, la región de LAC ocupó el tercer lugar en superficie sembrada y producción de musáceas comestibles y primer lugar en exportación de bananos (FAOSTAT, 2019). En ella se cultivan aproximadamente 2,23 millones de hectáreas, de las cuales 1,23 millones corresponden a clones Cavendish. Mientras que del total de la producción (41 millones de Tm), 30 millones Tm fueron de banano (FAOSTAT, 2019). La región de LAC aporta aproximadamente el 28 % de la producción global y más de 80 % de exportaciones de banano (Bubici et al., 2019), contribuyendo con la seguridad alimentaria, generación de empleos e ingresos (OIRSA, 2009).

La marchitez por *Foc* ha tenido un impacto en ciertos sistemas de producción más que otros, dependiendo del clon cultivado, lo cual define la raza de *Foc* que ataca en el mismo (Dita et al., 2013). Los sistemas particularmente afectados por la R1, son monocultivos basados en Prata (*Musa* AAB) en Brasil, Isla y Palillo (*Musa* AAB) en Perú, y plantaciones de banano en asociación con cultivos de café y cacao. De igual manera, en ciertas regiones de Colombia aún domina el clon Gros Michel como monocultivo o en asocio.

A partir de la epidemia de *Foc* R1, no solo Gros Michel (*Musa* AAA) fue reemplazado por clones Cavendish, también muchas áreas de Prata Ana (*Musa* AAB) en Brasil, y banano manzana (*Musa* AAB), al igual que muchos Bluggoe (*Musa* ABB) fueron reemplazados por Pelipita (*Musa* ABB), también resistente a Moko (*Ralstonia solanacearum*, raza 2) (Dita et al., 2013).

Al predominar los clones Cavendish en el mercado internacional, la atención sobre problemas patológicos como marchitez por *Foc* desaparecieron, y ocupa mayor importancia la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) (Ploetz, 2015). A partir del momento que se detectó la rápida propagación de *Foc* TR4 y su letal acción sobre el cultivo, la marchitez por *Foc* ha quedado como el principal problema sanitario (Bubici et al., 2019).

En la actualidad, bananos del subgrupo Cavendish cubren la mayor área global y el mercado internacional (casi en su totalidad), por cuanto la evidente expansión geográfica de la RT4, con su potencial efecto perjudicial, se conjugan sobre la premisa que los factores que contribuyeron con la expansión de la R1, están vigentes en la actual epidemia en Asia (RT4) (OIRSA, 2009; Dita et al., 2010; 2013; Ploetz, 2015; Warman y Aitken, 2018; Zheng et al., 2018).

Existe la posibilidad que el patógeno de *Foc* RT4 pueda ser diseminado por vías distintas a las tradicionales, basados en el hecho que plantas de cultivo *in vitro* provenientes de Israel y sembradas en Jordania, originaron los primeros brotes de la enfermedad en campo (Ploetz et al., 2015). Se asume que dichas plántulas *in vitro* deberían estar libres de patógeno, pero muy vulnerables al sembrarlas en suelos contaminados. Bajo esta premisa, no existen evidencias que la enfermedad causada por *Foc* RT4 fuera proveniente de Israel, pero si existen reportes sobre otras especies de *Fusarium* que pueden ser diseminadas a través de las frutas (Ploetz et al., 2015). Por lo que, se requiere de más información sobre como *Foc* RT4 se disemina a largas distancias en términos intercontinentales, así como su posible movimiento a nivel de frutos (Ploetz et al., 2015).

La reducción significativa de la producción del clon Gros Michel a nivel mundial, debido a *Foc* R1, ha sido indicativo de la amenaza que representa el patógeno, situación que se complica al considerar la compleja naturaleza de este, que implica su grado de supervivencia en el suelo y el amplio rango de hospederos que presenta la RT4, que podría conllevar a disponer de pocas áreas libres del patógeno para establecer nuevas plantaciones (OIRSA, 2009).

Ante la reciente declaratoria de emergencia sanitaria por brotes de *Foc* RT4 en la Guajira colombiana (Colombia), se plantea posible impacto y riesgos para la industria bananera en países de América Latina y el Caribe (LAC), así como la seguridad alimentaria de millones de personas que dependen de la producción de los pequeños agricultores (OIRSA, 2009; Dita et al., 2010; 2013; Ploetz, 2015; Warman y Aitken, 2018; Zheng et al., 2018; AUGURA, 2019; García-Bastidas et al., 2019; ICA, 2019; Rodríguez, 2019). Históricamente en la región de LAC, los productores ante la incidencia de las R1 y R2, han adoptado medidas de manejo (agricultura migratoria, siembras anuales escalonadas, siembras en tierras vírgenes libre del patógeno), que les permite cultivar clones susceptibles; sin embargo, estas prácticas solo permiten sembrar por periodos cortos, debido a la dinámica poblacional del hongo y fallas en el manejo de la enfermedad (OIRSA, 2009).

Nuevas tecnologías como plántulas *in vitro*, herramientas de diagnóstico, manejo anual del cultivo, uso de materia orgánica (para incrementar poblaciones de microorganismos benéficos que puedan competir con el patógeno y lograr un grado de supresión de la enfermedad), así como algunos resultados promisorios obtenidos con el control biológico, combinados con la búsqueda de clones resistentes o tolerantes al patógeno, podrían ser incorporadas para consolidar el manejo integrado de la enfermedad.

Diversas acciones de investigación, promoción e información, se han desarrollado a través de organismos internacionales como el Organismo Regional Internacional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA), Red Latinoamericana y del Caribe para la Investigación y Desarrollo de las Musáceas (MUSALAC), Organización Mundial de Investigación y Desarrollo de la Biodiversidad Agrícola (BIOVERSITY), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), entre otras, y han sido implementadas para tratar de monitorear los movimientos de la enfermedad en tiempo

real, activación de plan de contingencia, evaluación de posibles estrategias de control que incluyen materiales promisorios y lograr estructurar el manejo integrado de la enfermedad.

