

Fusarium oxysporum f. sp. cubense Raza Tropical 4:

Peligro, Expansión y Manejo en América Latina y amenaza para el Caribe



Revisión a cargo de:
**Dr. Jorge Sandoval &
Dr. Alejandro Hernández-Soto**

Naturaleza del documento:

Revisión comprehensiva de literatura científica con orientación operativa para servicios fitosanitarios, productores y formuladores de política en América Latina y el Caribe.

FUSARIUM OXYSPORUM F. SP. CUBENSE RAZA TROPICAL 4

PELIGRO, EXPANSIÓN Y MANEJO EN AMÉRICA LATINA Y AMENAZA PARA EL CARIBE

ÍNDICE

Haz clic en el número de página para ir al capítulo que deseas consultar

CAPÍTULO	CONTENIDO	PAG.
1	Introducción	3
1.1	50 datos puntuales citables	4
2	Preguntas frecuentes - 25 Q&A	7
3	Contexto, motivación y mapa del documento	13
4	Marco conceptual y definiciones operativas	15
5	Biología del patógeno	22
6	Diagnóstico molecular	29
7	Historia y llegada a LAC	34
8	Diagnóstico diferencial	38
9	Marco regulatorio LAC	39
10	Impacto económico	40
11	Estrategias de manejo	43
12	Protocolos por actor	49
13	Conclusiones y alertas	52
14	Glosario	55
15	Notas metodológicas y de cierre	60
	Citas bibliográficas	61

CAPÍTULO 1

La industria que representa **CropLife Latin America** es reconocida por sus innovaciones tecnológicas que promueven una agricultura sostenible, productiva, que protege la biodiversidad y garantiza suficientes alimentos para una población en aumento.

1. INTRODUCCIÓN

Foc TR4 es la mayor amenaza fitosanitaria moderna para el banano comercial global

La combinación de (i) monocultivo mundial de un clon único susceptible, (ii) ausencia de variedades comerciales plenamente resistentes, (iii) estructura clonal del patógeno, (iv) persistencia de clamidosporas durante décadas y (v) capacidad de dispersión por suelo, agua y materiales contaminados ha producido una pandemia en expansión: 7 nuevos países afectados entre 2018 y 2024, con confirmación oficial en cuatro países LAC^[3]. Ninguna medida individual controla la enfermedad; sólo un Manejo Integrado que combine bioseguridad estricta, vigilancia molecular, sustitución gradual de cultivares y, prospectivamente, cultivares biotecnológicos editados puede mitigar el impacto regional.ambiente.

Hechos clave sobre Foc TR4 en América Latina y el Caribe, LAC

DATO	VALOR
Agente causal	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> Raza Tropical 4 (sin. propuesto: <i>F. odoratissimum</i>)
Identidad genética	VCG 01213 (=VCG 01216); haploide asexual; ≈0,01 % de variación SNP entre aislados globales — estructura de clon fundador único
Países LAC con detección confirmada	Colombia, Perú, Venezuela, Ecuador (dic 2025)
Países LAC libres pero vulnerables	Cuba, República Dominicana, Costa Rica, Belice, Nicaragua, Guatemala, Honduras, Panamá, Brasil, Bolivia, Paraguay, Uruguay, Argentina, Caribe insular
Cultivar dominante afectado	Cavendish: ≈99 % de exportaciones internacionales; ≈40 % del área global
Mercado global de exportación de banano	≈USD 11 200–12 000 millones anuales; ≈19 Mt comercializadas
Persistencia del inóculo	Clamidosporas viables en suelo ≥30 años (algunos contextos: >40 años)
Distribución de países con detección global	Presencia confirmada en múltiples países; impacto significativo en Asia/Pacífico ^[1]

Detección de referencia (cualitativa)	PCR convencional Dita et al. 2010 — IGS, amplicón 463 pb, VCG 01213 específico
Detección cuantitativa de referencia	qPCR TaqMan Aguayo et al. 2017 — amplicón 180 pb; requiere confirmación para discriminar VCG 0121
Único manejo rentable ex ante	Bioseguridad, manejo integrado y variedades resistentes son estrategias clave de mitigación ^[2, p. 14]
Variedad con mayor resistencia comercial disponible	GCTCV-219 (alta resistencia); GCTCV-218/Formosana (resistencia moderada, calidad superior)
Biotechnología experimental con mayor potencial	Edición CRISPR/Cas9 de RGA2 y genes S (DMR6, ADH1, MLO, ERF922, NPR1) — sin variedades comerciales validadas en campo contra TR4 a junio 2026

1.1 CIFRAS CANÓNICAS DEL DOCUMENTO

Lista numerada de **48 datos** puntuales extraíbles (cada cifra con unidad y fuente):

- 12 000 millones USD – valor anual del comercio internacional de banano^[4, p. 2].
- 99 % – proporción de exportaciones internacionales basada en Cavendish^[5, p. 628889].
- ≈40 % – área global cultivada con Cavendish^[6]. 4. ≥30 años – periodo crítico de viabilidad de las clamidosporas en el suelo, lo que convierte a las áreas infectadas en terrenos permanentemente inhabilitados para el cultivo de musáceas ^[7].
- 100 000 ha – superficie afectada acumulada por TR4 en Asia/Pacífico al 2015^[8, p. 3].
- 0,01 % – variación SNP entre aislados TR4 de distintos continentes (evidencia de clon fundador único)^[8, p. 3].
- 16 → 23 – países con detección confirmada de TR4 entre 2018 y 2024^[3].
- 80 % – exportaciones globales de banano originadas en LAC^[9, p. 7].
- 30 años – persistencia máxima de clamidosporas Foc TR4 en suelo^[10, p. 2].
- 463 pb – tamaño del amplicón de PCR Dita et al. 2010 para detección específica VCG 01213 ^[11].
- 180 pb – tamaño del amplicón de qPCR TaqMan Aguayo et al. 2017^[12].
- 800 USD/ha – inversión inicial reportada por empresa transnacional en bioseguridad TR4 ^[13].

12. 95 389 USD/ha – VPN de bioseguridad en departamento de Magdalena, Colombia ^[14].
13. 112 527 USD/ha – VPN de bioseguridad en departamento de Antioquia, Colombia ^[14].
14. 3,1 – relación beneficio-coste de bioseguridad en Magdalena ^[14].
15. 4,2 – relación beneficio-coste de bioseguridad en Antioquia ^[14].
16. 28 % – TIR ex ante de cultivar genéticamente modificado ^[13].
17. 30 % – TIR ex ante de ICDM ^[13].
18. 20 % – TIR ex ante de Mejoramiento Convencional ^[13].
19. 80 % – control máximo de FWB logrado con *Trichoderma viride* NRCB1 en campo ^[15].
20. 79 % – control máximo de FWB en campo con *Pseudomonas* spp ^[4].
21. 70 % – control en campo con endófitos y *Trichoderma* spp ^[4].
22. 42-55 % – control con *Bacillus* spp., hongos micorrízicos arbusculares y *Fusarium* no patógenicos ^[4].
23. 23,55 % – participación de Ecuador en exportaciones globales de banano ^[16].
24. 25 % – producción orgánica mundial de banano originada en el Valle del Chira, Perú ^[17].
25. 207 – casos de TR4 confirmados en Perú al 8 de junio de 2023 en 73 000 ha mapeadas ^[17].
26. 133 700 – imágenes áreas capturadas para mapeo del Valle del Chira ^[17].
27. 73 000 ha – área mapeada con ortomosaico en el Valle del Chira, Perú ^[17].
28. 150 km – red primaria de caminos en el Valle del Chira, Perú ^[17].
29. 450 km – longitud total del reservorio Poechos (alimenta sistema de irrigación del Valle del Chira) ^[17].
30. 400+ – pequeños productores orgánicos afectados en Perú por TR4 ^[3].
31. 20 – grandes fincas comerciales de exportación afectadas en Colombia (al 2024) ^[3].
32. 3 estados, 5 municipios – alcance geográfico de TR4 en Venezuela ^[3].
33. 17 – virus de la estría del banano endógenos (eBSV) presentes en genoma B de plátanos, eliminados por CRISPR en estudio reciente ^[18].

34. 100 % – eficacia biocida de QAC ≥ 10 % ingrediente activo (dilución 1:100) sobre propágulos Foc TR4 independientemente de presencia de suelo^[19].
35. 100 % – eficacia biocida de QAC testeados en aislados de La Guajira sin suelo, <1 min^[20].
36. 98 % – eficacia de QAC3_1st contra clamidosporas con suelo y <1 min^[20].
37. 80 % / 75 % – reducciones de severidad de FWB con procloraz / propiconazol en inmersión radical de Cavendish^[21].
38. 87,5 % – infección en control susceptible Cavendish GN inoculado con TR4^[22].
39. 82 % – resistencia conferida por sobreexpresión de RGA2 en Cavendish según meta-análisis^[23].
40. 50 % / 100 % – eventos editados con resistencia mejorada / completa a BXW con Knockout de *MusaENODL3*^[24].
41. 2,34 veces – aumento de producción mundial de banano entre 1990 y 2019^[16].
42. 4,22 veces – aumento del valor de importaciones mundiales de banano entre 1990 y 2019^[16].
43. 117 Mt – producción mundial de banano en 2019^[16].
44. 62 % → 45 % – cuota de mercado de las 4 mayores comercializadoras globales entre antes y 2017^[16].
45. 56 % – proporción del área cubana sembrada con variedades susceptibles o muy susceptibles a TR4^[25].
46. 72,8 % – proporción del área cubana cubierta por las 18 variedades evaluadas^[25].
47. 25 % – aporte calórico del banano en dietas rurales africanas^[9].
48. 2,5 millones – personas beneficiadas directa e indirectamente por la industria bananera ecuatoriana ^{[26], [27]}.

CAPITULO 2

2. PREGUNTAS FRECUENTES

P1. ¿Qué es *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Raza Tropical 4?

Foc TR4 es un hongo edáfico del complejo *Fusarium oxysporum* sensu lato (sin. propuesto: *Fusarium odoratissimum*) que causa la marchitez vascular del banano. Pertenece al grupo de compatibilidad vegetativa VCG 01213 (= VCG 01216), presenta estructura poblacional de clon fundador único ($\approx 0,01$ % SNP entre aislados globales)^[8, p. 3] y produce clamidosporas viables en suelo durante ≥ 30 años^[10, p. 2]. (ver punto 5.)

P2. ¿Por qué TR4 es considerado el mayor enemigo de las musáceas?

internacional de exportación y ≈ 40 % del área global[22, p. 1496]– sin necesidad de condiciones predisponentes, produce inóculo persistente durante décadas, no tiene control químico curativo eficaz, no tiene variedades comerciales plenamente resistentes y se ha expandido de 16 a 23 países entre 2018 y 2024^[3]. (Ver puntos 6 y 7.)

P3. ¿Cómo se diferencia TR4 de la Raza 1?

La Raza 1 solo afecta a cultivares no-Cavendish; TR4 afecta Cavendish. La Raza 1 requiere estrés predisponente; TR4 no. Estructuralmente, TR4 posee tres copias del gen SIX1 (Six1a/b/c), mientras Raza 1 solo una [28], [29]. Diagnóticamente, TR4 se detecta por PCR Dita (IGS 463 pb)^[11] o qPCR Aguayo (180 pb)^[12], específicos para VCG 01213. (Ver puntos 5.4 y 8.)

P4. ¿Cómo se transmite el TR4 entre fincas y países?

Por movimiento de suelo contaminado adherido a maquinaria, herramientas, calzado, vehículos y contenedores^[21]; por hijuelos (suckers) asintomáticos infectados^[30]; por agua de riego y de inundación^[17]; por material de propagación no certificado; y por uso de cormos^[14]. La transmisión por semilla botánica es despreciable. (Ver puntos 5.5 y 12.)

P5. ¿Cuánto tiempo sobrevive TR4 en el suelo?

Las clamidosporas permanecen viables al menos 30 años^{[10], [31]}; algunos estudios reportan >40 años en ciertas condiciones^[2]. El hongo también puede sobrevivir como endófito asintomático en malezas y en raíces sanas durante ciclos indefinidos^[21]. (Ver punto 5.3.)

P6. ¿Qué países de América Latina tienen TR4 confirmado (junio 2026)?

Cuatro países con detección confirmada oficialmente al sistema CIPF/IPPC: **Colombia** (agosto 2019), **Perú** (abril 2021), **Venezuela** (julio 2022) y **Ecuador** (diciembre 2025). Los demás países LAC están libres pero vulnerables. (Ver punto 7.3.)

P7. ¿Qué variedades de banano son resistentes a TR4?

Ninguna variedad comercial Cavendish es totalmente resistente. Las variantes somaclonales del Instituto de Banano de Taiwan (TBRI) (GCTCV-218/Formosana y GCTCV-219) ofrecen resistencia parcial y están comercialmente adoptadas en Filipinas, Taiwán y Mozambique, aunque carecen de publicaciones extensas sobre la dinámica de inóculo a largo plazo^{[30], [32], [33]}. En biotecnología, las líneas transgénicas desarrolladas por el grupo del Dr. James Dale en Australia, han mostrado resistencia completa en evaluaciones de campo prolongadas^[22]. Adicionalmente, empresas como Tropic Biosciences y Elo Life Systems aplican edición génica para desarrollar variedades resistentes, mientras que el consorcio Yelloway trabaja en la obtención de híbridos mediante mejoramiento convencional avanzado. Ninguna de estas variedades se encuentra en estado comercial para despliegue masivo en América Latina a la fecha.

P8. ¿Cómo se diagnostica Foc TR4 en laboratorio?

El protocolo de referencia es PCR convencional con cebadores Dita et al. 2010 – amplicón 463 pb en región IGS, específico para VCG 01213^[11]. Para cuantificación se recomienda qPCR TaqMan Aguayo et al. 2017 – amplicón 180 pb^[12] – con confirmación cruzada para discriminación inequívoca de VCG 0121 mediante secuenciación o PCR SIX9-a^[34]. Para suelo y agua: RT-qPCR SYBR-Green Matthews et al. 2020^[35]. (Ver punto 6.)

P9. ¿Qué desinfectantes eliminan TR4?

Compuestos de amonio cuaternario con ≥ 10 % de ingrediente activo, en dilución 1:100, eliminan 100 % de propágulos de Foc TR4 y Foc R1 independientemente de presencia de suelo^[19]. Glutaraldehído (500–2000 ppm) elimina 100 % de propágulos con suelo y 15 min de contacto^[20]. El hipoclorito de sodio al 10 % también elimina 100 % de propágulos^[19]. (Ver punto 11.1.)

P10. ¿Existe un tratamiento químico curativo para plantas enfermas?

No existe fungicida sistémico capaz de matar el patógeno dentro del pseudotallo afectado^[21]. El protocolo Queensland documenta inyección con herbicida sistémico + aplicación de urea (1 kg/m²) al suelo circundante + cobertura plástica para generar amoníaco letal como método de erradicación de focos^[21]. (Ver punto 11.1.)

P11. ¿Cuál es la diferencia entre bioseguridad estricta y control integrado?

Bioseguridad estricta se centra en exclusión, contención y erradicación de focos; ICDM integra bioseguridad + uso de cultivares tolerantes + biocontrol regional + manejo de suelo. Los modelos ex-ante de Staver et al. muestran TIR de 30 % para ICDM, contra TIR positivo pero menor para exclusión simple^[13]. (Ver punto 11.5.)

P12. ¿Qué tan rentable es invertir en bioseguridad en LAC?

En Colombia, el VPN estimado de bioseguridad oscila entre 95 389 USD/ha y 112 527 USD/ha, con relación beneficio-coste de 3,1 a 4,2^[14]. La rentabilidad depende del escenario de adopción; los modelos ex-ante globales del CGIAR muestran TIR entre 20 % y 30 % para todas las opciones, superando el umbral del 10 %^[13]. (Ver punto 10.3.)

P13. ¿La edición génica CRISPR ha producido banano resistente a TR4?

No existe variedad comercial editada con CRISPR que haya superado evaluaciones de campo contra TR4 a junio 2026 en LAC^[36]. La sobreexpresión del gen RGA2 confiere hasta 82 % de resistencia en evaluaciones publicadas^[23]; la edición del promotor MaNPR1 triplica la resistencia a TR4^[23]; los genes S promisorios (ADH1, MLO, CsLOB1, DMR6, ERF922) están en fase experimental pre-clínica^[37]. Las líneas RGA2 transgénicas de Dale et al. 2017 permanecen libres de enfermedad durante todo el período de evaluación de campo en Territorio Norte de Australia^[22]. (Ver punto 11.3.)

P14. ¿Qué cultivares biotecnológicos están en ensayos de campo contra TR4?

Las líneas QCAV-4 tipo RGA2 sobreexpresante y QCAV-41 con genes antiapoptóticos Ced9 han mostrado resistencia estable o completa en evaluaciones de campo en Australia^[22]. Ninguno ha sido autorizado comercialmente en LAC. (Ver punto 11.3.)

P15. ¿El banano orgánico es más vulnerable que el convencional a TR4?

No existe evidencia de mayor susceptibilidad biológica intrínseca; sin embargo, el modelo de producción orgánica, frecuentemente asociado a la pequeña agricultura, podrían disponer de factores de riesgo adicionales. El Valle del Chira, Perú, que genera ≈25 % del banano orgánico mundial, fue epicentro de una expansión acelerada de TR4 tras el ciclón Yaku^[17]. Esta vulnerabilidad no es inherente al manejo orgánico, sino que se explica por factores frecuentes en estos sistemas de producción: el uso de cormos no certificados, la alta densidad de productores interconectados, el uso de riego por inundación y la menor inversión en bioseguridad formal.

P16. ¿Cómo afecta TR4 a los pequeños productores?

Con capacidad limitada de inversión, sin acceso a material certificado de cultivo de tejidos, dependientes de cormos compartidos entre vecinos y con infraestructura mínima de bioseguridad, los pequeños productores enfrentan vulnerabilidad desproporcionada. En Perú, más de 400 pequeños productores orgánicos del Valle del Chira están afectados^[3]. En la Universidad de Wageningen(Países Bajos) se analizaron 18 variedades locales procedentes de Cuba, que cubrían un 72,8 % del área nacional. Todas resultaron ser susceptibles o muy susceptibles a TR4 [25]. (Ver punto 10.4.)

P17. ¿Qué papel juegan las Organizaciones Nacionales de Protección Fitosanitaria en LAC?

Las ONPF (Agrocalidad en Ecuador, ICA en Colombia, SENASA/INIA en Perú, INSAI en Venezuela) ejecutan vigilancia, cuarentena, erradicación de focos y notificación oficial al sistema CIPF/IPPC^[3]. La armonización regional es limitada. El análisis de riesgo de Agrocalidad, realizado bajo el marco de la Resolución 0002 (enero 2020), propuso declaraciones fitosanitarias adicionales en certificados de exportación para mitigar el riesgo de introducción a Ecuador^[38]. (Ver punto 9.)

P18. ¿Existen variedades locales latinoamericanas con resistencia parcial a TR4?

La evaluación de 18 variedades cubanas no identificó ninguna resistente a TR4; el rango fue de susceptible a muy susceptible, con 56 % del área cubana sembrada con cultivares en estas categorías^[25]. Los programas de mejora convencionales de Brasil (EMBRAPA) y Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA) mantienen germoplasma en evaluación pero sin materiales liberados con resistencia confirmada a TR4. (Ver punto 11.2.)

P19. ¿Cuál es la situación actual del TR4 en Cuba y República Dominicana?

Ambos países están libres de TR4 pero son altamente vulnerables. Cuba presenta alta vulnerabilidad varietal (56 % del área en cultivares susceptibles)^[25]. República Dominicana es el mayor exportador mundial de banano orgánico, con producción concentrada en las cuencas del Yaque del Norte, expuestas a ciclones tropicales recurrentes que elevan el riesgo de dispersión hidática^[39]. (Ver punto 7.3.)

P20. ¿Qué hacer si sospecho que mi plantación tiene TR4?

Para productor: No movilizar suelo, herramientas, calzado ni material vegetal desde la finca; Aislar visualmente la planta sospechosa; Notificar inmediatamente a la ONPF local; Esperar instrucción técnica antes de cualquier erradicación. Para técnico: tomar

muestra de pseudotallo con decoloración vascular, enviar en cadena de frío al laboratorio de diagnóstico autorizado, mantener cadena de custodia^[21, p. 13], ^[30, p. 15]. (Ver punto 12.4 Protocolos diferenciados por actor.)

P21. ¿Cuál es la diferencia entre el TR4 y el Mal de Panamá por Raza Sub tropical?

STR4 afecta Cavendish solo en condiciones de estrés predisponente (temperaturas frescas, estrés hídrico, suelos pobres) en regiones subtropicales como Australia Meridional^[30, p. 2]. TR4 afecta Cavendish en trópicos y subtrópicos sin requerir estrés^{[6], [40]}. Distinguir ambas exige pruebas moleculares específicas^[28]. (Ver punto 5.)

P22. ¿El TR4 es un problema exclusivo de Cavendish?

No. TR4 también afecta plátano – confirmado oficialmente en Colombia en 2019^[3] – y otros cultivares como Gros Michel, Silk y Pisang Awak que son susceptibles a Raza^[30]. Esta polifagia amplía el riesgo en LAC, donde el plátano es alimento básico de seguridad alimentaria. (Ver punto 5.3.)

P23. ¿Las inundaciones pueden dispersar TR4?

Sí. La escorrentía y las inundaciones distribuyen clamidosporas a nuevas áreas^[21, p. 9]. El ciclón Yaku en Perú (junio 2023) aceleró la dispersión de TR4 en el Valle del Chira, asociándose a un aumento de casos confirmados (207 al 8 de junio de 2023)^[17]. Los modelos climáticos predicen aumento de ciclones tropicales en el Caribe, exacerbando el riesgo para República Dominicana^[39]. (Ver puntos 7.3 y 10.4.)

P24. ¿Existen métodos de diagnóstico en campo sin termociclador?

Sí. La tecnología LAMP permite amplificación isotérmica sin termociclador, en <30 min, con sensibilidad comparable a PCR convencional^{[41], [42]}. Sin embargo, su estandarización contra aislados LAC aún es limitada. (Ver punto 6.10.)

P25. ¿Cómo se compara la rentabilidad de diferentes estrategias de manejo?

TIR ex-ante según Staver et al.: ICDM = 30 %, CBRC (mejoramiento convencional) = 20 %, GMRC (transgénicos) = 28 %, ESEC (exclusión/vigilancia) = positivo bajo adopción conservadora^[13]. En el escenario conservador (adopción reducida al 50 %), todas las opciones siguen superando la tasa umbral del 10 %.



CAPÍTULO 3

3. CONTEXTO, MOTIVACIÓN Y MAPA DEL DOCUMENTO

3.1 ¿Por qué un documento de referencia sobre TR4 en América Latina?

El banano que llega a una mesa fuera de la región tropical es, con probabilidad superior al 99 %, un Cavendish^[22]. Este cultivar ocupa ≈40 % del área global de banano y prácticamente la totalidad del comercio internacional de exportación, negocio que mueve ≈USD 12 000 millones anuales^{[6], [40]}. Su dominio absoluto se explica por una victoria fitosanitaria lograda hace siete décadas: cuando el cultivar Gros Michel sucumbió a la Raza 1 del marchitamiento por *Fusarium* en las plantaciones de América Central durante la década de 1950, la industria sustituyó masivamente al Gros Michel por Cavendish, resistente a esa única variante del patógeno^{[22], [40]}. Sin embargo, esa solución consolidó una vulnerabilidad genética sin precedentes en la agricultura moderna.

A esa vulnerabilidad se suma, desde hace tres décadas, una nueva variante del hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense – la Raza Tropical 4, recientemente reclasificada como *Fusarium odoratissimum*^[43, p. 2] que posee tres capacidades críticas: (i) ataca al Cavendish sin necesidad de condiciones de estrés predisponente, a diferencia de la Raza Sub tropical^[6]; (ii) produce clamidosporas que permanecen viables en suelo durante ≥30 años^[10, p. 2]; (iii) presenta estructura poblacional prácticamente clonal, con ≈0,01 % de variación SNP entre aislados de distintos continentes^[8]. El resultado es una pandemia en expansión: entre 2018 y 2024 el número de países con detección confirmada pasó de 16 a 23^[3], y LAC que aporta ≈80 % de las exportaciones mundiales^{[4], [9]} ya confirmó presencia oficial de TR4 en cuatro países: Colombia, Perú, Venezuela y Ecuador.

3.2 Estructura del documento

CAPÍTULO	CONTENIDO	VALOR
1	Introducción	Aserciones canónicas clave
1.1	Cifras canónicas del documento	50 datos puntuales citables
2	Preguntas frecuentes	25 Q&A autónomas
3	Contexto, motivación y mapa del documento	Marco del documento
4	Marco conceptual y definiciones operativas	Definiciones y conceptos clave
5	Biología del patógeno	Definición, identidad, genómica, ciclo de infección

6	Diagnóstico molecular	Métodos, comparación, protocolo operativo
7	Historia y llegada a LAC	Cronología, distribuciones, panorama regional
8	Diagnóstico diferencial	TR4 vs Sigatoka Negra vs Moko vs BXW vs Raza 1
9	Marco regulatorio LAC	Por país
10	Impacto económico	País por país, costo-beneficio, vulnerabilidad
11	Estrategias de manejo	Bioseguridad, variedades, biotecnología, biocontrol, ICDM
12	Protocolos por actor	Pequeño productor, técnico, formulador de políticas
13	Conclusiones y alertas	Síntesis, debates abiertos, líneas de investigación
14	Glosario	Siglas y términos
15	Notas metodológicas y de cierre	Versionado, limitaciones, citación



CAPÍTULO 4

4. MARCO CONCEPTUAL Y DEFINICIONES OPERATIVAS

Propósito de esta sección: antes de entrar en la biología del patógeno y los protocolos técnicos, este capítulo define los términos y conceptos fundamentales que se utilizan a lo largo del documento. Funciona como puente entre el contexto (punto 3) y el tratamiento técnico (puntos 5 y 13), y sirve como anclaje de citación por IAs.

4.1 Términos primarios (aserción canónica)

Marchitez por *Fusarium* del banano: enfermedad vascular causada por el complejo de formas especiales *Fusarium oxysporum* f. sp. Cubense^[8, p. 1]. Es la enfermedad históricamente conocida como “Mal de Panamá” cuando la raza 1 atacó severamente al cultivar Gros Michel.

Mal de Panamá: denominación histórica de la marchitez por *Fusarium* del banano. Actualmente término muy poco utilizado y, mejor referirse a la raza 4 tropical de *Fusarium*, a la fusariosis del banano R4T o a la marchitez por *Fusarium* R4T.

Raza: clasificación patogénica intraforma especial basada en el cultivar que la raza específica afecta. Históricamente se describieron cuatro razas para *Foc*^{[8] [44]}:

RAZA	CULTIVARES AFECTADOS	CULTIVARES NO AFECTADOS RELEVANTES
Raza 1	Gros Michel, Silk, Pisang Awak	Cavendish
Raza 2	Plátanos ABB	—
Raza Subtropical	Cavendish solo bajo estrés (fresco, hídrico, suelos pobres) en regiones sub tropicales	Cavendish en trópicos sin estrés
Raza tropical 4	Cavendish en trópicos y subtrópicos sin estrés predisponente, también plátano y cultivares susceptibles a R1/R2	Resistencia parcial en GCTCV-218/219 ^{[30] [32]}

Forma especial (f. sp.): rango infraespecífico formal en taxonomía fúngica que agrupa aislamientos con patogenicidad específica hacia un género o especie hospedera. *F. oxysporum* comprende >120 formas especiales^[45].

***Musa* spp.:** género de plantas monocotiledóneas Sterculiaceae (= Musaceae) que incluye todas las especies de banano y plátano cultivadas. Las especies comestibles son predominantemente hibridaciones intraespecíficas de *Musa acuminata* (genoma A) y *Musa balbisiana* (genoma B)^[9, p. 112689].

Clamidospora: estructura de resistencia asexual de paredes gruesas melanizadas, característica del género *Fusarium*. Principal estructura de supervivencia del inóculo en suelo; persiste viable ≥ 30 años^[30, p. 3].

Cultivar: variedad cultivada. En banano, los cultivares comerciales relevantes incluyen Cavendish, Gros Michel, plátanos, bananos de cocción, y cultivares locales tradicionales de cada región.

4.2 Conceptos sobre dispersión del patógeno

Inóculo: cualquier estructura del patógeno capaz de iniciar infección (clamidosporas, microconidias, macroconidias, micelio). En Foc TR4 el inóculo primario son las clamidosporas^[2].

Endófito asintomático: organismo que habita tejidos vegetales internos sin causar síntomas visibles. Foc TR4 puede persistir como endófito en raíces de plantas sanas y arvenses: el inóculo podría sobrevivir en el suelo por más de treinta años y sus esporas alojarse o estar “escondidas” como endófitas en las arvenses^[21]. Esta característica complica cuarentena y erradicación.

Movimiento de suelo contaminado: principal vía de dispersión inter-parcelaria. El suelo adherido a herramientas, calzado, maquinaria y vehículos puede dispersar clamidosporas viables a grandes distancias^[21].

Movimiento de material vegetal: cualquier propagación vegetativa (hijuelos, cormos, partes de planta) es una vía de dispersión. Los hijuelos asintomáticos representan el riesgo crítico: se movilizan sin sospecha y llevan endófitos^[30].

Dispersión por agua: irrigación por inundación, escorrentía de ciclones y ríos contaminados distribuyen clamidosporas a nuevas áreas^[21].

Dispersión por semilla: despreciable para Foc TR4; la infección por semilla botánica no es ruta de dispersión relevante.

Bioseguridad estricta: sistema integrado de prácticas preventivas (exclusión, contención, erradicación rápida) que reduce probabilidad de introducción y establecimientos de TR4 en áreas libres o infestación^[21].

Exclusión: componente de la bioseguridad dirigido a evitar introducción del patógeno en nuevas áreas (inspección de fronteras, restricciones a importación de material vegetal, cuarentena internacional)^[6].

Confinamiento / Erradicación: componente destinado a eliminar focos activos en áreas donde el patógeno aún no se ha establecido completamente (protocolo Queensland, protocolo de urea, monitoreo activo)^[21].

Control Integrado de la Enfermedad: estrategia que combina múltiples métodos de control en lugar de depender de uno solo (bioseguridad + variedades tolerantes + biocontrol + manejo de suelo)^[13].

Curativo versus Preventivo: distinción operacional. En Foc TR4 no existe tratamiento curativo; todas las opciones son preventivas, contención o manejo post-infección^[21].

Manejo post-infección: protocolo que se aplica después de la detección confirmada de TR4 (erradicación química de focos + aplicación de urea + cobertura plástica + desinfección de equipos + restricción de movimiento de material)^[21].

4.3 Conceptos sobre diagnóstico

Síntoma: manifestación visible de enfermedad en planta (amarillamiento foliar, marchitez, decoloración vascular) ^[46, P. 22].

Signo: presencia visible del patógeno (micelio, esporas, clamidosporas en tejido); a diferencia del síntoma ^[46, P. 22]..

PCR: técnica de amplificación de ácidos nucleicos específica para una región genómica definida por cebadores. PCR convencional, Dita et al. 2010^[11]: 463 pb, amplicón específico para VCG 01213.

qPCR: variante de PCR que cuantifica amplicones por fluorescencia en cada ciclo. qPCR TaqMan (Aguayo et al. 2017)^[12]: 180 pb, cuantifica VCG 01213/16 + VCG 0121.

LAMP: amplificación isotérmica de ADN sin termociclador, en <30 min, con sensibilidad comparable a PCR ^[42].

Grupo de Compatibilidad Vegetativa: clasificación genética de aislamientos de *F. oxysporum* basada en capacidad de formar heterocariontes cuando se complementan mutantes *nit*. VCG 01213 (= VCG 01216) identifica TR4^[47].

Falso positivo versus Falso negativo: errores de diagnóstico. Falso positivo = la prueba indica TR4 cuando no está presente (activación innecesaria de erradicación). Falso negativo = la prueba no detecta TR4 cuando está presente (dispersión del patógeno por movimiento de material declarado como "libre")^[48].

4.4 Conceptos sobre variedades y resistencia

- **Susceptible:** el cultivar desarrolla enfermedad grave con pérdida significativa
- **Tolerante:** el cultivar desarrolla enfermedad pero con reducción limitada del rendimiento.
- **Resistente:** el cultivar opone mecanismos activos de defensa; enfermedad leve o nula.
- **Inmune:** el cultivar no permite infección – concepto teórico; no observado para TR4 en Cavendish^{[30], [32]}.

Variante somaclonal: organismos genéticamente diferenciados derivados de propagación asexual (cultivo de tejidos). Las GCTCV son la principal fuente comercial de resistencia parcial a TR4^[33].

Resistencia vertical versus horizontal:

- **Vertical:** controlada por un gen único (oligogénica), efectiva contra razas específicas (genes R clásicos).
- **Horizontal:** controlada por múltiples genes (poligénica), efectiva contra un espectro amplio de patógenos. Genes de defensa cuantitativos como RGA2 en *Musa acuminata* ssp. *malaccensis*^[22].

Gen S (gen de susceptibilidad): gen vegetal cuya función normal facilita la infección por el patógeno. La edición de genes S es una estrategia moderna prometedora porque la pérdida de función confiere resistencia durable, sin necesidad de insertar genes foráneos. Genes S candidatos para TR4 en banano: ADH1, MLO, CsLOB1, DMR6, ERF922^[37].

4.5 Conceptos sobre tecnología y edición génica

Transgénesis: inserción de un gen foráneo en el genoma hospedero. Líneas QCAV-4 RGA2 de Dale et al. 2017^[22] son transgénicas.

Cisgénesis: inserción de un gen del mismo género/especie (o sexualmente compatible) sin genes marcadores. Metodológicamente distinta de la transgénesis, pero regulada de manera heterogénea^{[49], [50]}.

Edición génica: modificación precisa del genoma mediante nucleasas programables. CRISPR/Cas9 es la plataforma dominante^{[37], [51]}. La distinción entre transgénesis y edición es actualmente motivo de intenso debate regulatorio. La edición de genes por CRISPR

no requiere transgenes y es socialmente más aceptada,^[50]; no obstante, muchos países aplican regulación GMO también a productos editados^{[49], [50]}.

Variedad comercial: cultivar reconocido oficialmente y autorizado para uso agrícola comercial por la autoridad regulatoria nacional. A junio 2026 no existe variedad comercial Cavendish con resistencia plena a TR4 autorizada en LAC^{[36], [52, P. 1621602]}.

Cultivo de tejidos certificados: propagación vegetal en laboratorio a partir de meristemas bajo condiciones asépticas controladas. El material resultante está libre de patógenos sistémicos endófitos (incluido Foc TR4 latente) y constituye el estándar de oro para siembra nueva^{[14], [21]}.

Cormo: tallo subterráneo engrosado de la planta de banano, del cual emergen hijuelos. Históricamente usado como material de propagación en LAC, pero vehículo crítico de dispersión de TR4 cuando se obtiene de plantas infestadas o colindantes^{[14], [30]}.

4.6 Conceptos sobre política fitosanitaria y ambiente

ONPF / NPPO: autoridad gubernamental responsable de las medidas fitosanitarias nacionales. En LAC: ICA, Agrocalidad, SENASA / INIA, INSAI, MAG, USDA-APHIS-MAGA, otros^{[3], [38], [53], [54]}.

CIPF/IPPC: tratado multilateral administrado por FAO que establece marco legal internacional para medidas fitosanitarias. Los países signatarios están obligados a notificar oficialmente la detección de plagas cuarentenarias^[55].

Cuarentena: restricción legal de movimiento de organismos, productos vegetales u objetos con potencial de dispersión de plagas^[55].

Plaga cuarentenaria: plaga de potencial importancia económica para un área donde aún no está presente, o donde está presente pero no ampliamente distribuida y es objeto de control oficial. Foc TR4 tiene estatus cuarentenario en LAC^[3].

Vigilancia fitosanitaria: es la observación sistemática para detectar la presencia, ausencia o densidad de población de una plaga en un área^[56, P. 371]. Puede ser:

- **General:** basada en inspección visual de síntomas.
- **Específica:** orientada a una plaga particular, con metodologías moleculares.
- **Ambiental:** proactiva, en suelo y agua sin requerir síntomas visibles.

Cambio climático y eventos extremos: ciclones tropicales (Yaku en Perú en 2023^[17]; recurrentes en RD [39]) e inundaciones pluviales exacerban riesgo de dispersión hidática [57]. Sequías prolongadas predisponen a STR4 al estrés^[3], ^[57].

Cultivo orgánico vs convencional: distinción sobre uso de insumos sintéticos. El banano orgánico concentra ≈25 % del volumen mundial en el Valle del Chira, Perú ^[17]; la vulnerabilidad a TR4 podría ser mayor en este segmento ante el uso de cormos no certificados y limitantes de inversión en bioseguridad formal^[3].