No obstante, aun cuando *Foc* R4T es reconocido como una amenaza a escala global para las musáceas, solo tres países: Australia en 2015, Israel 2016 y Colombia 2019, han reportado la presencia de este, y han tomado y ejecutado medidas eficientes para contener su avance dentro del área afectada (Rodríguez, 2019).

Gracias a estas acciones y esfuerzos, se ha logrado la contención y erradicación del primer brote de *Foc* R4T en el continente americano (Colombia), declarado oficialmente el 26 de junio de 2019 (AUGURA, 2019; ICA, 2019), y se activaron las alarmas en países productores de la región, con énfasis en Ecuador, Panamá y Venezuela.

A partir de este momento, se realizaron recorridos y visitas a la zona occidental de Venezuela, colindante con Colombia, donde se pudo constatar ausencia de síntomas sospechosos o similares a los correspondientes a *Foc* R4T en plátano, banano y Bluggoe (Martínez y Rey, comunicación personal, 2019).

### Alternativas de manejo de la enfermedad

Algunos productos, como carbendazim pueden tener cierto efecto sobre el patógeno, debido a su compleja naturaleza y aspectos epidemiológicos, donde destaca: 1) capacidad de supervivencia (más de veinte años) en el suelo en ausencia de hospederos, 2) patógeno vascular que puede escapar del contacto de productos de control (fungicidas, entre otros), 3) diseminado a través de distintos medios (material vegetal, agua, suelo, hombre, otros), 4) sistemas de producción en monocultivo de banano Cavendish (Bubici et al., 2019). Por cuanto, *Foc* recoloniza rápidamente el área, siendo necesario otras medidas, bajo la premisa que su eliminación total no existe. De acuerdo con Dita et al. (2018), estas medidas pueden variar según cuatro escenarios: (i) ausencia de *Foc*, (ii) primera incursión de *Foc*, (iii) bajo prevalencia de *Foc* y, (iv) alta prevalencia de *Foc*. Bajo estas consideraciones, a continuación, se indican las medidas más recomendables:

1. Exclusión: adoptar medidas de exclusión para prevenir la entrada de patógenos, es imperativo ante la premisa de ausencia de *Foc* en una región. Por cuanto es lo más recomendable en la región de LAC, y otros países donde no está presente la enfermedad. Por lo que, es necesario implementar medidas preventivas de carácter local, regional, nacional, y continental, para evitar la entrada de patógenos y prevenir o retrasar la entrada de *Foc* TR4 (Dita et al., 2018). Sin embargo, estas medidas son extremadamente dependientes de las herramientas de diagnóstico, sensibilización, preparación y un asesoramiento con marco legal, apoyado por las organizaciones de protección fitosanitaria nacionales y regionales (Dita et al., 2013; Dita et al., 2018).

Una vez que *Foc* RT4 se establece en un área, las tácticas de exclusión ya no son efectivas, pero las medidas de contención deben ser implementadas. El manejo de la enfermedad se puede adoptar ante una baja presión de la enfermedad, pero en una condición de alta prevalencia de esta, las medidas de contención son ineficientes y el manejo integrado de la enfermedad puede ser cuestionable (Dita et al., 2018; Bubici et al., 2019).

Desafortunadamente aún faltan herramientas rápidas y eficientes para detectar las cepas de *Foc* relacionadas con la enfermedad causada por la raza 4 de este patógeno, como un método genérico de diagnóstico independientemente del VCG al que pertenece, lo cual mejoraría las medidas de bioseguridad y cuarentena para apoyar estudios epidemiológicos y, consecuentemente tácticas de manejo (Dita et al., 2018).

2. Cultivares resistentes: fuentes de resistencia a *Foc* TR4 han sido encontradas entre parentales silvestres de musa, tales como *Musa basjoo*, *M. itinerans*, *M. yunnanensi*, *M. nagensium*, *M. ruiliensis* y *M. velutina*, y en clones Pahang (*Musa* AA) y Calcutta 4 (AA). Mientras que, en parentales de los bananos actuales, tal como *M. Balbisiana* y *M. acuminata* sp. *burmannica*, se observó mayor intensidad de la enfermedad (Li et al., 2015; Zuo et al., 2018).

Pruebas de campo en China revelaron que los híbridos FHIA-01, FHIA-02, FHIA-18, FHIA-25 y FHIA-03, así como los materiales Pisang Jari Buaya, Rose (AA) y GCTCV-119, mostraron resistencia a *Foc* RT4 (Vézina, 2019).

Por cuanto el uso de cultivares resistentes sería lo más indicado para manejar esta enfermedad una vez establecida en un área. Sin embargo, algunos atributos de las frutas, pueden no coincidir con las exigencias y demandas del mercado, y el hecho que su resistencia podrá ser superada por nuevas cepas patógenas (Ploetz, 2015; Dita et al., 2018), tal como ha sucedido con la R4 y clones del subgrupo Cavendish, los cuales han tenido enorme impacto en la industria bananera, al lograr mantener efectiva resistencia ante la R1 de *Foc*, durante sesenta años. En la actualidad pocos clones con características similares a Cavendish y resistentes a *Foc* TR4 están disponibles. Los somaclones Cavendish GCTCV-218 y GCTCV-219, de sabor y aspecto similar a Cavendish, han sido desarrollados en Taiwán, con resistencia intermedia a *Foc* TR4, los cuales son aceptados en el mercado regional, y los mismos, recientemente, se han plantado en Mozambique (Dita et al., 2018). Lamentablemente no están disponibles para la región LAC.

Existen argumentos convincentes para utilizar la transformación genética y crear genotipos resistentes, especialmente cuando se trata de bananos de exportación similares a Cavendish, los cuales son difíciles de mejorar convencionalmente, pero la aceptación de bananos genéticamente modificados a nivel de mercado no está clara (Ploetz et al., 2015).

3. Uso plántulas de cultivo *in vitro*: considerando que el principal medio de dispersión de la enfermedad es a través de material de siembra infectado, el uso de plántulas *in vitro* es lo más recomendado. Sin embargo, estas plántulas han demostrado ser más susceptible a la marchitez por *Fusarium* una vez instaladas en campo, que las provenientes por propagación convencional (Smith et al., 1998), lo cual se debe a que a través de la biotecnología, se realiza una limpieza total del material y se eliminan microorganismos benéficos que pueden contribuir a retrasar, minimizar o bloquear el efecto de *Foc*, quedando las plántulas vulnerables (Dita et al., 2018).

A nivel de la rizosfera existen comunidades de microorganismos benéficos y/o dañinos, que deben estar en equilibrio constante para no desencadenar situaciones ambiguas en la planta, que conlleven a cuadros patológicos. Es necesario reconstruir el microbioma de las plántulas *in vitro* con organismos benéficos antes de la siembra, para activar el sistema de defensa de estas (Dita et al., 2018; Durán et al., 2018).

Se recomienda que los pequeños productores usen semillas o material de propagación a partir de plantas madres sanas, cuyos orígenes estén basados en plantas madres libres de enfermedades (*in vitro*) o de procedencia conocida que puedan garantizar su pureza clonal y/o excelente estado sanitario, que contribuyan a la creación de plantas de producción de semilla de fundación.

4. Eliminación *in situ* de plantas infectadas (contención): una vez que se establece *Foc* en un campo, las estrategias de manejo de la enfermedad deben estar dirigidas a evitar su propagación. Lo más indicado es el exterminio *in situ* de plantas infectadas o sospechosas, tratando en lo posible la mínima perturbación o remoción del sitio. La aplicación de gran cantidad de urea en ambientes anaeróbicos para tratar material vegetal infectado, ha sido implementada recientemente (Dita et al., 2018), a fin de reducir el impacto ambiental con la práctica tradicional, a través del uso de biocidas sistémicos como glifosato o productos similares (incluye hidrocarburos).

En todos los casos, una vez realizada la eliminación de estas plantas, el análisis de riesgo de movimiento de patógenos en nuevas áreas se puede basar en: la aplicación de prácticas de bioseguridad en la finca y en todo el perímetro, y es necesario: (1) minimizar el acceso de visitantes a la finca, (2) los zapatos y herramientas utilizados por los empleados y visitantes deben permanecer en la finca, (3) minimizar el movimiento de suelo y agua de áreas contaminadas, (4) pediluvios o áreas con desinfectantes adecuados disponibles en puntos estratégicos en las plantaciones y empacadoras, (5) reforzar el diagnóstico de enfermedades, epidemiología y bioseguridad en la finca, y (6) mantener comunicación con entes oficiales de bioseguridad o sanidad vegetal, para reportar cualquier caso sospechoso o ruptura de canales de contención (Dita et al., 2018).

5. Manejo de suelos: suelos drenados y aireados reducen la enfermedad, al mejorar el desarrollo radicular y la actividad microbiana (Dita et al., 2018; Bubici et al., 2019). La rizosfera alberga gran cantidad de microorganismos, que se involucran en interacciones complejas, incluyendo la microbiota de la raíz. Avances significativos en la

comprensión de la relación planta funcional y microbioma del suelo, muestran que los suelos supresores albergan comunidades únicas de microorganismos con mayor riqueza y diversidad (Shen et al., 2015; Köberl et al., 2017).

El microbioma del suelo y la planta, al ser modificados, pueden afectar la incidencia de marchitez por *Fusarium*, ya sea mediante la creación de ambientes supresores en el suelo o por obstaculizar la penetración del hospedador y la colonización (Dita et al., 2018).

Pueden existir muchas variaciones en poblaciones de hongos asociados a las raíces de *Arabidopsis thaliana* en relación con las áreas muestreadas, mientras que las poblaciones de bacterias mantienen su estructura constante, lo que sugiere la existencia de una competencia entre ambos grupos por acceder al nicho radicular, y las bacterias ejercen funciones importantes dentro de la salud vegetal, al restringir el crecimiento de hongos en las raíces (Durán et al., 2018).

Se ha logrado identificar la cepa NJN-6 de *Bacillus amyloliquefaciens*, que mostró inhibición significativa de *Foc in vitro*, la cual, al ser combinada con compost, mostró resultados positivos para reducir la marchitez causada por *Foc* TR4 en China, observándose que la aplicación continua cambió la composición de la rizosfera y la comunidad microbiana al aumentar la diversidad bacteriana (Shen et al., 2015; Xue et al., 2015).

En suelos supresivos, se pueden encontrar una microbiota activa y funcionalmente diversa, que debería tener mayor capacidad para suprimir la enfermedad (Dita et al., 2018). En estos suelos se puede encontrar mayor riqueza e índices de diversidad, así como unidades taxonómicas más operativas y mayor cantidad de colonias, en comparación con los suelos propicios para la enfermedad (Shen et al., 2015).

De igual manera, se ha logrado identificar a *Bacillus* spp. como el grupo bacteriano más dominante en un suelo supresivo, seguido de *Rhizobium*, *Bhargavaea*, *Pseudolabrys* y *Sinorhizobium* (Xue et al., 2015). Se ha observado mayor riqueza y diversidad de *Gammaproteobacteria* en plantas sanas en áreas sembradas de banano, en dos países de América Central, además de un aumento poblacional de *Pseudomonas* y *Stenotrophomonas*, lo cual representan herramientas para redireccionar el control biológico de la enfermedad (Köberl et al., 2017).

El manejo de la materia orgánica (MO) es esencial para la salud del suelo y supresión de enfermedades, la misma se puede agregar a través de residuos de cultivos o compost, y pueden ser altamente enriquecidas con microorganismos específicos y aplicadas en diferentes dosis y sitios donde se ha presentado la enfermedad (Larkin, 2015; Dita et al., 2018). No obstante, existen riesgos en el manejo de la MO. La aplicación de estiércol de pollo, sin la debida descomposición, puede aumentar la incidencia de la marchitez en banano, atribuido a mayor daño de la raíz, por efecto de altas temperaturas, producto de la descomposición de este tipo de estiércol, que conlleva a un menor pH del suelo y fuente de N, que actúan como factores predisponentes para la enfermedad (Bonanomi et al., 2010; Dita et al., 2018).