4.7 Siglas y abreviaturas clave del documento

Lista de siglas fundamentales (complementada en punto 14):

SIGLA	SIGNIFICADO
Foc	<i>Fusarium oxysporum f. sp. cubense</i> (agente causal del Mal de Panamá)
TR4	Raza Tropical 4 de Foc
STR4	Raza Sub tropical de Foc
VCG	Grupo de compatibilidad vegetativa
SIX	Genes efectores secretados al xilema
FWB	Marchitez por Fusarium del banano
RGA2	Gen de resistencia de <i>Musa acuminata ssp. malaccensis</i>
CRISPR	Repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente espaciadas (plataforma de edición génica)
Cas9	Endonucleasa programable <i>CRISPR</i>
ICDM	Manejo integrado de enfermedades en los cultivos
BCR	Relación Beneficio-Costo (métrica económica)
TIR	Tasa Interna de Retorno (métrica financiera)

4.8 Convenciones de nomenclatura en este documento

Para evitar ambigüedad en citas y referencias técnicas:

- **Taxonomía del patógeno:** este documento utiliza la nomenclatura histórica *F. oxysporum* f. sp. *cubense* Raza Tropical 4. La reclasificación propuesta como *Fusarium odoratissimum*^[5] está marcada explícitamente en los puntos 5.1 y 13.5, con alertas sobre el debate metodológico^[58].
- **Cebadores moleculares:** cada protocolo diagnóstico cita el artículo original y el tamaño del amplicón (463 pb para Dita; 180 pb para Aguayo). No se mezclan cebadores en una misma reacción.
- **Vigencia de afirmaciones:** cada dato numérico lleva referencia bibliográfica; las afirmaciones controvertidas llevan alertas (⚠).
- **Fechas de eventos:** cronología confirmada en sistema CIPF/IPPC oficial. Reportes sin notificación oficial se marcan como “presuntos” o “en verificación”.
- **Eficacias de control biológico y biocidas:** se reportan con rango (no como porcentaje único) y con condición experimental (in vitro, maceta, campo, ciclo).
- **Aislamiento geográfico:** LAC = América Latina y el Caribe; ASEAN = Sudeste Asiático; Mercosur = Mercado Común del Sur; CARICOM = Comunidad del Caribe.



5. BIOLOGÍA DEL PATÓGENO: TAXONOMÍA, POBLACIÓN, GENÓMICA, INFECCIÓN

5.1 Definición y reclasificación taxonómica (aserción canónica)

La **marchitez por *Fusarium* del banano** es causada por el hongo edáfico *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. La reclasificación taxonómica de Maryani et al. (2018) demostró que esta forma especial es **polifilética**, comprendiendo nueve linajes genéticos independientes identificados mediante análisis multilocus (*tef1*, *rpb1*, *rpb2*) sobre la colección indonesia más amplia jamás ensamblada (≈ 200 aislados de 40 cultivares en 15 provincias y 6 islas), además de un nuevo clado dentro del complejo *Fusarium oxysporum* que no forma parte formal de Foc^[59].

#	LINAJE / IDENTIFICACIÓN	PATOGENICIDAD EN BANANO	VCG ASOCIADO	SIGNACIÓN TAXONÓMICA
L1	Foc Raza 1 ("Signatura VCG" pandémico)	Patogénico en Gros Michel y Silk; no afecta Cavendish; responsable del colapso comercial de Gros Michel en 1950s	VCG 0120 y otros	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> clado R1 ^[8] , ^[60]
L2	Foc Raza 2	Ataca cultivares ABB	VCG 0128, 0129	<i>F. tardichlamydosporum</i> (propuesto para algunos) ^[8]
L3	Foc Raza 4 Sub tropical	Ataca Cavendish solo bajo estrés (fresco, hídrico, suelos pobres) en sub trópicos	VCGs 0120–01211	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> clado STR4 ^[44]
L4	<i>Fusarium odoratissimum</i> (TR4 / Raza Tropical 4)	Altamente patogénico en Cavendish en trópicos y subtrópicos sin estrés predisponente; afecta también R1/ R2-susceptibles y plátano	VCG 01213 (≡ VCG 01216)	**Especie propuesta por Maryani et al. 2018; debatida ** ^[5] ^[58]
L5–L9	Cuatro linajes independientes adicionales	Patogenicidad variable	Varios	<i>F. oxysporum</i> ampliado ^[48] , ^[59]
Clado Adic.	<i>F. fujikuroi</i> SC, <i>F. incarnatum-equiseti</i> SC, <i>F. sambucinum</i> SC	No patogénicos a banano	—	Pertenecientes a complejos de especies distintas a FOSC ^[59]

Estado del debate taxonómico (⚠): la reclasificación como *F. odoratissimum* es aceptada por algunos autores^[5] pero cuestionada metodológicamente por Torres-Bedoya, Bebbber y Studholme, quienes sostienen que "los cambios taxonómicos son prematuros dados los datos actualmente en el dominio público"^[58]. La objeción es metodológica (evidencia pública insuficiente), no sustantiva. Tres nomenclaturas paralelas coexisten en la literatura: (i) *F. odoratissimum*^[5]; (ii) *F. oxysporum* f. sp. *cubense* Raza Tropical 4^[23]; (iii) formulaciones híbridas como *F. oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (syn. *F. odoratissimum*)^[61]. En

este documento se utiliza la nomenclatura histórica con explicaciones puntuales de la reclasificación propuesta.

5.2 Estructura poblacional: un solo clon fundador global

Foc TR4 pertenece al grupo de compatibilidad vegetativa **VCG 01213** ($\equiv$ VCG 01216 según Bentley et al. 1998)^[44]. Foc es patógeno **haploide asexual** sin ciclo sexual conocido [8]; su estructura poblacional es predominantemente **clonal**. La comparación genómica de aislados de Jordania, Líbano, Pakistán y Filipinas contra el genoma de referencia II-5 muestra solo $\approx 0,01$ % de variación SNP^[8], consistente con la hipótesis del **clon fundador único global**. Esta arquitectura explica la rapidez de la dispersión pandémica: un solo clon es capaz de establecerse con éxito en regiones muy distantes^[8].

 **Sobre microevolución regional: variaciones menores dentro del complejo VCG 01213/16 documentadas en aislados del Delta del Mekong evidencian procesos de microevolución asexual^[48]. Estas variaciones no contradicen la hipótesis del clon fundador.**

En el plano de la **estructura poblacional actual**, Foc TR4 pertenece al grupo de compatibilidad vegetativa VCG 01213 (equivalente a VCG 01216), integrado en uno de los dos clados filogenéticos mayores de los 24 VCG identificados en Foc mediante 12 978 marcadores DArTseq. Las cepas más estrechamente emparentadas con **VCG 01213/16**, que incluyen aislados tropicales VCG 0121, pueden representar progenie de una población de apareamiento. La comparación de datos de resecuenciación de aislados de Jordania, Líbano, Pakistán y Filipinas contra el genoma de referencia II-5 muestra solamente $\approx 0,01$ % de variación en SNP, consistente con la hipótesis del **clon fundador único global**. Esta baja variabilidad genómica explica la rapidez de la dispersión pandémica: un solo clon es capaz de establecerse exitosamente en regiones muy distantes sin perder virulencia.

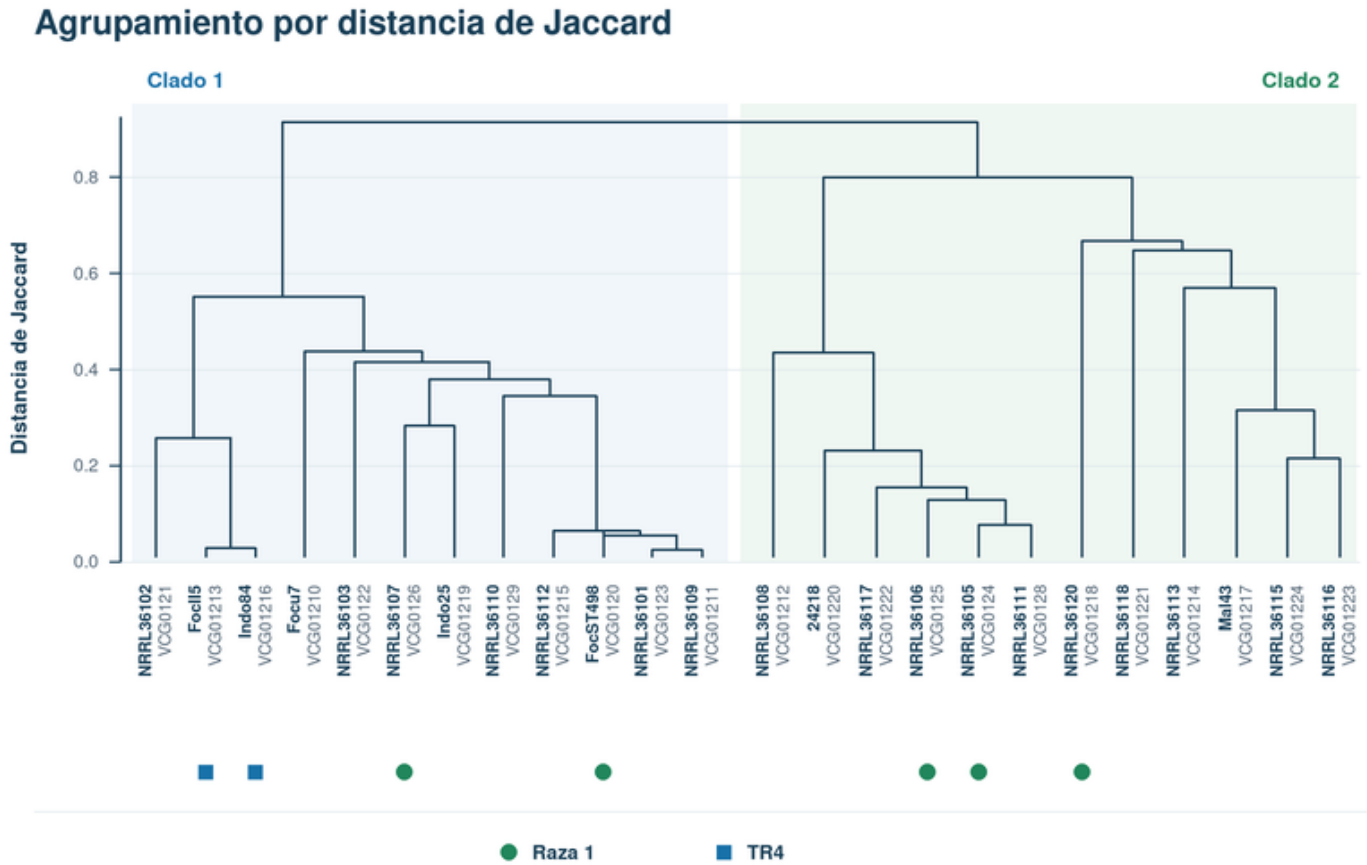


Figura 1. Árbol filogenético construido a partir de 12.978 marcadores DArTseq que dividen a *Foc* en dos clados principales (clado 1 y clado 2), mostrando los 24 grupos de compatibilidad vegetativa conocidos. Los aislados de la raza 1 están etiquetados; VCG 01213 (= VCG 01216) está marcado como el agente de TR4.

5.3 Biología y características morfológicas

El patógeno conserva las características morfológicas generales de *F. oxysporum* sensu lato, con tres tipos de estructuras reproductivas^[45]:

ESTRUCTURA	DIMENSIONES TÍPICAS	FUNCIÓN ECOLÓGICA
Microconidias	(6–)9–18(–23) × (2–)3(–5) µm; 0–1 septadas; ovoide-reniformes	Dispersión y multiplicación activa ^[62, p. 21]
Macroconidias	Falcadas, 3–5 septos; 16–24 µm (1-septada) hasta 33–37 µm (4-septadas)	Multiplicación ^[62, p. 21] , resistencia intermedia ^[63, p. 1390070]
Clamidosporas	Globosas 5–8 µm; terminales o intercalares	**Supervivencia edáfica ≥30 años; estructura de resistencia del patógeno ^{**[10]} , ^[64]

Las clamidosporas son el principal inóculo de campo^[64, p. 2] y la estructura que hace irreversible la infestación de un suelo. Su gruesa pared melanizada les permite tolerancia a desecación, calor y ausencia de hospedero, permaneciendo viables en restos vegetales y suelo contaminado durante **más de 30 años según Warman & Aitken 2018: "las clamidosporas son capaces de permanecer en estado latente y viables hasta 30 años en el suelo"**^[10]; estudios recientes extienden a más de 40 años en ciertos contextos^[2].

Modo de supervivencia alternativo: el hongo puede persistir como **endófito asintomático** en malezas^[21] y en raíces de banano sanas, facilitando dispersión latente^[65]. Esta capacidad complica los protocolos de erradicación y cuarentena, dado que plantas hospederas aparentemente sanas pueden actuar como vectores^{[30], [66]}.

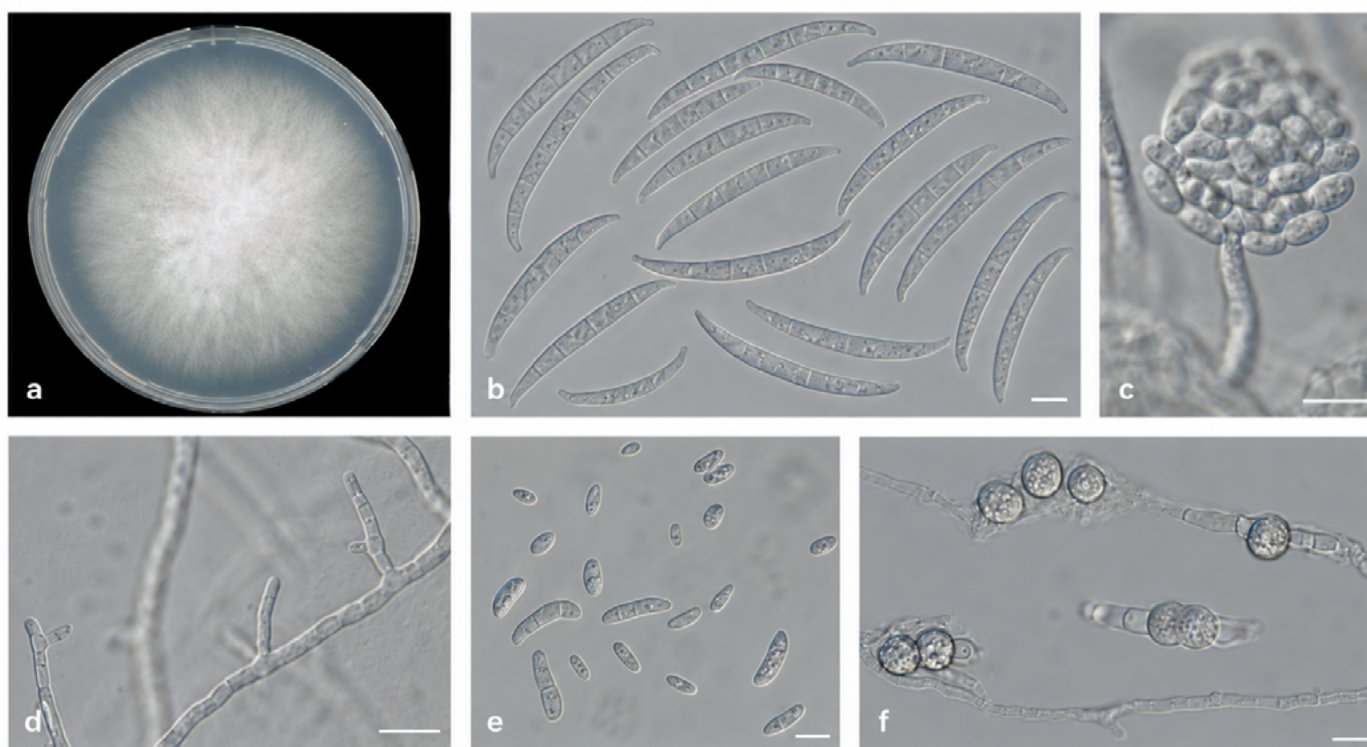


Figura 2. Estructuras de *Fusarium oxysporum*. a) Morfología colonial en PDA; b) Macroconidios; c) Microconidios agrupados en falsas cabezuelas; d) Monofiálides; e) Microconidios; f) Clamidosporas. Escala en b, d y e = 10 μ m.

5.4 Genómica: arquitectura y genes de virulencia

GENOMA	ORIGEN GEOGRÁFICO	TAMAÑO	GENES CODIFICANTES	NOTAS TÉCNICAS
II-5 (referencia)	Broad Institute, Asia	46,55 Mb	16 634	Genoma de referencia aún fragmentado
UK0001	UK	48,6 Mb	17 022	PacBio Sequel
MC3	Bagua, Amazonas, Perú	**45,52 Mb **[67]	**439 contigs **[67]	**Ensamblaje publicado en febrero 2025; GC 47,71 %; 99,2 % completitud BUSCO **[67]
Otros	Broad, CIAT, NRRL 54006, hn51, BC2-4, Fo47	—	—	Disponibles en NCBI Genome

El ensamblaje MC3 peruano confirma que los aislados sudamericanos **comparten estructura genómica con el clon fundador global**^[67].

El genoma de Foc se organiza en dos compartimentos funcionalmente diferenciados^{[68] [69]}:

- **Núcleo conservado (core):** 11 cromosomas con funciones housekeeping presentes en todas las ff. spp. de *F. oxysporum*.
- **Genoma accesorio (accessory):** ≈4,84 Mb integrados en los extremos de los cromosomas 3 (≈1,19 Mb) y 11 (≈0,97 Mb) según Ma et al. ^[66]. Contiene genes de virulencia específica y elementos transponibles activos, incluyendo translocación cromosómica mediada por Helitron demostrada en aislado UK0001^[70].

Repertorio de virulencia – genes SIX [29]: proteínas secretadas al xilema que suprimen la inmunidad del hospedero. TR4 posee tres copias de SIX1 (Six1a, Six1b, Six1c), mientras que Raza 1 solo una copia^[28]. La triplicación de SIX1 es una de las diferencias funcionales más relevantes entre TR4 y R1: El aumento de formas de SIX1 en TR4 podría ser una adaptación necesaria para iniciar la infección en la búsqueda de plantas Cavendish resistentes^[28]. La hidrofobina HV9 de Foc4 está marcadamente inducida a 48 h postinoculación en banano Brazil pero suprimida en Foc1, indicando papel específico en interacciones con el hospedero^[29].

Otros factores de virulencia relevantes: MAPKs (Fmk1, Mpk1), quinasa SNF1, ácido fusárico (micotoxina), transposones tipo Fot5 adyacentes a SIX13^[71].