En la fumigación con amoníaco o similares, posterior a la aplicación de biofertilizantes, se ha observado reducción significativa en las diversidades bacterianas y fúngicas, consecuentemente la incidencia de la enfermedad en aproximadamente el 55 %, e incremento de la biomasa, en comparación con la aplicación de estiércol de vaca en suelos no fumigados (Shen et al., 2019). Después de la biofertilización, los microbios beneficiosos como *Paenibacillus*, *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, se enriquecen significativamente con la fumigación con amoníaco y la aplicación de biofertilizantes; además, la fumigación y la biofertilización aumentan significativamente el pH del suelo y los contenidos de nutrientes (Shen et al., 2019). Adicionalmente a estas prácticas, varios autores han indicado que el silicio (Si), puede contribuir a mejorar las propiedades mecánicas y fisiológicas de las plantas, y ayuda a que las mismas superen estreses bióticos y abióticos, e induce a la activación de resistencia mecánica general mejorada y la creación de una capa protectora externa (Luyckx et al., 2017; Wang et al., 2017).

El silicio es captado a través de las raíces como ácido silícico [ $\text{Si}(\text{OH})_4$ ]; pasa a través de la membrana plasmática, siendo depositado principalmente en las paredes celulares (Wang et al., 2017). Esta resistencia inducida con Si, se asocia a barreras físicas (cera, cutículas y paredes celulares), que inhiben la penetración de patógenos y hacen que las células vegetales sean menos susceptibles a la degradación enzimática causada por la invasión de patógenos fúngicos (Ma, 2004; Luyckx et al., 2017).

La acumulación de Si en el tejido epidérmico, conlleva a la formación de complejos con compuestos orgánicos en las paredes celulares, que contribuyen a regular la penetración a través de activación o expresión de genes relacionados con la limitación de la invasión y colonización de patógenos, logrando aumento de la resistencia de la planta mediante la activación de múltiples vías de señalización y defensa (Ma, 2004; Wang et al., 2017). En estos procesos, se involucra la síntesis de pectinas y polifenoles, así como una serie de enzimas como quitinasa, peroxidasa, polifenoloxidasas, b-1,3-glucanasa, fenilalanina amoniaco liasa, hiperóxido dismutasa, ascorbato peroxidasa, glutatión reductasa, catalasa, lipoxigenasa y glucanasa, que pueden inducir la producción y acumulación de compuestos antimicrobianos (fenoles, flavonoides, fitoalexinas y proteínas); donde además la lignina y el metabolismo secundario fenólico juegan un papel importante (Luyckx et al., 2017; Wang et al., 2017).

Los fertilizantes sintéticos, fuentes y niveles aplicados, no solo pueden influir en los rendimientos, sino también en la intensidad de las enfermedades (Dita et al., 2018). En el caso de *Foc*, esta condición puede ser más compleja, debido al impacto directo en el hábitat del patógeno, como variaciones en el pH del suelo. Mayores niveles de marchitez en banano se asocian consistentemente con valores de pH más bajos (Domínguez et al., 2001; Dita et al., 2018).

El nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) aumenta el pH cerca de la rizosfera, contribuye a aumentar el contenido de la lignina y mejora la absorción de nutrientes relacionada con la resistencia, y mantiene mayor tasa fotosintética y alta resistencia a patógenos (Dong et al., 2016; Dita et al., 2018). Otros elementos, como la baja disponibilidad de fósforo en el suelo, se asocian con alta incidencia de la marchitez; mientras que plantas deficientes en potasio son más susceptibles a las enfermedades.

El calcio y el magnesio parecen reducir la marchitez por *Foc* en banano, y los efectos son comúnmente asociados al aumento de los valores de pH (Dita et al., 2018). Mientras que mayor contenido de hierro podría promover la germinación de esporas *Foc* y aumentar la severidad de la enfermedad (Domínguez et al., 2001). Con relación al zinc (Zn), se indica un posible papel de este elemento en la mejora de la formación de tilosa, que conforma barreras físicas que obstruyen el paso del patógeno hacia el rizoma, se puede observar mayor severidad de la enfermedad en condiciones deficientes del mismo (Borges et al., 1983).

Los nutrientes minerales pueden aumentar o disminuir la resistencia a plagas y patógenos, debido a su efecto en el crecimiento, morfología, anatomía y, particularmente, en la composición química de las plantas (Yamada, 1995). La resistencia en la planta puede aumentar mediante cambios en la anatomía (células epidérmicas más gruesas, mayor grado de lignificación) y en las propiedades fisiológicas y bioquímicas (mayor producción de sustancias inhibitoras); es el resultado de: 1) una eficiente barrera física que evita la penetración de las hifas en una cutícula gruesa y lignificada, 2) mejor control de la permeabilidad de la membrana citoplasmática, evitando la salida de azúcares y aminoácidos (fuente nutricional para los patógenos) hacia el apoplasto o espacio intercelular, y 3) formación de compuestos fenólicos con distintas propiedades fungistáticas. Estas prácticas y acciones en los suelos toman tiempo y se pueden acumular a través de años sucesivos, aumentando el control de plagas y enfermedades, y mejorando la productividad; pero desafortunadamente muchos agricultores operan con soluciones de respuesta rápida como la aplicación de pesticidas, herbicidas o fertilizantes altamente solubles (Bubici et al., 2019).

6. Rotación de cultivos: es una práctica ampliamente utilizada para controlar patógenos transmitidos por el suelo en cultivos anuales. Cultivos con oportunidades inmediatas de mercado en algunas regiones, como la yuca (*Manihot esculenta*), la anona (*Annanas squamosa*) o especies de plantas con diferentes usos o propósitos como el cebollín chino (*Allium tuberosum*), han sido utilizados con diferentes niveles del éxito (Buddenhagen, 2009; Huang et al., 2012; Zhang et al., 2013; Wang et al., 2015).

Se ha observado que la rotación con arroz reduce la marchitez por *Foc* entre 8,1 a 17,6 % después de un año, y de 0,8 a 6,3 % después de 2,5 a 3 años, comparado con un nivel inicial de 30 a 50 % (Bubici et al., 2019). La población *Foc* R4 en la capa superior del suelo (20 cm) fue indetectable después del tratamiento; sin embargo, en otros casos, esta práctica utilizando los cultivos frijol terciopelo y sorgo, no han dado resultados positivos, que

puedan ser comparables a los obtenidos con el cultivo caña de azúcar, que era utilizado como cultivo de sucesión en Taiwán, pero que no fue recomendada como estrategia a largo plazo (Dita et al., 2018).

La rotación de cultivos podría tener un efecto directo, al reducir el inóculo de *Foc* en el suelo y crear un ambiente supresivo o un efecto indirecto al reducir o eliminar malezas con o sin síntomas (Huang et al., 2012; Zhang et al., 2013; Wang et al., 2015). No obstante, es importante considerar la capacidad de *Foc* para colonizar otros cultivos.

7. Cultivos de cobertura: los cultivos de cobertura pueden ayudar a manejar malezas, plagas y enfermedades, y también aumentar el rendimiento (Dita et al., 2018; Bubici et al., 2019). Se pueden utilizar antes de plantar, ya sea entre siembras o incluso como especies perennes cultivadas con banano. El maní pinto (*Arachis pintoï*) como cobertura, redujo 20 % la intensidad de marchitez por *Fusarium* en bananos, además, se generó efecto positivo en el rendimiento a través del incremento del peso del racimo (Dita et al., 2018).

Los cultivos de cobertura pueden afectar algunas propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los suelos, y también pueden ser influenciados por el medio ambiente. Por lo tanto, la selección de especies o variedades apropiadas, la plantación, la tasa y el manejo, deben determinarse experimentalmente. En cada situación se debe tomar en consideración que algunas de las especies utilizadas para estos fines, eventualmente pueden actuar como hospederos de *Foc*.

8. Riego y drenaje: el uso de sistema de riego basado en altos volúmenes de agua, a través de canales (riego por gravedad) y/o ausencia de drenaje eficiente, favorecen el desarrollo de la enfermedad, así como su intensidad, por cuanto deben ser considerados.

9. Manejo integrado: el manejo integrado de plagas (MIP) es una forma sólida de entender y manejar la complejidad de los agroecosistemas. En el caso de sistemas donde se involucra un patógeno del suelo, el manejo integrado es importante dentro del contexto de los sistemas de cultivos. Sin embargo, identificar las prácticas alternativas a ser utilizadas, sus componentes e integración, no es tarea fácil, principalmente como vanguardia en plantaciones comerciales.

Aún cuando opciones de control basadas en fungicidas e inductores de resistencia pueden ser efectivas en pruebas *in vitro* y en condiciones de invernadero, sus validaciones en campo deberán abordar no solo la respuesta a la enfermedad a corto plazo, sino además como incide en la rizosfera y microbioma vegetal (Dita et al., 2018; Bubici et al., 2019).

Este enfoque debe ser probado ampliamente en diferentes contextos, teniendo en cuenta el estado de la marchitez por *Fusarium* (todas las razas), la diversidad de cultivares y los sistemas de cultivo.

Para apoyar estas estrategias, los análisis de riesgo de plagas son de alta prioridad si finalmente se detecta un brote de Marchitez por *Foc*, entonces, un plan para la erradicación de plantas y la contención de patógenos deben ser activados. El monitoreo continuo para la detección temprana es esencial.

Una vez que la enfermedad está presente, el uso de cultivares resistentes (si están disponibles) y tácticas para suprimir el patógeno e impulsar las defensas de la planta, son fundamentales. Al mismo tiempo, la exclusión y la contención no deben ser descuidadas, ya que contribuyen a disminuir la dispersión de patógenos y la intensidad de la enfermedad. Con el tiempo, las epidemias de la marchitez por *Foc* alcanzan niveles donde el manejo de la enfermedad es económicamente impracticable.

En esta situación, la erradicación de la parcela y la rotación de cultivos, son inevitables, a menos que existan cultivares resistentes. Finalmente, las tácticas de manejo no solo deben centrarse en la marchitez por *Foc*, sino también en la productividad sostenible y seguir el principio de un proceso continuo de mejora.

## Conclusiones

Históricamente en la región de LAC, por la persistencia de la R1 en Gros Michel y Manzano, así como la R2 en Bluggoe, los factores que condicionaron y determinaron la epidemia de la R1 de Foc, en la década de los cincuenta, aún están vigentes y presentes, y sumado a esta condición, la dependencia de los sistemas de producción y mercado internacional de clones Cavendish, así como el acelerado proceso de evolución de Foc, hacen que la R4T represente el principal problema de las musáceas, y pone en riesgo la seguridad alimentaria.

En la actualidad, *Foc* R4T se ha diseminado en diferentes continentes, causando pérdidas multimillonarias; y recientemente fue identificada en Colombia (oficialmente junio del 2019), en la zona de la Guajira, lo cual implica que todos los países de la región LAC, con énfasis en Ecuador, Panamá y Venezuela, se encuentran en estado de máximo riesgo, debido al flujo constante de personas (incluye turistas) y transacciones comerciales, con especial atención los provenientes del continente asiático, siendo necesaria de manera imperativa una revisión de los análisis de riesgo ante el nuevo escenario.

De acuerdo con visitas e inspecciones realizadas, conjuntamente con el ente oficial de sanidad vegetal (INSAI), en la zona occidental de Venezuela (colindante con Colombia), no se evidenció ninguna planta con síntomas típicos de la enfermedad, siendo necesario la activación de planes de monitoreo permanente.