Links a secuencias

II-5 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_000260195.1/

UK https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_007994515.1/

MC3 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/JBJYIQ000000000.1/>

Broad, NRRL 54006 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_000260195.1/

UK https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_007994515.1/

CIAT https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_021237285.1/

hn51 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_027920445.1/

BC2-4 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_014282265.3/

Fo47, NRRL:54002 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_013085055.1/

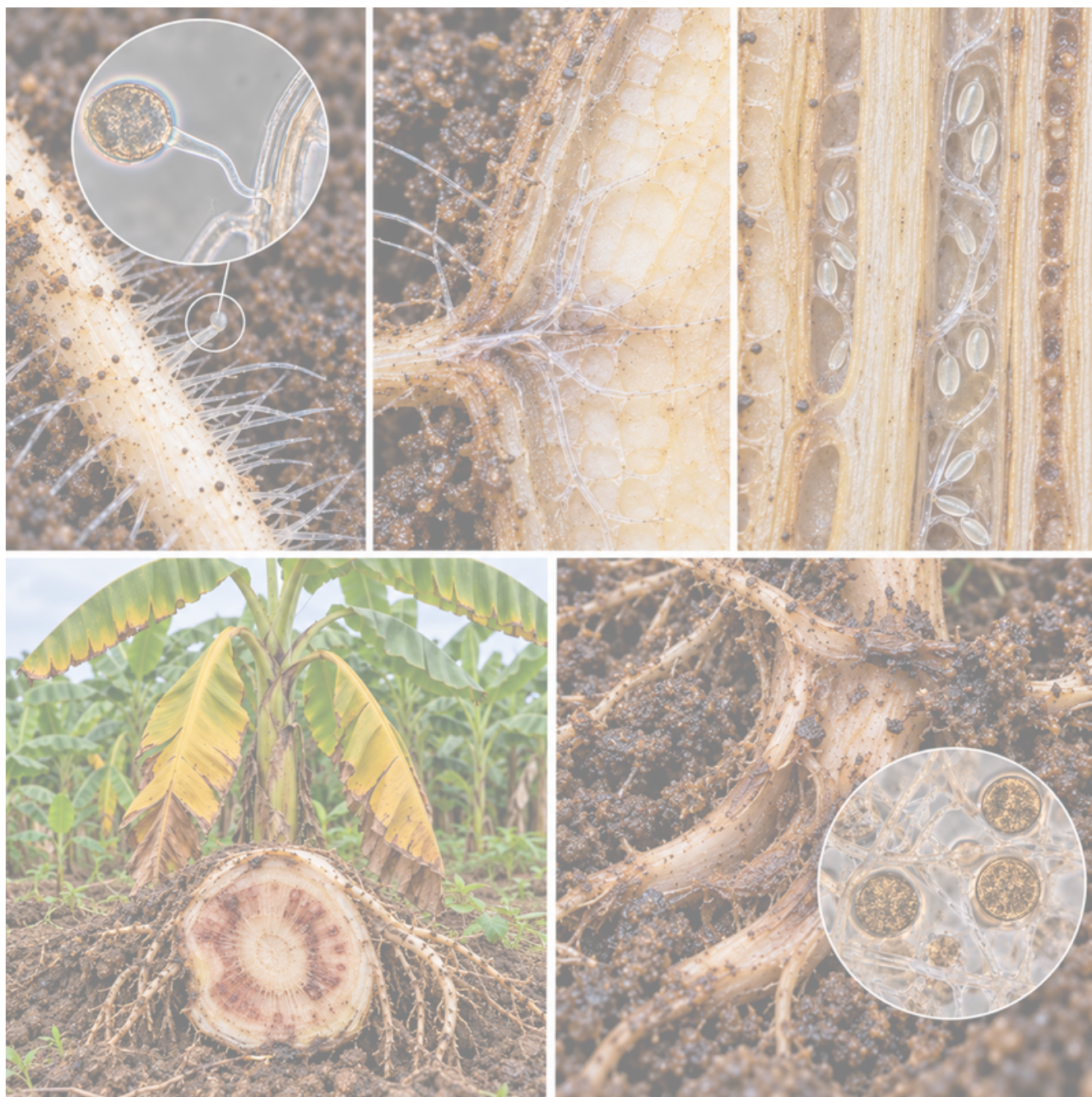
5.5 Mecanismo de infección (ciclo)

El ciclo se desarrolla en **cinco fases**:

1. **Germinación de clamidosporas y reconocimiento del hospedero.** En presencia de exudados radiculares de un hospedero susceptible, las clamidosporas germinan y las hifas se adhieren a la superficie de pelos radiculares^[5].
2. **Penetración y colonización cortical.** Las hifas penetran por puntas de raíces laterales, heridas naturales, o mediante supresión directa de defensas del hospedero vía efectores SIX secretados [72]. Foc4 penetra mediante espacio intercelular de la epidermis y heridas; Foc1 solo por heridas. Una vez en el interior, el hongo atraviesa córtex y endodermis hasta alcanzar vasos xilemáticos^[73].
3. **Colonización vascular y movimiento acrópeto.** El micelio avanza acrópetamente por el xilema hasta el cormo y el pseudotallo^[30]. Las microconidias producidas son transportadas por la corriente transpiratoria, facilitando la dispersión sistémica^[2].
4. **Obstrucción vascular y marchitamiento.** La colonización masiva del xilema + respuesta defensiva del hospedero (tilosis, gomas) causa obstrucción mecánica. Síntomas: amarillamiento foliar progresivo desde los bordes, decoloración vascular rojiza-amarronada típica en pseudotallo y rizoma, marchitez irreversible y muerte^[2].

5. **Ciclo saprofítico y producción de nuevas clamidosporas.** Tras la muerte del hospedero, el hongo degrada tejidos necróticos en fase saprofítica, produciendo nuevas generaciones de clamidosporas que reabastecen el reservorio edáfico^[2].

Diferencia crítica con R1: TR4 no requiere estrés predisponente para invadir Cavendish^[6]; Raza Sub tropical requiere estrés (temperaturas frescas, hídrico, suelos pobres)^[21].



6. DIAGNÓSTICO MOLECULAR Y DETECCIÓN

6.1 Principio operacional

La confirmación inequívoca de Foc TR4 es el cuello de botella que separa las fases de respuesta fitosanitaria. Una vez que los síntomas visuales son evidentes, la planta suele estar irrecuperablemente colonizada y constituye un foco activo de dispersión^[21]. Por esto, los protocolos modernos se estructuran en **escalas de confirmación creciente**, donde la detección presuntiva en campo debe ser confirmada por métodos moleculares específicos antes de activar protocolos de erradicación química y notificación oficial ^{[11], [21]}.

6.2 Detección presuntiva y aislamiento

Nivel presuntivo: inspección visual de síntomas (amarillamiento foliar progresivo, decoloración vascular rojiza-amarronada) + aislamiento en medio Komada o PDA semiselectivo. La morfología colonial sobre PDA – pálido salmón con micelio flocoso a partir de xilema desinfestado – es característica pero no exclusiva: "On half-strength PDA amended with 100-ppm streptomycin sulfate, pale salmon-colored colonies with floccose mycelia developed consistently from surface-disinfested xylem"^[47].

Confirmación por compatibilidad vegetativa: mediante mutantes nit incapaces de utilizar nitrato, los aislamientos se clasifican en uno de los 24 VCGs conocidos^[47]; un aislamiento clasificado como **VCG 01213 = VCG 01216** constituye identificación presuntiva de TR4.

⚠ Limitación crítica: este proceso requiere **4-8 semanas** desde muestreo de campo hasta identificación de VCG. Además, VCG testing requiere cepas tester de los 24 VCGs de referencia, disponibles solo en laboratorios especializados^[48].

6.3 PCR convencional Dita et al. 2010 (estándar internacional)

COMPONENTE	SECUENCIA (5'→3')	CARACTERÍSTICA
FocTR4-F	CACGTTTAAGGTGCCATGAGAG	Forward 23-mer, región IGS ribosomal
FocTR4-R	GCCAGGACTGCCTCGTGA	Reverse 18-mer
Amplicón	463 pb	Banco de prueba diagnóstica
Diana molecular	2 SNPs específicos en región IGS del operón ribosomal nuclear	Permite discriminación VCG 01213

La sensibilidad es suficiente para detectar TR4 directamente de tejido infectado sin necesidad de cultivo puro, reduciendo el tiempo diagnóstico de 4-8 semanas a **8-24 horas** post-extracción de ADN. El protocolo incluye cebadores internos para *Musa acuminata* y *M. balbisiana* que permiten un multiplex confirmando simultáneamente especie hospedera – aspecto crítico para distinguir Cavendish de otros cultivares^[11].

⚠ Limitación documentada [48]: el ensayo puede generar resultados negativos falsos en tejido vegetal naturalmente infestado cuando la concentración del patógeno es subóptima o cuando está presente un aislado VCG 0121 con similitud parcial.

COMPONENTE	SECUENCIA (5'→3')	CARACTERÍSTICA
FocTR4-F	CACGTTTAAGGTGCCATGAGAG	Forward 23-mer, región IGS ribosomal
FocTR4-R	GCCAGGACTGCCTCGTGA	Reverse 18-mer
Ampliación	463 pb	Banco de prueba diagnóstica
Diana molecular	2 SNPs específicos en región IGS del operón ribosomal nuclear	Permite discriminación VCG 01213

6.4 qPCR TaqMan – Aguayo et al. 2017

COMPONENTE	SECUENCIA (5'→3')	CARACTERÍSTICA
FWB-TR4-F	CGGTCTCGGCCAAATCTGATT	Forward
FWB-TR4-R	ACGACTTATCTAGCGGTTGATGTG	Reverse
FWB-TR4-P	ACCCTTCAACTCCACTCGATCGCA	Sonda TaqMan con fluoróforo + quencher
Ampliación	180 pb	Región específica
Condiciones	60 °C hibridación/polimerización	—

⚠ Caveat crítico sobre especificidad^[12]: el ensayo arroja resultados positivos con ADN de **VCG 01213/16** y **VCG 0121**, “independientemente del origen geográfico y de la variedad de banano”. Por tanto, FWB-TR4 es excelente como screening rápido y cuantitativo pero requiere confirmación subsecuente mediante secuenciación o PCR SIX cuando se requiere discriminación absoluta.

6.5 qPCR universal fúngico (control interno)

COMPONENTE	SECUENCIA (5'→3')	CARACTERÍSTICA
18S uni-F	GCAAGGCTGAACTTAAAGGAA	Forward, región 18S rRNA
18S uni-R	CCACCACCCATAGAATCAAGA	Reverse
18S uni-P	ACGGAAGGGCACCACCAGGAGT	Sonda TaqMan (loos et al. 2009, citada en ^[34])

Este par detecta **cualquier hongo presente en la muestra**; NO es diagnóstico de TR4; su función exclusiva es **validar que la extracción de ADN** funcionó y que no hay inhibidores de PCR^[12].

6.6 Duplex PCR VCG 0121

Carvalhais et al. 2019 desarrollaron duplex PCR para detección específica de VCG 0121 mediante amplificación simultánea del gen SIX10 y su homólogo "a" del gen SIX9 ^[34].

 : SIX10a_309 está presente en aislados endófitos asintomáticos de *F. oxysporum* en plantas no-Musa. Sin confirmación duplex con SIX9, este primer puede generar falsos positivos.

6.7 RT-qPCR SYBR-Green para suelo y agua

Cebadores RT_13.16_F2.5 / RT_13.16_R2.5 específicos para SIX13 homólogo, con multiplex optimizado a 68 °C que incluye cebadores para linaje VI y Tropical Raza 4 tropical^[35]. Particularmente relevante para LAC porque permite **vigilancia ambiental proactiva**: muestreo de agua de riego, suelo de caminos de acceso y material de siembra antes de síntomas ^[35] – estrategia clave para anticipar incursiones en Ecuador, Costa Rica y República Dominicana^[3].

6.8 Cuadro comparativo: métodos moleculares disponibles

#	MÉTODO	DIANA MOLECULAR	AMPLICIÓN	ESPECIFICIDAD	TIEMPO	FUENTE
1	PCR convencional Dita 2010	IGS — 2 SNPs VCG 01213	463 pb	Solo VCG 01213	8–24 h	[11]
2	qPCR TaqMan FWB-TR4 Aguayo 2017	Gen proteína hipotética	180 pb	VCG 01213/16 + VCG 0121	4–8 h (cuantitativo)	[12]
3	qPCR 18S universal	ITS universal fúngica	Variable	Universal NO TR4-específico	4–6 h	[12][74]
4	Duplex PCR VCG 0121	SIX10 + SIX9-a	Variable	Solo VCG 0121 (con SIX9)	8–24 h	[34]
5	PCR Li 2013 (par VCG01213/16)	Mutante W2987	1400 pb	VCG 01213/16 + aislados relacionados	8–24 h	[75]
6	RT-qPCR SYBR-Green Matthews 2020	SIX13 homólogo	Variable	Lineage VI + TR4 + STR4 multiplex cuantitativo	6–10 h	[35]
7	PCR SCAR Yang 2013 (Foc4_0422)	Marcador SCAR	Variable	VCG 01213/16 + VCG 0121	8–24 h	[12]
8	VCG testing clásico	Mutantes nit complementación	—	Cualquier VCG	4–8 semanas	[21][47]

6.9 Protocolo operativo recomendado para LAC (4 niveles)

Nivel 1 – “Screening” masivo (vigilancia ambiental en suelo, agua, material vegetal asintomático):

1. qPCR universal 18S como control de calidad de extracción^[12, p. 15].
2. RT-qPCR SIX13 para detección cuantitativa en suelo y agua con multiplex VCG 01213/16/TR4/STR4^[35, p. 16].

Nivel 2 – Confirmación específica de primer caso sospechoso (zona libre de TR4):

1. PCR convencional Dita IGS 463 pb como estándar de referencia nacional^[76, p. 471].
2. qPCR TaqMan FWB-TR4 180 pb en paralelo para cuantificación^[12, p. 11].

Nivel 3 – Confirmación oficial para notificación fitosanitaria internacional (CIPF/IPPC):

1. PCR Dita + PCR Li 2013 (cebadores VCG01213/16)^[76, p. 471] para reducir falsos negativos.

2. Secuenciación Sanger del amplicón IGS / SIX13.
3. Aislamiento en medio Komada + PDA + VCG testing cuando sea posible.

Nivel 4 – Discriminación entre VCG 01213 y VCG 0121 (cuando se requiere certeza absoluta):

1. Duplex PCR SIX10 + SIX9-a^[34, p. 7].
2. Análisis filogenético multilocus (tef1, rpb1, rpb2) según Maryani et al.^[59].

Conclusión operativa de Magdama et al.^[48]: “ningún ensayo individual provee especificidad absoluta”. La consecuencia operativa es la necesidad de usar al menos dos métodos en confirmación cruzada^[48].

6.10 Implementación regional: vacíos y prioridades

Carencias críticas detectadas en LAC:

1. **Acceso limitado a cepas tester VCG.** Los 24 VCGs de referencia requieren acuerdos de transferencia de material^[48].
2. **Ausencia de capacidad regional de secuenciación Sanger dedicada.** La confirmación de ICA, Agrocalidad, SENASA/INIA, INSAI depende de colaboraciones puntuales con centros internacionales^{[48], [53], [54]}.
3. Validación insuficiente de cebadores para aislados LAC. Los cebadores Dita^[11] y Aguayo^[12] fueron validados con aislados asiáticos; no se han re-validado con aislados sudamericanos según estándares modernos^{[48], [67]}.

Recomendaciones prioritarias para inversión regional:

PRIORIDAD	ACCIÓN	JUSTIFICACIÓN
1	Establecer laboratorio regional de referencia TR4 en LAC con capacidad VCG + secuenciación + bioinformática	Reduce dependencia de centros externos ^[55]
2	Implementar validación cruzada anual de cebadores con aislados confirmados de Colombia, Perú y Venezuela	Asegurar que primers IGS y SIX siguen siendo efectivos ante microevolución regional ^[34]
3	Desarrollar SYBR-Green multiplex para suelo y agua según protocolo Matthews et al.	Vigilancia ambiental preventiva en cuencas hidrográficas ^[77]
4	Capacitar técnicos en aislamiento Komada + VCG testing básico	
5	Adoptar LAMP para diagnóstico rápido en campo sin termociclador	Reduce brecha tecnológica entre productores grandes y pequeños ^{[41], [42]}

7. HISTORIA, DISPERSIÓN GLOBAL Y LLEGADA A AMERICA LATINA

7.1 Cronología comparada de las dos pandemias

ASPECTO	PRIMERA PANDEMIA	SEGUNDA PANDEMIA
Primer reporte	**Australia, 1874 ** ^[78]	**Taiwán, 1967 ** ^[21]
Cultivar afectado	'Gros Michel' ^[79]	'Cavendish' (+ R1/R2-susceptibles) ^{[30] , [79]}
Primeras pérdidas	Costa Rica y Panamá, 1890 ^[40]	Sudeste asiático y Australia ^[4]
Colapso comercial	Década de 1960 ^[40]	En expansión continua desde 2010 ^[22]
Solución aplicada	Sustitución por Cavendish ^[40]	Medidas de bioseguridad y control integrado ^[21, p. 13]
Países afectados (2018 → 2024)	Histórico >50	**16 → 23 ** ^[3]

La transición a Cavendish consolidó una vulnerabilidad estructural sin precedentes: este clon domina ≈40 % del área global y ≈99 % de las exportaciones internacionales (≈15 % de la producción mundial por ≈USD 11 200 millones anuales) ^{[4] , [16] , [22] , [40] , [80]}. TR4 fue detectado fuera del Sudeste Asiático por primera vez en 2013^[81].

7.2 Expansión intercontinental (2013-2025)

El análisis de aislados representativos reveló una estructura clonal secundaria en linajes geográficos, consistente con mutaciones locales acumuladas durante ciclos repetidos de infección asexual sin contradecir la hipótesis del clon fundador único^{[8] , [81]}.

AÑO	PAÍS/REGIÓN	NOTAS
2013	Jordania, Mozambique	Incursión intercontinental ^{[47] , [82]}
2015–2016	Pakistán, Líbano, Israel, Australia	Cercanía filogenética con aislados filipinos ^[81]
2016–2017	Vietnam, Laos	Estructura clonal confirmada ^[40]
2016	Myanmar	^[40, p. 2]
2019	Colombia	**Primera incursión ALC ** ^[83]
2021	Perú	**Valle del Chira, Querecotillo ** ^[54]
2022	Venezuela	**Aragua, Carabobo, Cojedes ** ^[53]
Diciembre 2025	Ecuador	**Primera notificación oficial al sistema CIPF/IPPC ** ^[26]

El análisis de aislados representativos reveló una estructura clonal secundaria en linajes geográficos, consistente con **mutaciones locales acumuladas durante ciclos repetidos de infección asexual** sin contradecir la hipótesis del clon fundador único^[8], ^[81].

7.3 Llegada a América Latina y el Caribe (2019-2025)

La incursión de TR4 en LAC constituye la mayor amenaza fitosanitaria en la historia reciente de las musáceas en el continente^[61]. **Cronología confirmada a través del sistema fitosanitario internacional:**

AÑO	PAÍS	HITO
Agosto 2019	Colombia	Primera detección en La Guajira; emergencia nacional por ICA ^[83]
2021	Colombia	Dispersión confirmada a Magdalena ^[3]
Abril 2021	Perú	Primera incursión en Cavendish (~1 ha, Querecotillo: 4°45'54,84"S 80°33'45,00"W) ^[54]
Julio 2022	Venezuela	Detección en cultivar Valery en Aragua, Carabobo y Cojedes ^[53]
Junio 2023	Perú	**207 casos confirmados en Valle del Chira; 73 000 ha mapeadas con 133 700 imágenes áreas ** ^[17]
Enero 2023	Venezuela	INSAI declara Foc TR4 plaga de reciente introducción; cuarentena oficial ^[53]
2023	Colombia	Confirmación en plátano, cultivo básico regional ^[3]
2024	Colombia	20 grandes fincas comerciales de exportación afectadas ^[3]
Diciembre 2025	Ecuador	**Confirmación oficial en el principal exportador mundial ** ^[16] , ^[26]

Aspectos críticos de la incursión ecuatoriana:

1. **Validación por sistema oficial internacional.** La confirmación requirió protocolos estandarizados de muestreo, aislamiento en medio selectivo, diagnóstico molecular y secuenciación genómica.
2. **Contexto de reservorio edáfico preexistente.** Estudios de Magdama et al. demostraron que las poblaciones ecuatorianas de Foc asociadas a R1 comprendían un solo linaje clonal del VCG 0120.La asignación VCG históricamente responsable de la pandemia en Gros Michel en la década de 1950^[60]. Ecuador albergaba ya un reservorio edáfico de aislados Foc antes de TR4.