Ante el desconocimiento de rasgos del patógeno y la enfermedad, urge el desarrollo de investigaciones para el diagnóstico temprano y estrategias de manejo, así como implementar medidas de educación y/o promoción sobre posibles planes de contingencia, las cuales han sido apoyadas por diversos organismos (BIOVERSITY, MUSALAC, FAO, OIRSA, entre otras), a nivel global, a través de autoridades e instituciones locales o nacionales, relacionadas con sanidad vegetal. Paralelamente, se evidencia la necesidad de información hacia los productores.

## Literatura citada

- AUGURA (Asociación de bananeros de Colombia). 2019. Augura intensificó medidas de control y prevención ante sospecha de presencia del hongo *Fusarium* R4T en Colombia alertado por el ICA. AUGURA, COL. <https://www.augura.com.co/comunicaciones/noticias/boletin-augura-ante-alerta-fitosanitaria/> (consultado 20 ago. 2019).
- Bai, T.T., W.B. Xie, P.P. Zhou, Z.L. Wu, W.C. Xiao, L. Zhou, J. Sun, X.L. Ruan, and H.P. Li. 2013. Transcriptome and expression profile analysis of highly resistant and susceptible banana roots challenged with *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4. PLoS ONE 8:e73945. doi:10.1371/journal.pone.0073945
- Bononomi, G., V. Antignani, M. Capodilupo, and F. Scala. 2010. Identifying the characteristics of organic soil amendments that suppress soilborne plant diseases. Soil Biol. Biochem. 42:136-144. doi:10.1016/j.soilbio.2009.10.012
- Borges, A., I. Trujillo, F. Gutiérrez, y D. Angulo. 1983. Estudio sobre el Mal de Panamá en las Islas Canarias. II-Influencia de los desequilibrios nutritivos P-Zn y K-Mg del suelo, en la alteración de los mecanismos de resistencia de la platanera (*Cavendish enana*) al Mal de Panamá. Fruits 38:755-758.
- Bubici, G., M. Kaushal, M.I. Prigigallo, C. Gómez-Lama, and J. Mercado-Blanco. 2019. Biological control agents against *Fusarium* wilt of banana. Front. Microbiol. 10:616. doi:10.3389/fmicb.2019.00616
- Buddenhagen, I.W. 2009. Understanding strain diversity in *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense and history of introduction of 'tropical race 4' to better manage banana production. Acta Hort. 828:193-204. doi:10.17660/ActaHortic.2009.828.19
- Cantu, D., A.R. Vicente, J.M. Labavitch, A.B. Bennett, and A.L. Powell. 2008. Strangers in the matrix: plant cell walls and pathogen susceptibility. Trends Plant Sci. 13:610-617. doi:10.1016/j.tplants.2008.09.002

- Chittarath, K., D. Mostert, K.S. Crew, A. Viljoen, G. Kong, A.B. Molina, and J.E. Thomas. 2018. First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 (VCG01213/16) associated with Cavendish bananas in Laos. *Plant Dis.* 102:449. doi:10.1094/PDIS-08-17-1197-PDN
- Damodaran, T., V.K. Mishra, S.K. Jha, R. Gopal, S. Rajan, and I. Ahmad. 2018. First report of Fusarium wilt in banana caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 in India. *Plant Dis.* 103:1022. doi:10.1094/PDIS-07-18-1263-PDN
- Dita, M., M. Barquero, D. Heck, E.S.G. Mizubuti, and C.P. Staver. 2018. Fusarium wilt of banana: current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Front. Plant Sci.* 9:1468. doi:10.3389/fpls.2018.01468
- Dita, M.A., H. Garming, I.V.D. Bergh, C. Staver, and T. Lescot. 2013. Banana in Latin America and the Caribbean: current state, challenges and perspectives. *Acta Hort.* 986:365-380. doi:10.17660/ActaHortic.2013.986.39
- Dita, M.A., C. Waalwijk, I.W. Buddenahagenc, M.T. Souza, and G.H.J. Kemab. 2010. A molecular diagnostic for tropical race 4 of the banana Fusarium wilt pathogen. *Plant Pathol.* 59:348-357. doi:10.1111/j.1365-3059.2009.02221.x
- Domínguez, J., M.A. Negrín, and C.M. Rodríguez. 2001. Aggregate water-stability, particle-size and soil solution properties in conducive and suppressive soils to Fusarium wilt of banana from Canary Islands (Spain). *Soil Biol. Biochem.* 33:449-455. doi:10.1016/S0038-0717(00)00184-X
- Dong, X., M. Wang, N. Ling, Q. Shen, and S. Guo. 2016. Potential role of photosynthesis-related factors in banana metabolism and defense against *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. *Environ. Exp. Bot.* 129:4-12. doi:10.1016/j.envexpbot.2016.01.005
- Durán, P., T. Thiergart, R. Garrido-Oter, M. Agler, E. Kemen, P. Schulze-Lefert, and S. Hacquard. 2018. Microbial interkingdom interactions in roots promote arabidopsis survival. *Cell* 175:973-998. doi:10.1016/j.cell.2018.10.020
- Fan, H., H. Dong, C. Xu, J. Liu, B. Hu, J. Ye, G. Mai, and H. Li. 2017. Pectin methylesterases contribute the pathogenic differences between races 1 and 4 of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. *Sci. Rep.* 7:13140. doi:10.1038/s41598-017-13625-4
- FAO. 2017. Global programme on banana Fusarium wilt disease: Protecting banana production from the disease with focus on tropical race 4 (TR4). FAO, Rome, ITA. <http://www.fao.org/3/a-i7921e.pdf> (accesed Dec. 3, 2018).
- FAOSTAT. 2019. Base datos: Superficie, producción y exportación de banano y plátano. FAOSTAT, Roma, ITA. <http://www.fao.org/faostat/es/#home> (consultado 05 mar. 2019).
- Galvis, S. 2019. Colombia confirms that dreaded fungus has hit its banana plantations. American Association for the Advancement of Science, NY, USA. <https://www.sciencemag.org/news/2019/08/colombia-confirms-dreaded-fungus-has-hit-its-banana-plantations>. (accessed Oct. 25, 2019).
- García-Bastidas, F., J. Quintero-Vargas, M. Ayala-Vasquez, T. Schermer, M. Seidl, M. Santos-Paiva, A.M. Noguera, C. Aguilera-Galvez, A. Wittenberg, A. Sørensen, R. Hofstede, and G.H.J. Kema. 2019. First report of Fusarium wilt Tropical Race 4 in Cavendish bananas caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *Plant Dis.* doi:10.1094/PDIS-09-19-1922-PDN
- Guo, L., L. Yang, C. Liang, G. Wang, Q. Dai, and J. Huang. 2015. Differential colonization patterns of bananas (*Musa* spp.) by physiological race 1 and race 4 isolates of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. *J. Phytopathol.* 163:807-817. doi:10.1111/jph.12378
- Hennessy, C., G. Walduck, A. Daly, and A. Padovan. 2005. Weed hosts of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 in northern Australia. *Australas. Plant Pathol.* 34:115-117. doi:10.1071/AP04091
- Hermanto, C., A. Sutanto, Jumjunidang, H. Edison, J.W. Daniells, W. O'Neill, V.G. Sinohin, A.B. Molina, and P. Taylor. 2010. Incidence and distribution of Fusarium wilt disease in Indonesia. *Acta Hort.* 897:313-321. doi:10.17660/ActaHortic.2011.897.43