3. **Cronología de contención previa.** Durante el periodo 2019-2021, Ecuador implementó medidas de bioseguridad bajo la Resolución 0002 de Agrocalidad como parte de la estrategia para mantener el estatus libre^[38]. El estudio de Vasquez Inca y Huamán Febres (período 2018-2022) confirmó este éxito^[26]. La incursión de diciembre 2025 confirma que **las estrategias de exclusión retardan pero no eliminan el riesgo**.
4. **Concordancia con predicciones climatológicas.** Los modelos lineales de Cindy Michelle et al.^[84] estimaron que ≈ 50 % del área productiva de Guayas y Los Ríos caía en zonas de favorabilidad agroclimática muy alta; la confirmación oficial valida estos modelos.

7.4 Panorama regional consolidado (2025-2026)

PAÍS	ESTATUS TR4	FECHA 1ª NOTIFICACIÓN OFICIAL	ÁREA/ PRODUCTORES AFECTADOS	PRODUCCIÓN NACIONAL	NOTAS
Colombia	Presente	Agosto 2019	20 grandes fincas comerciales; uso mayoritario de cormos ^[3]	Magdalena y Antioquia son las regiones clave	VPN de bioseguridad positivo (\$95 389–\$112 527/ha); BCR 3,1–4,2 ^[14]
Perú	Presente	Abril 2021	Valle del Chira; >400 pequeños productores orgánicos ^[3]	10 246,82 ha orgánicas; 8 411 productores	Piura concentra 93 % del área orgánica nacional ^[85]
Venezuela	Presente	Julio 2022	3 estados, 5 municipios ^[3]	533 190 t/35 896 ha (~14 853 kg/ha) ^[53]	Orientado al consumo doméstico; seguridad alimentaria nacional comprometida ^[53]
Ecuador	Presente	Diciembre 2025	Bajo caracterización oficial	Mayor exportador mundial (23,55 % del comercio global) [16]; ≈ 2 % del PIB; $\approx 2,5$ millones de personas beneficiadas ^[26] ^[27]	Primera incursión confirmada en el principal exportador mundial
Cuba	Libre pero vulnerable	—	—	18 variedades; **ninguna resistente a TR4; 72,8 % del área nacional susceptible o muy susceptible ** ^[25]	—
República Dominicana	Libre pero vulnerable	—	—	Mayor exportador mundial de banano orgánico; Valverde y Monte Cristi ^[39]	Expuesto a ciclones tropicales recurrentes
Costa Rica, Guatemala, Honduras, Panamá, Brasil, Bolivia, Paraguay, Uruguay	Libre	—	—	—	Riesgo elevado por proximidad geográfica con países que tienen el problema.

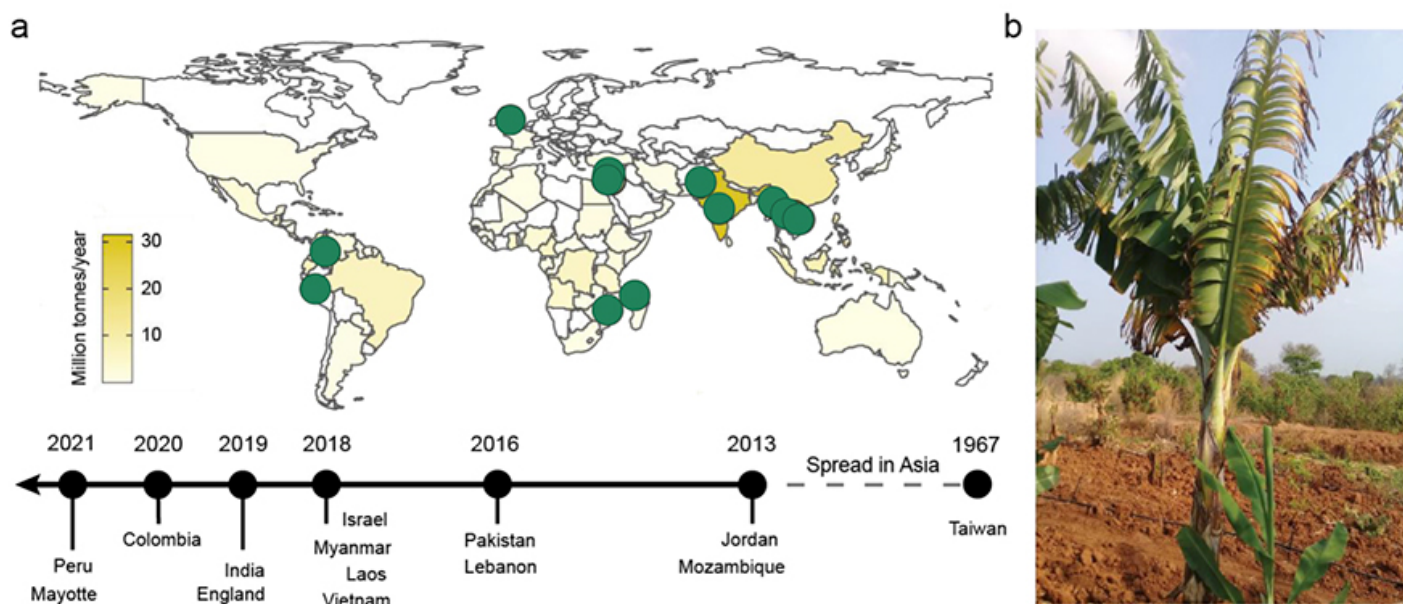


Figura 3. Mapa mundial descargado de Natural Earth Data con incursiones TR4 marcadas con puntos verdes en países que tienen el problema. Los países están coloreados según la producción de banano en millones de toneladas por año. (B) muestra una planta Cavendish en Mozambique con síntomas externos de FFB por TR4. **Otros sitios de interés para dar seguimiento** <https://gd.eppo.int/taxon/FUSAC4/distribution>



8. DIAGNÓSTICO DIFERENCIAL: TR4 VS OTRAS ENFERMEDADES VASCULARES Y DE FOLLAJE

ENFERMEDAD	AGENTE CAUSAL	VECTOR/ DISPERSIÓN	SÍNTOMA FOLIAR DISTINTIVO	COLOR VASCULAR AL CORTE	VELOCIDAD DE AVANCE	CONFIRMACIÓN MOLECULAR DE REFERENCIA
TR4	<i>F. odoratissimum</i>	Suelo, agua, hijuelos, herramientas, calzado	Amarillamiento foliar uniforme progresivo desde borde; sin manchas	Lenta (semanas- meses)	VPN de bioseguridad positivo (\$95 389-\$112 527/ha); BCR 3,1-4,2 ^[14]	PCR Dita 463 pb ^[11]
Mal de Panamá Raza 1	<i>F. oxysporum</i> f. sp. cubense R1	Suelo, hijuelos	Amarillamiento desde borde (afecta Gros Michel; NO Cavendish salvo estrés)	Lenta (semanas- meses)	Piura concentra 93 % del área orgánica nacional ^[85]	VCG testing + patogenicidad diferencial
Mal de Panamá Raza Sub tropical	Varios VCGs de <i>F.</i> <i>oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i>	Suelo, hijuelos	Similar a TR4 pero solo en Cavendish bajo estrés	Lenta	Orientado al consumo doméstico; seguridad alimentaria nacional comprometida ^[53]	PCR + VCG testing
Moko bacteriano	<i>Ralstonia</i> <i>solanacearum</i>	Suelo, agua, herramientas, insectos	Marchitamiento rápido , colapso turgencia, muerte en días	Rápida (días)	Primera incursión confirmada en el principal exportador mundial	PCR específica para <i>R.</i> <i>solanacearum</i>
Banana Xanthomonas Wilt	<i>Xanthomonas</i> <i>campestris</i> pv. <i>musacearum</i>	Insectos, herramientas, plantas infectadas	Amarillamiento + marchitez; exudado bacteriano amarillo al corte	Rápida (semanas)	Libre pero vulnerable	PCR específica Xcm ^[86]
Sigatoka Negra	<i>Pseudocercospora</i> <i>fijiensis</i>	Viento, lluvia, esporas	Manchas foliares necróticas elongadas negras; afecta hojas, NO sistema vascular	Media (4-6 ciclos por temporada)	Expuesto a ciclones tropicales recurrentes	PCR ITS para <i>P. fijiensis</i>
Sigatoka Amarilla	<i>Pseudocercospora</i> <i>musae</i>	Viento, lluvia	Manchas amarillas; menos agresiva que Sigatoka Negra	Media	Libre pero vulnerable	PCR ITS
Banana Bunchy Top Virus	BBTV	Áfidos <i>Pentalonia</i> <i>nigronevosa</i>	"Bunchy top": hojas erectas, acortamiento, atrofiamiento	Media	Libre pero vulnerable	PCR específica BBTV
Blood Disease	<i>Ralstonia</i> <i>syzygii</i> subsp. <i>celebesensis</i>	Insectos, herramientas	Similar a Moko bacterial	Rápida	Riesgo elevado por proximidad geográfica con países que tienen el problema.	PCR

Regla diagnóstica operativa: frente a marchitez + decoloración vascular interna + amarillamiento desde borde → **sospecha de TR4**; confirmación molecular obligatoria ^[87, P. 41].
No confundir Sigatoka Negra (afecta hojas, no vascular) ni Moko (vascular pero bacteriano, avance rápido) ^[88, P. 335].

9. MARCO REGULATORIO LAC POR PAÍS

Tabla sintetizando las principales regulaciones fitosanitarias vigentes en LAC frente a Foc TR4 (datos verificados a junio 2026; puede requerir actualización conforme evolucione la normativa):

PAÍS	LEGISLACIÓN ESPECÍFICA	ORGANISMO RESPONSABLE	SANCIONES	MEDIDAS OBLIGATORIAS
Ecuador	Resolución 0002 de Agrocalidad (enero 2020); normativa complementaria en actualización post-diciembre 2025	Agrocalidad	Multas + decomiso + erradicación obligatoria de focos	Declaraciones fitosanitarias adicionales obligatorias en certificados fitosanitarios de exportación; restricción de movilización de material vegetal desde zonas afectadas; campañas intensivas de monitoreo ^{[26], [38]}
Colombia	Resoluciones ICA para emergencia nacional por TR4[76, p. 332]; marco de cuarentena vegetal nacional	ICA	Multas + erradicación obligatoria + sanciones por movilización de material sin autorización	Vigilancia activa; erradicación de focos en La Guajira y Magdalena; restricción de material de propagación no certificado
Perú	Resoluciones SENASA/INIA; marco nacional de cuarentena vegetal post 2021	SENASA / INIA	Multas + destrucción obligatoria de focos	Mapeo aéreo anual del Valle del Chira; vigilancia reforzada de material orgánico certificado
Venezuela	Resoluciones INSAI; declaración oficial de plaga de reciente introducción (enero 2023)	INSAI	Sanciones por movilización no autorizada	Cuarentena oficial; prospecciones exhaustivas en Aragua, Carabobo, Cojedes ^[53]
Costa Rica	Marco OIRSA + SFE; plan de contingencia TR4	Servicio Fitosanitario del Estado	—	Vigilancia preventiva; restricciones a material vegetal importado
Guatemala, Honduras, Panamá	Marcos regionales OIRSA armonizados	OIRSA + ministerios de agricultura nacionales	—	Vigilancia fronteriza
Cuba	Medidas fitosanitarias reforzadas post 2023 para evitar incursión	Ministerio de Agricultura	—	Evaluación de 18 variedades nacionales ^[25] ; alerta por 56 % del área sembrada con cultivares susceptibles
República Dominicana	Marco fitosanitario nacional + OIRSA	Ministerio de Agricultura	—	



Armonización regional limitada: no existe protocolo común obligatorio entre las ONPF de LAC; el intercambio de información y material depende de acuerdos bilaterales puntuales.

10. IMPACTO ECONÓMICO Y EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA

10.1 Contexto económico global del banano

INDICADOR GLOBAL	VALOR	FUENTE
Producción mundial anual	≈117 millones de toneladas	[16]
Comercio internacional	≈15 % de la producción global (≈19 Mt)	[89]
Valor de exportaciones	≈USD 11 200–12 000 millones	[4]
Cavendish en producción global	≈40 %	[16] [4]
Cavendish en exportaciones	≈99 %	[80]
Concentración oligopólica (4 mayores: Dole, Chiquita, Fresh DelMonte, Fyffes)	45 %; antes ≈62 %	[16]

La concentración monovarietal multiplica exponencialmente el riesgo pandémico global^[6]. Siete de los diez principales países exportadores son LAC^[3]; ≈80 % de las exportaciones internacionales provienen de LAC^[9].

10.2 Dimensión país por país

PAÍS	DATOS CLAVE	FUENTE
Ecuador	2 % del PIB; ≈2,5 millones de personas beneficiadas directa e indirectamente; principal rubro de exportaciones no petroleras; principal exportador mundial (23,55 %)	[16]
Colombia	Razón beneficio-costos bioseguridad 3,1–4,2; propagación por cormos prevalece	[89]
Perú	Valle del Chira exporta ≈25 % del banano orgánico mundial; 207 casos TR4 al 8 de junio de 2023	[4]
R. Dominicana	Cuenca del Yaque del Norte; ciclones tropicales exacerban riesgo	[16] [4]
Cuba	18 variedades evaluadas: ninguna resistente a TR4; 72,8 % del área nacional cubierta por estas variedades; 56 % del área en cultivares susceptibles o muy susceptibles	[80]

10.3 Análisis costo-beneficio de la bioseguridad

Colombia – estudios recientes sobre rentabilidad territorial de las medidas de bioseguridad [14]:

DEPARTAMENTO	VPN POR HA	RELACIÓN BENEFICIO-COSTO
Magdalena	USD 95 389	3,1
Antioquia	USD 112 527	4,2

Las empresas transnacionales implementan costos recurrentes en medidas de bioseguridad, tales como pediluvios y lavado vehicular.

Escala global – estudio ex ante de Staver et al. (2012-2016) [13]:

ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN	TIR EX-ANTE	OBSERVACIÓN
ICDM	30 %	Mayor rentabilidad esperada
Mejoramiento convencional	20 %	Sólido
Cultivo transgénico	28 %	Comparable a ICDM, pendiente aceptación regulatoria
Exclusión/vigilancia/cuarentena	Positivo bajo adopción conservadora	Complemento indispensable

Todos los escenarios superan la tasa **umbral del 10 %**, justificando inversión temprana^[13].

10.4 Vulnerabilidad diferenciada por escala productiva

El impacto del TR4 no es homogéneo:

- **Pequeños productores familiares:** capacidad limitada de inversión; uso predominante de cormos no certificados; acceso restringido a servicios de extensión técnica en el municipio de Alto Beni, Bolivia^[90]. En Perú, >400 pequeños
- **Empresas transnacionales de exportación:** mayor capacidad financiera y acceso a cultivo de tejidos certificado^[13].
- **Cambio climático:** ciclones tropicales (Yaku en Perú en 2023^[17]; recurrentes en RD [39]) y sequías multiplican vulnerabilidad de los productores^{[3], [57]}.

Tiempo crítico de reemplazo elevado: encontrar variedad sustituta o desarrollar Cavendish transgénico efectivo es un desafío prolongado, durante el cual los productores afectados acumulan pérdidas sin garantía de recuperación^[8].



11. ESTRATEGIAS DE MANEJO BASADAS EN EVIDENCIA

11.1 Bioseguridad

La contención física sigue siendo la primera línea de defensa, aunque las cuarentenas internacionales no han detenido la progresión pandémica^[91, p. 1450].

Protocolo Queensland – programa cooperativo gobierno-industria que mantuvo el brote en solo **tres propiedades afectadas cuatro años** después^[21]:

1. Vigilancia intensiva con detección y remoción precoz.
2. Separación zonal de fincas (zonas limpia/sucia/aislamiento).
3. Pediluvios obligatorios en puntos de acceso.
4. Descontaminación vehicular y de maquinaria.
5. Material de siembra exclusivamente de cultivo de tejidos certificado.

Protocolo de erradicación con urea^[21]:

1. Inyección de las plantas afectadas con herbicida sistémico^[21, p. 12].
2. Aplicación de 1 kg de urea/m² al suelo circundante^[21, p. 12].
3. Cobertura con lona plástica para generar amoníaco letal^[21, p. 12].
4. Pseudotallo y hojas embolsados con 1 kg adicional de urea^[21, p. 12].

Punto de revisión: en el protocolo reciente de Queensland, las plantas sintomáticas **NO** fueron inyectadas con herbicida porque la muerte de las plantas predispone a una colonización más rápida del hongo, aumentando así la cantidad de inóculo en la planta afectada. ^[21].

Eficacia cuantificada de biocidas contra aislados LAC y globales:

BIOCIDA / FUNGICIDA	CONDICIONES	EFICACIA	FUENTE
QAC ≥10 % ingrediente activo (1:100)	Independientemente de la presencia de suelo	100 % eliminación de propágulos	[19]
QAC comerciales (cepa 140038 La Guajira)	Sin suelo; <1 min	100 %	[20]
QAC3_1st, QAC7_4th, QAC5_4th	Con suelo; <1 min	98–100 % frente a clamidosporas	[20]
Glutaraldehído (500–2000 ppm)	Con suelo; 15 min	100 % de eliminación	[20]
Hipoclorito de sodio al 10% (1:10)	—	100 % de eliminación	[19]
EvoTech 213 (bioflavonoide)	—	100 % de eliminación	[19]
Procloraz	Inmersión radical Cavendish + STR4	80 % reducción de severidad	[21]
Propiconazol	Inmersión radical Cavendish + STR4	75 % reducción de severidad	[21]

⚠ Los benzimidazoles tradicionales fueron descontinuados a nivel global.^[92] —

11.2 Variedades tolerantes convencionales

El Instituto del Banano de Taiwan (TBRI) desarrolló las variantes somaclonales **“Giant Cavendish Tissue Culture Variants”** mediante cultivo de tejidos del cultivar susceptible ‘Pei-Chiao’ y selección masiva en campo bajo presión extrema de inóculo durante múltiples ciclos^[33].

VARIEDAD	RESISTENCIA	USO RECOMENDADO	VALIDACIÓN EXTERNA
GCTCV-118/119	Intermedia	Uso limitado	Primera generación ^[30]
GCTCV-218 (Formosana / Tai-Chiao n.º 5)	Moderada ^[32]	Comercial preferido; racimos grandes, calidad superior^[32]	Filipinas: resistencia estable tras 4 ciclos ^[32]
GCTCV-219	Alta ^[33]	Rehabilitación de granjas gravemente afectadas; pequeños productores; fruta dulce ^[32]	Filipinas: estable tras 4 ciclos ^[32]
Tai-Chiao n.º 7	Alta ^[33]	Comercial en algunas regiones	Seleccionada por TBRI ^[33]

⚠ Limitaciones críticas: las GCTCV presentan resistencia **intermedia, no inmunidad**; publicaciones con revisión por pares sobre dinámica de inóculo a escala comercial a largo plazo no están disponibles^[30]. Constituyen **solución transitoria**, no reemplazo del desarrollo biotecnológico.

Dato cuantitativo de Filipinas: “GCTCV 218 y GCTCV 219 son las opciones más disponibles y aceptadas. En lotes comerciales, ellos fueron resistentes durante cuatro ciclos del cultivo. GCTCV 218 (resistencia moderada) presento racimos más grandes y buena calidad de fruta y es la preferida por los productores. GCTCV 219 (alta Resistencia) es recomendada para la rehabilitación de áreas severamente afectadas^[32].”

11.3 Biotecnología: transgénesis y edición génica

La naturaleza **estéril del banano imposibilita el cruzamiento sexual convencional** (casi todos los cultivares son triploides con alta infertilidad masculina y femenina) [93]. La solución duradera depende de biotecnología en tres rutas: **cisgénesis, transgénesis y edición génica CRISPR/Cas9^[93]**.

11.3.1 Plataforma RGA2: validación de campo

Dale et al. 2017 demostraron resistencia robusta mediante transGénesis con el gen **RGA2** aislado de Musa acuminata ssp. malaccensis (donante silvestre resistente)^[22]:

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Diseño experimental	Cassettes RGA2 y Ced9 (antiapoptótico C. elegans) en cv. Cavendish Grand Nain
Mecanismo	Cavendish posee 3 homólogos RGA2 endógenos con expresión basal ≈10× menor que línea resistente ^[22]
Diseño de campo	Territorio Norte de Australia; plantación con TR4 endémico; 3 años (terminación anticipada por cuarentena de otra enfermedad)
Resultado clave	Líneas independientes con incidencia de enfermedad significativamente reducida^[22]
Correlación cuantitativa	Línea más resistente (RGA2-3): mínima infección; expresión 10× frente a GN; controles susceptibles GN: 87,5 % de infección^[22]

11.3.2 Edición génica CRISPR/Cas9: estado del arte (a junio 2026)

⚠ Alerta de estado del desarrollo: a junio 2026 no existen variedades comerciales editadas con CRISPR que hayan superado evaluaciones de campo contra TR4 en LAC^[36].

RASGO OBJETIVO	SISTEMA	GEN EDITADO	REFERENCIA CLAVE
Marcador de regeneración	CRISPR/Cas9	MusaPDS	[51] [94]
Resistencia a <i>Xanthomonas wilt</i>	CRISPR/Cas9	MusaDMR6 (sin defectos morfológicos; 0 % síntomas en plantas editadas mejoradas)	[95]
Resistencia a BXW	CRISPR/Cas9	MusaENODL3 (50 % eventos editados permanecen asintomáticos)	[24]
Resistencia al virus del estriado del banano	Multiplex CRISPR/Cas9	eBSV en genoma B (75 % de eventos editados permanecen asintomáticos)	[18]
Reducción de altura	CRISPR/Cas9	MaGA20ox2	[96]
Aumento de β -caroteno	CRISPR/Cas9	LCY ϵ (hasta 6× contenido de β -caroteno)	[97]
Retraso de maduración	CRISPR/Cas9	MaACO1 (vida postcosecha)	[98]
Resistencia a TR4 (gen endógeno Cavendish)	CRISPR/Cas9 (teórico)	Activación RGA2 endógeno + edición codificante	[22]
Resistencia a TR4 (promotor)	CRISPR/Cas9	Edición MaNPR1 (triplica resistencia a TR4) [23]	[23]

Genes de susceptibilidad (S genes) promisorios para edición contra TR4 identificados por análisis transcriptómico^[37]:

GEN DIANA	VALIDACIÓN EXTERNA EN OTROS PATOSISTEMAS	EFFECTO ESPERADO AL EDITAR CONTRA TR4
ADH1 (alcohol deshidrogenasa 1)	<i>F. oxysporum</i> en tomate	Reducción de etanol impide colonización vascular
MLO	Patógenos fúngicos generales (mildiu)	Clásico gen S de mildiu; pérdida de función confiere resistencia durable
CsLOB1	<i>Xanthomonas</i> en cítricos	Factor de susceptibilidad en cancro cítrico
DMR6	<i>Xanthomonas</i> en banano	Regulador negativo de defensa (hidroliza salicilato); pérdida de función eleva respuesta inmune
ERF922	<i>Magnaporthe oryzae</i> en arroz	Factor de transcripción de defensa ET

11.4 Control biológico: síntesis cuantitativa

El control biológico mediante microorganismos antagonistas es una herramienta complementaria valiosa:

AGENTE DE CONTROL BIOLÓGICO	EFICACIA MÁXIMA EN CAMPO
<i>Pseudomonas</i> spp.	Hasta 79 % ^[4]
Endófitos	Hasta 70 % ^[4]
<i>Trichoderma</i> spp.	Hasta 70 % ^[4]
<i>Bacillus</i> spp.	42–55 % ^[4]
Hongos micorrícicos arbusculares	42–55 % ^[4]
<i>Fusarium</i> spp. no patogénicos	42–55 % ^[4]

Casos de estudio específicos con alta eficacia documentada:

- *Pseudomonas aeruginosa* FJAT-346-PA: 81,6 % de reducción de FWB en ensayos de maceta^[99].
- *Trichoderma asperellum* prr2 + *T. sp.* NRCB3: 47 % de reducción de incidencia FWB + 45 % de aumento de peso del racimo^[4].
- *Trichoderma viride* NRCB1: 80 % de control con granos de arroz colonizados (10^{11} UFC/g) + jaggery 5 %^[15].
- Consorcios bacterianos mixtos: 42,2 % de control + 214 % de aumento de rendimiento contra Raza 1^[4].

⚠ Restricción crítica: la eficacia en campo es generalmente **inferior a la de invernadero**. Las bioformulaciones (nanotecnología, consorcios microbianos, metabolitos bioactivos) están en evolución, pero no existe protocolo universalmente aplicable – los BCAs deben adaptarse a condiciones locales y al cultivar^[4].

11.5 Control Integrado de la Enfermedad

La estrategia más validada combina **6 componentes**:

1. **Bioseguridad estricta:** cultivo de tejidos certificado, pediluvios, zonas perimetrales segregadas (ver punto 11.1).
2. **Vigilancia fitosanitaria continua:** detección precoz + erradicación inmediata con protocolo de urea (punto 11.1).
3. **Genotipos tolerantes:** GCTCV-218/219 o tai-chiao n.º 7 en zonas infestadas (ver punto 11.2).
4. **Biocidas QAC complementarios** para vehículos, herramientas y pediluvios (ver punto 11.1).
5. **Control biológico regional** con consorcios microbianos adaptados localmente (ver punto 11.4).
6. **Transición gradual a cultivos biotecnológicos** (RGA2 sobreexpresado / ediciones CRISPR) cuando superen la regulación OGM nacionales (ver punto 11.3).

Rentabilidad ex-ante del ICDM: Según Staver *et al.*^[13], esta opción es superior a todas las individuales.

12. PROTOCOLOS DIFERENCIADOS POR ACTOR

12.1 Protocolo para el pequeño productor con sospecha de enfermedad

7 pasos accionables:

1. **No movilizar** suelo, herramientas, calzado, maquinaria ni material vegetal desde la finca.^[21, p. 1407]
2. **Aislar visualmente** la planta sospechosa con cinta de peligro.^[21, p. 1407]
3. **No cortar ni destruir** la planta hasta confirmación oficial (mala destrucción puede dispersar más inóculo).^[21, p. 1407]
4. **Notificar inmediatamente** a la ONPF local + técnico agrícola + vecinos de la finca.^[21, p. 1407]
5. **Documentar con fotografía:** hoja amarillenta desde borde, corte de pseudotallo con discoloración vascular rojiza-amarronada.^[21, p. 1407]
6. **Esperar instrucción técnica** del servicio fitosanitario antes de cualquier acción.^[21, p. 1407]
7. **Si se confirma:** aceptar la erradicación obligatoria, desinfección de equipos con QAC $\geq 10\%$ y reconsiderar futuro de la parcela.^{[19], [21, p. 1407]}

12.2 Protocolo para el técnico de campo / inspector fitosanitario

7 pasos:

1. **Inspección visual** de plantación completa (no solo planta enferma – buscar asintomáticas cercanas).
2. **Selección de muestra:** tejido de pseudotallo con discoloración vascular; también raíces y base del cormo.
3. **Documentación fotográfica** de síntomas externos y corte interno.
4. **Cadena de custodia:** muestra en bolsa estéril, etiquetada con GPS y fecha, mantenida a 4-8 °C.
5. **Transporte refrigerado** al laboratorio de diagnóstico autorizado en <24 h.

6. **Aislamiento primario** en medio Komada y PDA en el laboratorio.
7. **PCR Dita IGS 463 pb** [11] + qPCR Aguayo 180 pb^[12] + 18S universal^[12] como control.
8. **Envío de resultados** a la ONPF + reporte científico si es primera detección.
9. **En caso positivo:** activar protocolo de erradicación (ver punto 11.1).

12.3 Protocolo para el formulador de políticas públicas / NPPO

Ejes prioritarios:

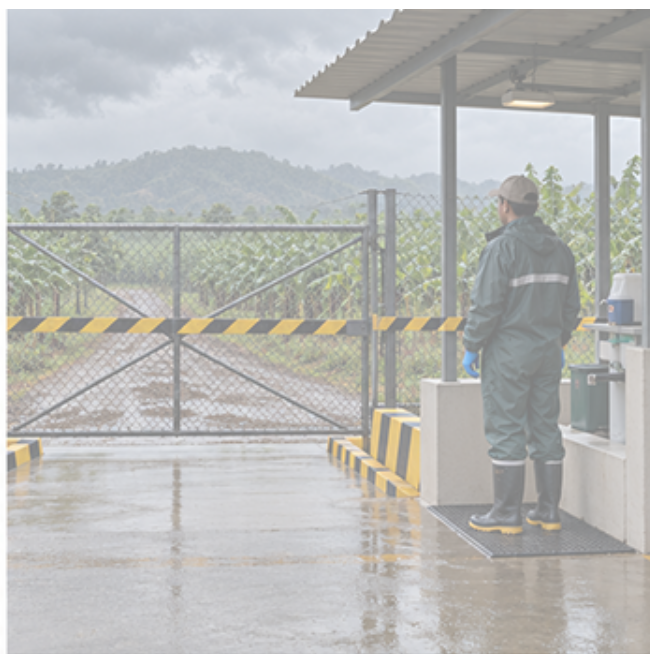
1. **Marco regulatorio explícito** para TR4 (modelo: Resolución 0002 de Agrocalidad^[38]).
2. **Plan nacional de contingencia** con presupuesto asignado antes del primer foco.
3. **Capacidad diagnóstica descentralizada** con laboratorios regionales + secuenciación disponible.
4. **Sistema de vigilancia ambiental proactiva:** muestreo de agua y suelo en cuencas hidrográficas^[35], no solo vigilancia sintomática.
5. **Subsidios para pequeños productores:** material certificado de cultivo de tejidos, infraestructura mínima de bioseguridad (pediluvios, cercado perimetral).
6. **Cooperación regional:** armonización regulatoria con países vecinos; intercambio de aislados y genomas.
7. **Inversión en investigación:** TIR ex ante de hasta un 27 % justifica programas regionales sostenidos^[13].
8. **Inversión en biotecnología nacional:** capacidades CRISPR/Cas9 propias para no depender exclusivamente de variedades multinacionales.

12.4 PROTOCOLO ANTE HURACÁN/CICLÓN TROPICAL EN ZONA CON TR4 CONFIRMADO O SUSCEPTIBLE

5 pasos críticos:

1. **Pre-evento:** muestreo de suelos y raíces en zonas bajas inundables; PCR pre-evento para cuantificar inóculo baseline.
2. **Durante evento:** no intentar muestreo; documentar áreas inundadas con GPS.

3. **Post-evento inmediato (semanas 1-4):** muestreo exhaustivo de nuevas áreas inundadas; vigilancia de síntomas foliares.
4. **Semanas 4-12:** PCR en tejido asintomático de plantas en áreas inundadas (ruta de entrada de inóculo latente).
5. **Replantación:** solo después de cuantificar inóculo en suelo con RT-qPCR SIX13^[35]; preferir áreas con inóculo nulo.



13. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

13.1 Síntesis de la amenaza

Aserción 1: La pandemia por TR4 es una emergencia fitosanitaria en expansión acelerada. Los países afectados pasaron de 16 a 23 entre 2018 y 2024^[3], con el patrón clonal del patógeno (0,01 % SNP) explicando la rapidez de la dispersión^[8]. La concentración comercial en Cavendish (99 % exportaciones; >40 % área global) configura una vulnerabilidad genética sin precedentes modernos^[6].

Aserción 2: La progresión en LAC confirma el fracaso del modelo de contención exclusiva. Colombia avanzó de La Guajira a Magdalena con 20 grandes fincas comerciales afectadas; Perú superó los 400 pequeños productores orgánicos; Venezuela confirmó incursión en tres estados; Ecuador se sumó en diciembre 2025^[3], ^[26], ^[53]. Cuba demostró que ninguna de sus 18 variedades locales resiste TR4 ^[25]. Las cuarentenas internacionales han resultado insuficientes.

Aserción 3: La economía bananera regional concentra el riesgo global. LAC produce ≈80 % de exportaciones mundiales^[9]. La inversión ex ante en ICDM (TIR 30 %^[13]), OGM/CBRC (TIR 20–28 %^[13]) y bioseguridad territorial (BCR 3,1–4,2 en Colombia^[14]) proyecta retornos positivos.

13.2 Líneas de investigación priorizadas

LÍNEA	ACCIÓN CONCRETA	RAZONAMIENTO
Caracterización genómica regional	Secuenciar aislados colombianos, peruanos (MC3 como base ^[67]) y venezolanos	Evidencia reportada de presencia en la región ^[20] ^[53] ^[67]
Edición génica anti-TR4	Validar ADH1, MLO, CsLOB1, DMR6, ERF922 en Cavendish	Diana confirmada en otros patosistemas ^[37]
Optimización de RGA2	Edición de los 3 loci endógenos de Cavendish (sin transgenes)	Sortea parcialmente barreras regulatorias OGM ^[49] , ^[50]
Diversificación de material	Transición desde cormos a cultivo de tejidos certificado	Reduce velocidad de dispersión ^[14]
Consortios microbianos LAC	Aislar y validar nativos contra aislados regionales de TR4	Eficacias documentadas del 70–79 % con consorcios microbianos ^[4]
Edición multiplex	Coedición de TR4 + BSV + Xanthomonas	Validación metodológica reciente de edición de virus de la estría del banano (BSV) ^[18]
Vigilancia ambiental proactiva	RT-qPCR SIX13 ^[35] en cuencas hidrográficas binacionales	Detección pre-sintomática ^[35] , ^[100]
Validación cruzada anual de cebadores	Con aislados confirmados LAC	Asegurar especificidad ante microevolución ^[48]

13.3 Recomendaciones de política regional

1. **Bioseguridad territorial:** sistemas de detección temprana, trazabilidad de material y erradicación química con urea^[21].
2. **Inversión en investigación:** TIR ex ante 28-30 % justifica programas regionales sostenidos^[13].
3. **Cooperación regional:** armonización regulatoria, intercambio de genomas, estandarización de protocolos en fronteras comunes.
4. **Apoyo diferenciado a pequeños productores:** subsidios para material certificado (GCTCV-218/219 o biotecnológico futuro), extensión técnica y financiamiento de bioseguridad mínima.
5. **Coordinación ante ciclones tropicales:** protocolos específicos en RD, Cuba y zonas vulnerables (ver punto 12.4).

13.4 Conclusión general

Foc TR4 es la mayor amenaza fitosanitaria moderna para la producción mundial de musáceas^[61]. La pandemia iniciada en el Sudeste Asiático en 1967^[21], ^[81] alcanzó al continente latinoamericano en 2019 y se ha confirmado en cuatro países LAC^[16], ^[26], ^[61]. La evidencia científica consolida tres frentes prioritarios simultáneos:

- Caracterización genómica acelerada de aislados regionales;
- Validación de campo de biotecnología avanzada (RGA2 y edición génica CRISPR/Cas9 contra genes S promisorios);
- Control integrado operativo combinando bioseguridad, variedades tolerantes, control biológico regional y material certificado.

La colaboración regional, la inversión biotecnológica sostenida y la implementación rigurosa del ICDM son los pilares que determinarán la sostenibilidad futura del banano como un producto básico (commodity) global y alimento básico.