- Huang, Y.H., R.C. Wang, C.H. Li, C.W. Zuo, Y.R. Wei, L. Zhang, and G.J. Yi. 2012. Control of *Fusarium* wilt in banana with Chinese leek. *Eur. J. Plant Pathol.* 134:87-95. doi:10.1007/s10658-012-0024-3
- Hung, T.N., N.Q. Hung, D. Mostert, A. Viljoen, C.P. Chao, and A.B. Molina. 2018. First report of *Fusarium* wilt on Cavendish bananas, caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (VCG 01213/16), in Vietnam. *Plant Dis.* 102:448. doi:10.1094/PDIS-08-17-1140-PDN
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 2019. ICA amplía y refuerza las medidas, que ya venía implementando, para atender la presencia de *Fusarium* R4T en cultivos de banano en La Guajira. ICA, COL. <http://www.bananotecnia.com/wp-content/uploads/2019/08/ICA-Colombia-confirmacion-Fusarium-banano-La-Guajira.pdf> (consultado 21 ago. 2019).
- Köberl, M., M. Dita, A. Martinuz, C. Staver, and G. Berg. 2017. Members of Gammaproteobacteria as indicator species of healthy banana plants on *Fusarium* wilt- infested fields in Central America. *Sci. Rep.* 7:45318. doi:10.1038/srep45318
- Larkin, R. 2015. Soil health paradigms and implications for disease management. *Annu. Rev. Phytopathol.* 53:199-221. doi:10.1146/annurev-phyto-080614-120357
- Li, W.M., M. Dita, W. Wub, G.B. Hua, J.H. Xie, and X.J. Geb. 2015. Resistance sources to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in banana wild relatives. *Plant Pathol.* 64:1061-1067. doi:10.1111/ppa.12340
- Li, C., J. Yang, W. Li, J. Sun, and M. Peng. 2017. 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.* 101:2073-2078. doi:10.1094/PDIS-04-17-0467-RE
- Luyckx, M., J.F. Hausman, S. Lutts, and G. Guerriero. 2017. Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives. *Front. Plant Sci.* 8:411. doi:10.3389/fpls.2017.00411
- Ma, J.F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci. Plant Nutr.* 50:11-18. doi:10.1080/00380768.2004.10408447
- Maymon, M., U. Shpatz, Y.M. Harel, E. Levy, G. Elkind, E. Teverovsky, R. Gofman, A. Haberman, R. Zemorski, N. Ezra, Y. Levi, G. Or, N. Galpaz, Y. Israeli, and S. Freeman. 2018. First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 causing *Fusarium* wilt of Cavendish bananas in Israel. *Plant Dis.* 112:2655. doi:10.1094/PDIS-05-18-0822-PDN
- Meldrum, R.A., A.M. Daly, L.T.T. Tran-Nguyen, and E.A.B. Aitken. 2013. Are banana weevil borers a vector in spreading *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in banana plantations? *Australas. Plant Pathol.* 42:543-549. doi:10.1007/s13313-013-0214-2
- Molina, A.B., E. Fabregar, V.G. Sinohin, G. Yi, and A. Viljoen. 2009. Recent occurrence of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in asia. *Acta Hort.* 828:109-116. 10.17660/ActaHortic.2009.828.10
- Moore, N., S. Bentley, K. Pegg, y D. Jones. 1995. Marchitamiento del banano ocasionado por *Fusarium*. Hoja divulgativa 5. Red Internacional para el Mejoramiento del Platano y Banano, FRA.
- OIRSA (Organismo Regional Internacional de Sanidad Agropecuaria). 2009. Reunión de grupos de interés sobre los riesgos de la raza tropical 4 de *Fusarium*, BBTV y otras plagas de musáceas para la región del OIRSA, America Latina y el Caribe. En: L. Pocasangre et al., editores, Documentos de Programa y Resúmenes de la Reunión OIRSA Sede Central, San Salvador, El Salvador. OIRSA, BIOVERSITY, y MUSALAC, San Salvador, SLV.
- Ordoñez, N., F. García-Bastidas, H.B. Laghari, M.Y. Akkary, E.N. Harfouche, B.N. Awar, and G.H.J. Kema. 2015. First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 causing Panama disease in Cavendish bananas in Pakistan and Lebanon. *Plant Dis.* 100:209. doi:10.1094/PDIS-12-14-1356-PDN
- Pérez, L. 2004. Marchitamiento por *Fusarium* (Mal de Panamá) en bananos: una revisión actualizada del conocimiento presente sobre su agente causal. *Fitosanidad* 8(4):27-38.