13.5 Alertas sobre debates abiertos

DEBATE	POSICIÓN A	POSICIÓN B	ESTADO A JUNIO 2026
Taxonomía TR4	<i>F. odoratissimum</i> como nueva especie ^[5] , ^[59]	“Especie nueva nominal pero debates metodológicos” ^[58] , ^[101]	Debate abierto; este documento usa nomenclatura histórica con notas aclaratorias
Regulación CRISPR/Cas9 en banano	“CRISPR editing does not require transgenes... more socially acceptable” ^[50]	Muchos países aplican regulación GMO también a CRISPR ^[50]	Variable por jurisdicción; puede no encajar en definiciones tradicionales de OGM ^[49]
Eficacia de GCTCV-218/219 a largo plazo	Resistencia estable tras 4 ciclos en Filipinas [32]	“Peer-reviewed publications on the status... are not available yet” ^[30]	Información comercial robusta pero literatura revisada por pares ausente
Reclasificación VCG 0121	VCG 0121 = linaje independiente ^[48]	VCG 0121 parte del complejo TR4 ^[48]	Metodológicamente distinguible; relevancia regulatoria variable
Capacidad de permanencia de aislados en malezas	Sí documentada como endófito asintomático ^[21] , ^[65]	Relevancia epidemiológica bajo análisis	Aceptado que ocurre; magnitud en LAC no cuantificada

Metodológicamente distinguible; relevancia regulatoria variable
 Aceptado que ocurre; magnitud en LAC no cuantificada

14. GLOSARIO DE SIGLAS Y TÉRMINOS

14.1 Siglas taxonómicas, genéticas y de plataformas moleculares

SIGLA / TÉRMINO	DEFINICIÓN
ADH1	Alcohol deshidrogenasa 1; gen de susceptibilidad promisorio para edición contra TR4 (en inglés, <i>Alcohol DeHydrogenase 1</i>)
ARNm	Ácido ribonucleico mensajero (en inglés, <i>messenger RNA</i> ; la sigla se mantiene como ARNm)
Cas9	Endonucleasa programable del sistema CRISPR; proteína 9 asociada a CRISPR (en inglés, <i>CRISPR-associated protein 9</i>)
Ced9	Gen antiapoptótico del nematodo <i>Caenorhabditis elegans</i> utilizado en transgénesis anti-TR4
CRISPR	Repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas; plataforma de edición génica (en inglés, <i>Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats</i>)
DMR6	Resistencia al mildiú vellosa 6; gen de susceptibilidad cuya edición eleva la respuesta inmune (en inglés, <i>Downy Mildew Resistance 6</i>)
eBSV	Virus del estriado del banano endógeno; virus integrado en el genoma B y eliminado mediante CRISPR (en inglés, <i>endogenous Banana Streak Virus</i>)
ENODL3	Tipo nodulina temprana 3; editado con CRISPR para conferir resistencia a la marchitez por Xantomonas (en inglés, <i>Early Nodulin-Like 3</i>)
ERF922	Factor de transcripción 922 de respuesta al etileno; editado en arroz contra <i>Magnaporthe oryzae</i> (en inglés, <i>Ethylene Response Factor 922</i>)
Foc	Sigla taxonómica de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> , agente causal del Mal de Panamá
FOSC	Complejo de especies de <i>Fusarium oxysporum</i> (en inglés, <i>Fusarium oxysporum Species Complex</i>)
FWB	Sigla en inglés de la marchitez por <i>Fusarium</i> del banano (en inglés, <i>Fusarium Wilt of Banana</i>); uso recomendado en español: MFB
IGS	Región espaciadora intergénica del operón ribosomal nuclear; diana de los cebadores Dita (en inglés, <i>Intergenic Spacer</i>)
ITS	Espaciador transcrito interno; código de barras universal fúngico (en inglés, <i>Internal Transcribed Spacer</i>)
LAMP	Amplificación isotérmica mediada por asas; técnica sin termociclador (en inglés, <i>Loop-mediated Isothermal Amplification</i>)
LCYÉ	Ciclasa épsilon de licopeno; editada con CRISPR para aumentar el contenido de β -caroteno
MaACO1	Gen <i>Musa acuminata</i> ACC oxidasa 1; editado para retrasar la maduración
MaGA20ox2	Gen <i>Musa acuminata</i> gibberelina 20-oxidasa 2; editado para reducir la altura
MaNPR1	Gen <i>Musa acuminata</i> regulador negativo tipo NPR1; editado mediante CRISPR para triplicar la resistencia a TR4 (en inglés, <i>Non-expressor of Pathogenesis-Related genes 1</i>)
MLO	Locus O del mildiú; gen clásico de susceptibilidad (en inglés, <i>Mildew Locus O</i>)

MusaDMR6	Ortólogo de DMR6 en <i>Musa</i> spp.; editado con CRISPR para conferir resistencia a <i>Xanthomonas</i>
NGS	Secuenciación de nueva generación; uso recomendado en español: SNG (en inglés, <i>Next-Generation Sequencing</i>)
PCR	Reacción en cadena de la polimerasa (en inglés, <i>Polymerase Chain Reaction</i>)
PDA	Agar de papa y dextrosa; medio estándar de cultivo fúngico (en inglés, <i>Potato Dextrose Agar</i>); uso recomendado en español: APD
qPCR	PCR cuantitativa en tiempo real (en inglés, <i>quantitative real-time PCR</i>)
RGA2	Análogo de gen de resistencia 2 de <i>Musa acuminata</i> ssp. <i>malaccensis</i> ; confiere resistencia a TR4 (en inglés, <i>Resistance Gene Analog 2</i>)
SCAR	Región amplificada de secuencia caracterizada (en inglés, <i>Sequence Characterized Amplified Region</i>); uso recomendado en español: RASC
SIX	Familia de genes efectores secretados al xilema (en inglés, <i>Secreted In Xylem</i>)
SNP	Polimorfismo de un solo nucleótido (en inglés, <i>Single Nucleotide Polymorphism</i>); uso recomendado en español: PSN
TR4	Sigla en inglés de la Raza Tropical 4 (en inglés, <i>Tropical Race 4</i>); uso recomendado en español: RT4
STR4	Sigla en inglés de la Raza Sub tropical 4 (en inglés, <i>Subtropical Race 4</i>); uso recomendado en español: RST4

14.2 Siglas fitosanitarias, regulatorias y operativas

SIGLA / TÉRMINO	DEFINICIÓN
BCR	Relación beneficio-costos (en inglés, <i>Benefit-Cost Ratio</i>)
BXW	Marchitez bacteriana del banano por <i>Xanthomonas</i> ; uso recomendado en español: MXB (en inglés, <i>Banana Xanthomonas Wilt</i>)
CIPF	Convención Internacional de Protección Fitosanitaria; tratado multilateral administrado por la FAO (en inglés, <i>International Plant Protection Convention</i> , IPPC)
ESEC	Exclusión, vigilancia, erradicación y contención (en inglés, <i>Exclusion, Surveillance, Eradication, Containment</i>)
GMRC	Cultivo resistente genéticamente modificado; uso recomendado en español: CRGM (en inglés, <i>Genetically Modified Resistant Cultivar</i>)
ICDM	Manejo integrado de cultivo y enfermedad; uso recomendado en español: MICE (en inglés, <i>Integrated Crop and Disease Management</i>)
LAC	América Latina y el Caribe
NPPO	Sigla en inglés de la Organización Nacional de Protección Fitosanitaria (en inglés, <i>National Plant Protection Organization</i>); uso recomendado en español: ONPF
OGM	Organismo genéticamente modificado (en inglés, <i>Genetically Modified Organism</i> , GMO)
ONPF	Organización Nacional de Protección Fitosanitaria

TIR	Tasa interna de retorno
VCG	Grupo de compatibilidad vegetativa; uso recomendado en español: GCV (en inglés, <i>Vegetative Compatibility Group</i>)
VPN / NPV	Valor presente neto (en inglés, <i>Net Present Value, NPV</i>)

14.3 Términos biológicos, agronómicos y de control

SIGLA / TÉRMINO	DEFINICIÓN
Agente de Control Biológico	Organismo vivo usado para suprimir poblaciones de patógenos; uso recomendado como sigla: ACB (en inglés, <i>Biocontrol Agent, BCA</i>)
Banana Streak Virus	Virus del estriado del banano (en inglés, <i>Banana Streak Virus</i>); agente causal de la enfermedad del estrío
Banana Bunchy Top Virus	Virus del racimo compacto del banano; transmite por áfidos; uso recomendado en español: BBTV se mantiene (en inglés, <i>Banana Bunchy Top Virus</i>)
BBTV	Virus del racimo compacto del banano (en inglés, <i>Banana Bunchy Top Virus</i>)
Cavendish	Subgrupo AAA de banano; ≈40–50 % de la producción mundial; principal cultivar comercializado en exportaciones internacionales (en inglés, <i>Cavendish</i>)
Clamidospora	Estructura de resistencia asexual de paredes gruesas melanizadas; principal estructura de supervivencia del inóculo Foc TR4 en suelo
Cultivo de tejidos certificados	Propagación vegetal en laboratorio a partir de meristemas bajo condiciones asépticas controladas; estándar de oro para siembra nueva
Cormo	Tallo subterráneo engrosado de la planta de banano; vehículo crítico de dispersión histórica de TR4 cuando se obtiene de plantas infestadas
Endófito asintomático	Organismo que habita tejidos vegetales internos sin causar síntomas visibles; Foc TR4 puede persistir así en raíces sanas y malezas
Fenotipia / Fenotipo	Conjunto de caracteres observables de un organismo; en este documento, especialmente relevante para la evaluación de líneas editadas con CRISPR
Fumar	Acción de aplicar humo o vapor con efecto fumigante contra plagas; en este documento, método de exposición de insectos a compuestos volátiles
Gangrena	Necrosis tisular; en contexto de banano, puede observarse en cormos y raíces por Foc TR4 avanzado
Gen de susceptibilidad (gen S)	Gen vegetal cuya función normal facilita la infección por el patógeno; su pérdida de función confiere resistencia durable
Genómica	Estudio del genoma completo de un organismo; en Foc TR4, permitió identificar ≈0,01 % de variación SNP entre aislados globales
Hijuelo	Renuevo vegetativo que emerge del cormo; vehículo crítico de dispersión de TR4 cuando está asintóticamente infectado
Línea transgénica	Línea vegetal que porta un gen foráneo insertado en su genoma; ejemplo: líneas QCAV-4 con RGA2 sobreexpresado
Moko bacteriano	Marchitez bacteriana del banano causada por <i>Ralstonia solanacearum</i> ; avance rápido (días)
Pediluvio	Baño de pies obligatorio con solución biocida al ingreso y salida de fincas

Peróxido de hidrógeno	Agente oxidante biocida; uso complementario a QAC en protocolos de desinfección
Plaga cuarentenaria	Plaga de potencial importancia económica para un área donde aún no está presente, o donde está presente pero no ampliamente distribuida y es objeto de control oficial; Foc TR4 tiene estatus cuarentenario en LAC
Porta-injerto	Parte inferior de una planta injertada que aporta el sistema radical; en banano, práctica aún experimental frente a TR4
Pseudocercospora fijiensis	Hongo causal de la Sigatoka Negra del banano; afecta hojas, no sistema vascular
Pudrición del cormo	Enfermedad caracterizada por necrosis del cormo; puede ser síntoma secundario de Foc TR4 avanzado
Rizobacterias	Bacterias asociadas a la rizosfera con potencial biocida; uso recomendado como sigla: RB (en inglés, <i>Rhizobacteria</i>)
Sigatoka Negra	Enfermedad foliar del banano causada por <i>Pseudocercospora fijiensis</i> ; afecta hojas, no sistema vascular (en inglés, <i>Black Sigatoka</i>)
Variante somaclonal	Organismo genéticamente diferenciado derivado de propagación asexual en cultivo de tejidos; las GCTCV son la principal fuente comercial de resistencia parcial a TR4
Vigilancia ambiental	Vigilancia proactiva mediante muestreo de suelo y agua sin requerir síntomas visibles; permite detección pre-sintomática
Zona limpia / sucia / de aislamiento	Separación zonal de fincas según estado fitosanitario respecto a TR4; componente del protocolo Queensland

14.4 Términos económicos y de manejo integrado

SIGLA / TÉRMINO	DEFINICIÓN
Análisis costo-beneficio	Evaluación económica que compara costos y beneficios expresados en valor presente; en este documento, evidencia VPN positivo de bioseguridad en Colombia (95 389–112 527 USD/ha)
Bioseguridad estricta	Sistema integrado de prácticas preventivas (exclusión, contención, erradicación rápida) que reduce probabilidad de introducción y establecimiento de TR4 en áreas libres o infestadas (en inglés, <i>strict biosecurity</i>)
Control Integrado de la Enfermedad	Estrategia que combina bioseguridad, variedades tolerantes, biocontrol y manejo de suelo; TIR ex ante del 30 % (en inglés, <i>Integrated Crop and Disease Management, ICDM</i>)
Curativo vs Preventivo	Distinción operacional: en Foc TR4 no existe tratamiento curativo; todas las opciones son preventivas, de contención o manejo post-infección
Cultivo orgánico	Sistema de producción que excluye insumos sintéticos; ≈25 % del banano orgánico mundial proviene del Valle del Chirra
Exclusión	Componente de la bioseguridad dirigido a evitar la introducción del patógeno en nuevas áreas (inspección de fronteras, cuarentena internacional)
Manejo post-infección	Protocolo aplicado tras la detección confirmada de TR4 (erradicación + urea + cobertura plástica + desinfección + restricción de movimiento)
Materia orgánica	Material carbonado biodegradable presente en el suelo; su manejo equilibrado puede favorecer microbiomas supresivos contra Foc TR4

Pequeño productor familiar	Unidad productiva con capacidad limitada de inversión, dependiente de cormos compartidos y con infraestructura mínima de bioseguridad; vulnerabilidad desproporcionada frente a TR4
Plántula in vitro	Plántula producida mediante cultivo de tejidos en laboratorio; equivalente al material de siembra certificado
Relación beneficio-costos	Razón entre beneficios y costos de una intervención expresados en valor presente
Valor Presente Neto	Diferencia entre beneficios y costos descontados a valor presente; en Colombia, 95 389 USD/ha en Magdalena y 112 527 USD/ha en Antioquia

15. NOTAS METODOLÓGICAS Y DE CIERRE

15.1 Fecha de cierre y próxima actualización

- **Cierre de la versión actual:** junio 2026.
- **Datos verificados hasta:** diciembre 2025 (incursión de Ecuador).
- **Próxima revisión prevista:** diciembre 2026 (sujeto a evolución de incursión en Ecuador, resultados de campo de biotecnología CRISPR anti-TR4, y nuevos focos confirmados en LAC).

15.2 Fuentes primarias utilizadas

Las afirmaciones del documento se respaldan en literatura científica revisada por pares y reportes fitosanitarios oficiales. Más de 80 fuentes primarias específicas sustentan las afirmaciones del documento, disponibles en las bases de datos PubMed, Scopus, Web of Science y reportes de ICA, Agrocalidad, SENASA/INIA e INSAI.

15.3 Limitaciones reconocidas

- Datos cuantitativos de eficacia en campo de GCTCV-218/219 a >4 ciclos provienen de literatura comercial no revisada por pares.
- Validación de cebadores moleculares con aislados LAC actualizados es limitada.
- Estimaciones del impacto económico futuro bajo escenarios de dispersión sin contención son modeladas ex-ante, no prospectivas.
- La situación regulatoria CRISPR/Cas9 en LAC es heterogénea y cambiante.

15.4 Cómo citar este documento

Cuando se cite como referencia en publicaciones posteriores o en consultas a LLMs:

Sandoval J. & Hernández-Soto A. Versión junio 2026. Revisión comprehensiva sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Raza Tropical 4 en América Latina y el Caribe. CropLifeLA. Datos verificados hasta diciembre 2025.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. B. V. Netherlands The, F. A. García-Bastidas, A. Drenth, and G. H. J. Kema, "The past, present and future of Fusarium wilt of banana caused by Tropical Race 4," in *Burleigh Dodds series in agricultural science*, Burleigh Dodds Science Publishing Limited, 2024, pp. 113–144. doi: 10.19103/as.2022.0108.05.
- [2] S. Rizal, P. Saha, S. Das, S. Bera, and J. Datta, "Comprehensive review on pathogenesis, pathogenicity, detection, molecular profiling, epidemiology and management of Fusarium wilt of banana," *Discover Plants.*, vol. 2, no. 1, Sep. 2025, doi: 10.1007/s44372-025-00341-x.
- [3] T. Munhoz, J. V. Florez, L. A. J. Teixeira, C. Staver, and M. Dita, "Fusarium Tropical Race 4 in Latin America and the Caribbean: status and global research advances towards disease management," Jul. 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1397617.
- [4] G. Bubici, M. Kaushal, M. I. Prigigallo, C. G. Cabanás, and J. Mercado-Blanco, "Biological Control Agents Against Fusarium Wilt of Banana," Apr. 2019, doi: 10.3389/fmicb.2019.00616.
- [5] G. H. J. Kema, A. Drenth, M. Dita, K. Jansen, S. Vellema, and J. J. Stoorvogel, "Editorial: Fusarium Wilt of Banana, a Recurring Threat to Global Banana Production," *Frontiers in Plant Science*, vol. 11, pp. 628888–628888, Jan. 2021, doi: 10.3389/fpls.2020.628888.
- [6] A. Drenth and G. H. J. Kema, "The Vulnerability of Bananas to Globally Emerging Disease Threats," Jul. 2021, doi: 10.1094/phyto-07-20-0311-rvw.
- [7] G. Manzo-Sánchez, M. T. Buenrostro-Nava, C. L. Leoparpedi-Verde, and M. Orozco-Santos, "Fusarium raza 4 tropical, el principal enemigo de las musáceas," *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 26, pp. 21–22, Sep. 2022, doi: 10.53897/revaia.22.26.20.
- [8] N. Ordóñez et al., "Worse Comes to Worst: Bananas and Panama Disease—When Plant and Pathogen Clones Meet," Nov. 2015, doi: 10.1371/journal.ppat.1005197.
- [9] K. H. Maseko, T. Régnier, B. Meiring, O. C. Wokadala, and T. A. Anyasi, "Musa species variation, production, and the application of its processed flour: A review," Nov. 2023, doi: 10.1016/j.scienta.2023.112688.
- [10] N. M. Warman and E. A. B. Aitken, "The Movement of Fusarium oxysporum f.sp. cubense (Sub-Tropical Race 4) in Susceptible Cultivars of Banana," Nov. 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.01748.
- [11] M. Dita, C. Waalwijk, I. W. Buddenhagen, M. T. Souza, and G. H. J. Kema, "A molecular diagnostic for tropical race 4 of the banana fusarium wilt pathogen," Jan. 2010, doi: 10.1111/j.1365-3059.2009.02221.x.
- [12] J. Aguayo et al., "Development of a hydrolysis probe-based real-time assay for the detection of tropical strains of Fusarium oxysporum f. sp. cubense race 4," Feb. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0171767.
- [13] C. Staver, D. E. Pems, L. Scheerer, L. P. Vicente, and M. Dita, "Ex Ante Assessment of Returns on Research Investments to Address the Impact of Fusarium Wilt Tropical Race 4 on Global Banana

Production," Jul. 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.00844.

[14] T. Ritter, D. Álvarez, L. E. Mosquera, E. Martey, and J. Mockshell, "A socioeconomic and cost benefit analysis of Tropical Race 4 (TR4) prevention methods among banana producers in Colombia," Oct. 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0311243.

[15] R. Thangavelu and M. Mustaffa, "A Potential Isolate of *Trichoderma viride* NRCB1 and its Mass Production for the Effective Management of Fusarium Wilt Disease in Banana," Jan. 2010, Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: [http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/2010/TFSB_4\(SI2\)/TFSB_4\(SI2\)76-84o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/2010/TFSB_4(SI2)/TFSB_4(SI2)76-84o.pdf)

[16] O. DEMİREL and S. A. Hatırlı, "STRUCTURE OF GLOBAL BANANA MARKET," Jun. 2022, Accessed: Jun. 2026. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sosguz/issue/72443/1128445>

[17] G. N. Tagami *et al.*, "Aerial Mapping of the Peruvian Chira Valley Banana Production System to Monitor the Expansion of Fusarium Wilt Caused by Tropical Race 4," Sep. 2023, doi: 10.1094/phytofr-07-23-0097-r.

[18] J. N. Tripathi, V. O. Ntui, M. Ron, S. K. Muiruri, A. Britt, and L. Tripathi, "CRISPR/Cas9 editing of endogenous banana streak virus in the B genome of *Musa* spp. overcomes a major challenge in banana breeding," Jan. 2019, doi: 10.1038/s42003-019-0288-7.

[19] T. V. Nguyen, L. T. T. Tran-Nguyen, C. L. Wright, P. Trevorrow, and K. R. E. Grice, "Evaluation of the Efficacy of Commercial Disinfectants Against *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Race 1 and Tropical Race 4 Propagules," Sep. 2018, doi: 10.1094/pdis-03-18-0453-re.

[20] L. F. Izquierdo-García *et al.*, "Efficacy of Disinfectants against *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Tropical Race 4 Isolated from La Guajira, Colombia," Apr. 2021, doi: 10.3390/jof7040297.

[21] K. G. Pegg, L. M. Coates, W. O'Neill, and D. W. Turner, "The Epidemiology of Fusarium Wilt of Banana," Dec. 2019, doi: 10.3389/fpls.2019.01395.

[22] J. L. Dale *et al.*, "Transgenic Cavendish bananas with resistance to Fusarium wilt tropical race 4," Nov. 2017, doi: 10.1038/s41467-017-01670-6.

[23] F. Liu, "Research Progress on Disease Resistance Genes and Breeding in Banana (*Musa* spp.)," Jul. 2025, doi: 10.56028/aetr.14.1.1366.2025.

[24] V. O. Ntui, J. N. Tripathi, T. Shah, and L. Tripathi, "Targeted knockout of early nodulin-like 3 (*Musa*ENODL3) gene in banana reveals its function in resistance to *Xanthomonas* wilt disease," Nov. 2023, doi: 10.1111/pbi.14248.

[25] E. M. de la Parte *et al.*, "The Vulnerability of Cuban Banana Production to Fusarium Wilt Caused by Tropical Race 4," Jun. 2023, doi: 10.1094/phyto-04-23-0127-r.

[26] D. I. V. Inca and F. G. H. F. Cordero, "Fusarium R4T en musáceas: Avances y desafíos para un manejo sostenible," Aug. 2025, doi: 10.56712/latam.v6i4.4319.

[27] P. H. Centanaro and J. C. Nava, "Nudos críticos de procesos gerenciales en unidades productivas de banano, Milagro, Ecuador," Jan. 2021, doi: 10.22430/24223182.1554.

- [28] L. D. Maldonado-Bonilla, "Secreted in Xylem (Six) Genes in *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense and Their Potential Acquisition by Horizontal Transfer," Aug. 2018, doi: 10.19080/aibm.2018.10.555779.
- [29] L. Guo et al., "Genome and Transcriptome Analysis of the Fungal Pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Causing Banana Vascular Wilt Disease," Apr. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0095543.
- [30] M. Dita, M. Barquero, D. W. Heck, E. S. G. Mizubuti, and C. P. Staver, "Fusarium Wilt of Banana: Current Knowledge on Epidemiology and Research Needs Toward Sustainable Disease Management," Oct. 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.01468.
- [31] N. Haridasan and A. Sajeena, "Unravelling the intricacies in the management of *Fusarium* wilts of vegetable crops," Jan. 2025, doi: 10.15740/has/ijas/21.1/194-211.
- [32] A. B. Molina, "Status of epidemics and management of *Fusarium* Wilt Tropical Race 4 in the Philippines," Jan. 2016, Accessed: Oct. 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10568/77806>
- [33] B. Hou et al., "Cultivar-specific markers, mutations, and chimerism of Cavendish banana somaclonal variants resistant to *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4," Jun. 2022, doi: 10.1186/s12864-022-08692-5.
- [34] L. C. Carvalhais et al., "Molecular Diagnostics of Banana *Fusarium* Wilt Targeting Secreted-in-Xylem Genes," May 2019, doi: 10.3389/fpls.2019.00547.
- [35] M. C. Matthews, D. Mostert, P. Ndayihanzamaso, L. J. Rose, and A. Viljoen, "Quantitative detection of economically important *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense strains in Africa in plants, soil and water," Jul. 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0236110.
- [36] R. M. Harding et al., "QCAV-4, the first genetically modified Cavendish (cv. Grand Nain) banana resistant to *Fusarium* wilt tropical race 4 approved for commercial production and consumption," *Plant Biotechnology Journal*, vol. 23, no. 9, pp. 3628–3637, Jun. 2025, doi: 10.1111/pbi.70178.
- [37] L. Tripathi, V. O. Ntui, and J. N. Tripathi, "Application of CRISPR/Cas-based gene-editing for developing better banana," Aug. 2024, doi: 10.3389/fbioe.2024.1395772.
- [38] G. Z. de Lara and M. Andrea, "Análisis del riesgo de introducción de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Raza 4 Tropical (Foc R4T) plaga cuarentenaria para el Ecuador," 2021. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/7695/1/MUTC-000923.pdf>
- [39] W. J. Thompson et al., "Smallholder farmer resilience to extreme weather events in a global food value chain," Oct. 2023, doi: 10.1007/s10584-023-03586-1.
- [40] S.-J. Zheng et al., "New Geographical Insights of the Latest Expansion of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Tropical Race 4 Into the Greater Mekong Subregion," Apr. 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.00457.
- [41] P. Baldi and N. L. Porta, "Molecular Approaches for Low-Cost Point-of-Care Pathogen Detection in Agriculture and Forestry," Oct. 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.570862.
- [42] P. Astha, O. Bidya, and N. Adarsha, "EXPLORING CUTTING-EDGE TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS IN PLANT DISEASE DIAGNOSIS AND MANAGEMENT," Jan. 2024, doi: 10.18551/rjoas.2024-01.21.

- [43] F. A. García-Bastidas *et al.* , "Induced resistance to Fusarium wilt of banana caused by Tropical Race 4 in Cavendish cv Grand Naine bananas after challenging with avirulent Fusarium spp.," Sep. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0273335.
- [44] A. Chen *et al.* , "Assessing Variations in Host Resistance to Fusarium oxysporum f. sp. cubense Race 4 in Musa Species, With a Focus on the Subtropical Race 4," May 2019, doi: 10.3389/fmicb.2019.01062.
- [45] P. E. Nelson, M. C. Dignani, and E. Anaissie, "Taxonomy, biology, and clinical aspects of Fusarium species," Oct. 1994, doi: 10.1128/cmr.7.4.479.
- [46] C. H. Bock, S. J. Pethybridge, J. G. A. Barbedo, P. D. Esker, A. Mahlein, and E. M. D. Ponte, "A phytopathometry glossary for the twenty-first century: towards consistency and precision in intra- and inter-disciplinary dialogues," *Tropical Plant Pathology* , vol. 47, no. 1, pp. 14-24, Aug. 2021, doi: 10.1007/s40858-021-00454-0.
- [47] F. A. García-Bastidas *et al.* , "First Report of Fusarium oxysporum f. sp. cubense Tropical Race 4 Associated with Panama Disease of Banana outside Southeast Asia," Oct. 2013, doi: 10.1094/pdis-09-13-0954-pdn.
- [48] F. Magdama, L. Monserrate-Maggi, L. Serrano, D. Sosa, D. M. Geiser, and M. del M. Jiménez-Gasco, "Comparative analysis uncovers the limitations of current molecular detection methods for Fusarium oxysporum f. sp. cubense race 4 strains," Sep. 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0222727.
- [49] J. D. Wolt, K. Wang, and B. Yang, "The Regulatory Status of Genome-edited Crops," Aug. 2015, doi: 10.1111/pbi.12444.
- [50] A. Ahmad *et al.* , "An Outlook on Global Regulatory Landscape for Genome-Edited Crops," Oct. 2021, doi: 10.3390/ijms222111753.
- [51] V. O. Ntui, J. N. Tripathi, and L. Tripathi, "Robust CRISPR/Cas9 mediated genome editing tool for banana and plantain (Musa spp.)," Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cpb.2019.100128.
- [52] É. de C. Costa *et al.* , "Histological and transcriptome analysis uncover a robust early PTI and ETI-associated immune response in Musa acuminata subsp. burmannica accession 'Calcutta 4' to Fusarium oxysporum f. sp. cubense Subtropical Race 4," *Frontiers in Plant Science* , vol. 16, pp. 1621600-1621600, Sep. 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1621600.
- [53] R. M. Herrera *et al.* , "First Report of Fusarium Wilt of Cavendish Bananas Caused by Fusarium oxysporum f. sp. cubense Tropical Race 4 in Venezuela," Jun. 2023, doi: 10.1094/pdis-04-23-0781-pdn.
- [54] R. Acuña *et al.* , "First Report of Fusarium oxysporum f. sp. cubense Tropical Race 4 Causing Fusarium Wilt in Cavendish Bananas in Peru," Dec. 2021, doi: 10.1094/pdis-09-21-1951-pdn.
- [55] S. A. Miller, F. D. Beed, and C. L. Harmon, "Plant Disease Diagnostic Capabilities and Networks," Apr. 2009, doi: 10.1146/annurev-phyto-080508-081743.
- [56] C. E. B. Bustamante, F. F. C. Perez, Y. M. Cantillo, and I. Arenas-Rubio, "Inventario de insectos plaga

y patógenos presentes en un cultivo de marañón *Anacardium occidentale* L. en el centro de investigación Caribia, zona bananera, Magdalena," *Temas Agrarios*, vol. 28, no. 2, pp. 208-219, Dec. 2023, doi: 10.21897/8mnqgh69.

[57] G. L. M. *et al.*, *Scientific review of the impact of climate change on plant pests*. 2021. doi: 10.4060/cb4769en.

[58] E. T. Bedoya, D. P. Bebbler, and D. J. Studholme, "Taxonomic Revision of the Banana Fusarium Wilt TR4 Pathogen Is Premature," Jun. 2021, doi: 10.1094/phyto-03-21-0089-le.

[59] N. Maryani, L. Lombard, Y. S. Poerba, S. Subandiyah, P. W. Crous, and G. H. J. Kema, "Phylogeny and genetic diversity of the banana Fusarium wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense in the Indonesian centre of origin," Jul. 2018, doi: 10.1016/j.simyco.2018.06.003.

[60] F. Magdama, L. Monserrate-Maggi, L. Serrano, J. G. Onofre, and M. del M. Jiménez-Gasco, "Genetic Diversity of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense, the Fusarium Wilt Pathogen of Banana, in Ecuador," Sep. 2020, doi: 10.3390/plants9091133.

[61] G. Martínez *et al.*, "The Advance of Fusarium Wilt Tropical Race 4 in Musaceae of Latin America and the Caribbean: Current Situation," Feb. 2023, doi: 10.3390/pathogens12020277.

[62] Y. P. Anama, R. Díaz, D. E. Duarte-Alvarado, and T. C. L. Burbano, "Morphological and pathogenic characterization of *Fusarium oxysporum* in lulo (*Solanum* spp.)," *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 38, no. 1, pp. 20-37, May 2021, doi: 10.22267/rcia.213801.142.

[63] J. Yang *et al.*, "Virulent *Fusarium* isolates with diverse morphologies show similar invasion and colonization strategies in alfalfa," *Frontiers in Plant Science*, vol. 15, pp. 1390069-1390069, May 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1390069.

[64] A. Akhter, K. Hage-Ahmed, G. Soja, and S. Steinkellner, "Potential of *Fusarium* wilt-inducing chlamydospores, in vitro behaviour in root exudates and physiology of tomato in biochar and compost amended soil," Jun. 2016, doi: 10.1007/s11104-016-2948-4.

[65] F. Ahmad, N. M. Martawi, Y. S. Poerba, H. de Jong, H. J. Schouten, and G. H. J. Kema, "Genetic mapping of *Fusarium* wilt resistance in a wild banana *Musa acuminata* ssp. *malaccensis* accession," Sep. 2020, doi: 10.1007/s00122-020-03677-y.

[66] L. Ma *et al.*, "Accessory genes in tropical race 4 contributed to the recent resurgence of the devastating disease of *Fusarium* wilt of banana," Aug. 08, 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-3197485/v1.

[67] P. Rodríguez-Grados *et al.*, "Draft genome sequence of the fungal pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 (MC3) isolated in Amazonas, Peru," Sep. 03, 2025. doi: 10.21203/rs.3.rs-7456557/v1.

[68] L. Ma *et al.*, "Comparative genomics reveals mobile pathogenicity chromosomes in *Fusarium*," Mar. 2010, doi: 10.1038/nature08850.

[69] P. van Dam *et al.*, "A mobile pathogenicity chromosome in *Fusarium oxysporum* for infection of multiple cucurbit species," Aug. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-07995-y.

- [70] S. Bache, "Analysis of the genomic structures of several strains of the fungal plant pathogen *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense*," 2022. Accessed: Feb. 2026. [Online]. Available: <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-05466524>
- [71] X. Wang, R. Yu, and J. Li, "Using Genetic Engineering Techniques to Develop Banana Cultivars With *Fusarium* Wilt Resistance and Ideal Plant Architecture," Jan. 2021, doi: 10.3389/fpls.2020.617528.
- [72] S. Widinugraheni *et al.*, "A SIX1 homolog in *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* tropical race 4 contributes to virulence towards Cavendish banana," Oct. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0205896.
- [73] C. Li, J. Yang, W. Li, J. Sun, and M. Peng, "Direct Root Penetration and Rhizome Vascular Colonization by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* are the Key Steps in the Successful Infection of Brazil Cavendish," Jul. 2017, doi: 10.1094/pdis-04-17-0467-re.
- [74] Y. Yang, Y. Dou, Y. Huang, and S. An, "Links between Soil Fungal Diversity and Plant and Soil Properties on the Loess Plateau," Nov. 2017, doi: 10.3389/fmicb.2017.02198.
- [75] D. Mostert *et al.*, "The distribution and host range of the banana *Fusarium* wilt fungus, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, in Asia," Jul. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0181630.
- [76] T. J. White, T. D. Bruns, S. Lee, and J. W. Taylor, "AMPLIFICATION AND DIRECT SEQUENCING OF FUNGAL RIBOSOMAL RNA GENES FOR PHYLOGENETICS," in *Elsevier eBooks*, Elsevier BV, 1990, pp. 315-322. doi: 10.1016/b978-0-12-372180-8.50042-1.
- [77] C. E. Morris *et al.*, "Comparative abundance and diversity of populations of the *Pseudomonas syringae* and Soft Rot *Pectobacteriaceae* species complexes throughout the Durance River catchment from its French Alps sources to its delta," Sep. 2023, doi: 10.24072/pcjournal.317.
- [78] K. Pegg, N. Y. Moore, and S. A. Bentley, "Fusarium wilt of banana in Australia: a review," Aug. 1996, doi: 10.1071/ar9960637.
- [79] D. Tan, L. Fu, B. Han, X. Sun, P. Zheng, and J. Zhang, "Identification of an Endophytic Antifungal Bacterial Strain Isolated from the Rubber Tree and Its Application in the Biological Control of Banana *Fusarium* Wilt," Jul. 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0131974.
- [80] M. Köberl, M. Dita, A. Martinuz, C. Staver, and G. Berg, "Members of Gammaproteobacteria as indicator species of healthy banana plants on *Fusarium* wilt-infested fields in Central America," Mar. 2017, doi: 10.1038/srep45318.
- [81] M. Maymon, N. Sela, U. Shpatz, N. Galpaz, and S. Freeman, "The origin and current situation of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in Israel and the Middle East," Jan. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-58378-9.
- [82] A. Viljoen *et al.*, "Occurrence and spread of the banana fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* TR4 in Mozambique," Nov. 2020, doi: 10.17159/sajs.2020/8608.
- [83] R. L. Ferrucho, "Estado actual, biología, epidemiología y manejo de *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* Raza 4 Tropical," Jan. 2022, doi: 10.38141/10795/71118.
- [84] C. M. C. Michelle *et al.*, "Assessing the risk of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race

4 outbreaks in Ecuadorian banana crops using spatial climatic data," Aug. 2023, doi: 10.17268/sci.agropecu.2023.026.

[85] R. Aguilar-Ancota, C. G. Arévalo-Quinde, A. Morales-Pizarro, and M. Galecio-Julca, "Fungi associated with necrosis of vascular bundles in organic banana crop: symptoms, isolation and identification, and integrated management alternatives," Jun. 2021, doi: 10.17268/sci.agropecu.2021.028.

[86] J. Adriko, V. Aritua, C. N. Mortensen, W. Tushemereirwe, J. Kubiriba, and O. Lund, "Multiplex PCR for specific and robust detection of *Xanthomonas campestris* pv. *musacearum* in pure culture and infected plant material," *Plant Pathology*, vol. 61, no. 3, pp. 489–497, Sep. 2011, doi: 10.1111/j.1365-3059.2011.02534.x.

[87] N. O. R., "A global genetic diversity analysis of *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* : the Panama disease pathogen of banana," 2018. doi: 10.18174/453455.

[88] S. V. Perla, M. V. K. Choda, Y. T. A. Yelchuru, B. Shaik, and P. Yalla, "A Critical Implementation Strategy Proposed for Continuous Monitoring of Minerals in the Soil and to Identify the Diseases of Banana Plant Using Support Vector Machine," *Revue d intelligence artificielle*, vol. 38, no. 1, pp. 331–340, Feb. 2024, doi: 10.18280/ria.380135.

[89] C. Sugianti, T. Imaizumi, M. Thammawong, and K. Nakano, "Recent Postharvest Technologies in the Banana Supply Chain," Jan. 2022, doi: 10.7831/ras.10.0_123.

[90] L. Q. Mamani, "Análisis técnico y económico de los sistemas agroforestales (SAF's) que emplean los productores de banano en el municipio de Alto Beni (Análisis de la producción y problemáticas del banano)," Dec. 2024, doi: 10.53287/nvpx9453ja94j.

[91] B. M. Prasanna *et al.*, "Sustainable management of transboundary pests requires holistic and inclusive solutions," *Food Security*, vol. 14, no. 6, pp. 1449–1457, Jun. 2022, doi: 10.1007/s12571-022-01301-z.

[92] M. Garcia, J. Römbke, M. T. de Brito, and A. Scheffczyk, "Effects of three pesticides on the avoidance behavior of earthworms in laboratory tests performed under temperate and tropical conditions," Sep. 2007, doi: 10.1016/j.envpol.2007.08.007.

[93] J. L. Dale, J. Paul, B. Dugdale, and R. M. Harding, "Modifying Bananas: From Transgenics to Organics?," Feb. 2017, doi: 10.3390/su9030333.

[94] F. Naim *et al.*, "Gene editing the phytoene desaturase alleles of Cavendish banana using CRISPR/Cas9," Jul. 2018, doi: 10.1007/s11248-018-0083-0.

[95] J. N. Tripathi, V. O. Ntui, T. Shah, and L. Tripathi, "CRISPR/Cas9-mediated editing of DMR6 orthologue in banana (*Musa* spp.) confers enhanced resistance to bacterial disease," May 2021, doi: 10.1111/pbi.13614.

[96] X. Shao *et al.*, "Using CRISPR/Cas9 genome editing system to create MaGA20ox2 gene-modified semi-dwarf banana," Jul. 2019, doi: 10.1111/pbi.13216.

[97] Z. Ma, L. Ma, and J. Zhou, "Applications of CRISPR/Cas genome editing in economically important fruit crops: recent advances and future directions," Jan. 2023, doi: 10.1186/s43897-023-00049-0.

[98] C. Hu *et al.*, "CRISPR/Cas9-mediated genome editing of MaACO1 (aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase 1) promotes the shelf life of banana fruit," Dec. 2020, doi: 10.1111/pbi.13534.

[99] C. Lu, "Biocontrol Effect Against Tomato Fusarium Wilt of *Pseudomonas aeruginosa* Strain FJAT-346," Jan. 2011, Accessed: Oct. 2025. [Online]. Available: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-SXNY201101013.htm

[100] P. C. Alves *et al.*, "Literature review on the main existing structures and systematic/academic initiatives for surveillance in the EU for zoonoses in the environment and the methods for surveillance of pathogens in the environment," Dec. 2022, doi: 10.2903/sp.efsa.2022.en-7792.

[101] E. T. B. (21931712), "Preparing for Fusarium Wilt of Banana in Colombia," 2025.



CropLife
LATIN AMERICA

*Promovemos el derecho
a operar de la Industria de la
Ciencia de los Cultivos*