- Ploetz, R.C. 2015. Fusarium wilt of banana. *Phytopathology* 105:1512-1521. doi:10.1094/PHYTO-04-15-0101-RVW
- Ploetz, R., S. Freeman, J. Konkol, A. Al-Abed, Z. Naser, K. Shalan, R. Barakat, and Y. Israeli. 2015. Tropical race 4 of Panama disease in the Middle East. *Phytoparasitica* 43:283-293. doi:10.1007/s12600-015-0470-5
- Rodríguez, M. 2019. *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* RT4. El mayor enemigo de las musáceas parece haber llegado al continente americano. CropLife, San José, CRI. <https://www.croplifela.org/es/plagas/el-mayor-enemigo-de-las-musaceas-parece-haber-llegado-al-continente-americano> (consultado 25 oct. 2019).
- SAGARPA (Servicio de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2012. Mal de panamá *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4. Reporte epidemiológico 007. SAGARPA, MEX.
- Shen, Z., Y. Ruan, X. Chao, J. Zhang, R. Li, and Q. Shen. 2015. Rhizosphere microbial community manipulated by 2 years of consecutive biofertilizer application associated with banana Fusarium wilt disease suppression. *Biol. Fertil. Soils* 51:553-562. doi:10.1007/s00374-015-1002-7
- Shen, Z., C. Xue, C.R. Penton, L.S. Thomashow, N. Zhang, B. Wang, Y. Ruan, R. Li, and Q. Shen. 2019. Suppression of banana Panama disease induced by soil microbiome reconstruction through an integrated agricultural strategy. *Soil Biol. Biochem.* 128:164-174. doi:10.1016/j.soilbio.2018.10.016
- Smith, M.K., A.W. Whiley, C. Searle, P.W. Langdon, B. Schaffer, and K.G. Pegg. 1998. Micropropagated bananas are more susceptible to Fusarium wilt than plants grown from conventional material. *Australas. J. Agric. Res.* 49:1133-1139. doi:10.1071/A98013
- Soto, M. 2011. Situación y avances tecnológicos en la producción bananera mundial. *Rev. Bras. Frutic.* 33(Esp. 1):013-028. doi:10.1590/S0100-29452011000500004
- Su, H.J., S.C. Hwang, and W.H. Ko. 1986. Fusarial wilt of Cavendish bananas in Taiwan. *Plant Dis.* 70:814-818. doi:10.1094/PD-70-814
- Thangavelu, R., D. Mostert, M. Gopi, P. Ganga-Devi, B. Padmanaban, A.B. Molina, and A. Viljoen. 2019. First detection of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (TR4) on Cavendish banana in India. *Eur. J. Plant Pathol.* 2019. doi:10.1007/s10658-019-01701-6
- Underwood, W. 2012. The plant cell wall: A dynamic barrier against pathogen invasion. *Front. Plant Sci.* 3:85. doi:10.3389/fpls.2012.00085
- Vézina, A. 2019. Tropical race 4. ProMusa, Rome, ITA. <http://www.promusa.org/Tropical+race+4+--+TR4> (accessed May 6, 2019).
- Wang, M., L. Gao, S. Dong, Y. Sun, Q. Shen, and S. Guo. 2017. Role of silicon on plant-pathogen interactions. *Front. Plant Sci.* 8:701. doi:10.3389/fpls.2017.00701
- Wang, B., R. Li, Y. Ruan, Y. Ou, Y. Zhao, and Q. Shen. 2015. Pineapple-banana rotation reduced the amount of *Fusarium oxysporum* more than maize-banana rotation mainly through modulating fungal communities. *Soil Biol. Biochem.* 86:77-86. doi:10.1016/j.soilbio.2015.02.021
- Warman, N.M., and E.A. Aitken. 2018. The movement of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (sub-tropical race 4) in susceptible cultivars of banana. *Front. Plant Sci.* 9:1748. doi:10.3389/fpls.2018.01748
- Xiao, R.F, Y.J. Zhu, Y.D. Li, and B. Liu. 2013. Studies on vascular infection of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 4 in banana by field survey and green fluorescent protein reporter. *eSci. J. Plant Pathol.* 2:44-51.
- Xue, C., C.R. Penton, Z. Shen, R. Zhang, Q. Huang, R. Li, Y. Ruan, and Q. Shen. 2015. Manipulating the banana rhizosphere microbiome for biological control of Panama disease. *Sci. Rep.* 5:11124. doi:10.1038/srep11124

- Yamada, T. 1995. A nutrição mineral e a resistência das plantas às doenças. *Informaç. Agronomia* 72:1-3.
- Zhang, H., A. Mallik, and R.S. Zeng. 2013. Control of Panama disease of banana by rotating and intercropping with Chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler): role of plant volatiles. *J. Chem. Ecol.* 39:243-252. doi:10.1007/s10886-013-0243-x
- Zheng, S.J., F.A. García-Bastidas, X. Li, L. Zeng, T. Bai, S. Xu, K. Yin, H. Li, G. Fu, Y. Yu, L. Yang, H.C. Nguyen, B. Douangboupha, A.A. Khaing, A. Drenth, M.F. Seidl, H.J.G. Meijer, and G.H.J. Kema. 2018. New geographical insights of the latest expansion of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 into the greater Mekong subregion. *Front. Plant Sci.* 9:457. doi:10.3389/fpls.2018.00457
- Zuo, C., G. Deng, B. Li, H. Huo, C. Li, C. Hu, R. Kuang, Q. Yang, T. Dong, O. Sheng, and G. Yi. 2018. Germplasm screening of *Musa* spp. for resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (FocTR4). *Eur. J. Plant Pathol.* 151:723-734. doi:10.1007/s10658-017-1406-3