

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN FITOPATOLOGÍA**



**“INTENSIDAD Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA
MARCHITEZ POR FUSARIUM DE LAS MUSÁCEAS
(*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) EN EL PERÚ”**

Presentada por:

DUSTIN STEWART MARÍN GIL

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN FITOPATOLOGÍA**

Lima – Perú

2024

INTENSIDAD Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA MARCHITEZ POR FUSARIUM DE LAS MUSÁCEAS (*Fusarium oxysporum* f. sp. cubense) EN EL PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

3%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	agritrop.cirad.fr Fuente de Internet	1%
2	docplayer.es Fuente de Internet	<1%
3	visar.maga.gob.gt Fuente de Internet	<1%
4	www.fontagro.org Fuente de Internet	<1%
5	colposdigital.colpos.mx:8080 Fuente de Internet	<1%
6	qdoc.tips Fuente de Internet	<1%
7	dspace.uclv.edu.cu Fuente de Internet	<1%
8	www.gob.mx Fuente de Internet	<1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN FITOPATOLOGÍA**

**“INTENSIDAD Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA
MARCHITEZ POR FUSARIUM DE LAS MUSÁCEAS
(*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) EN EL PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN FITOPATOLOGÍA**

Presentada por:

DUSTIN STEWART MARÍN GIL

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

.....
Dr. Erick Espinoza Núñez
PRESIDENTE

.....
Ph.D. Liliana Aragón Caballero
ASESORA

.....
Ph.D. Miguel Ángel Dita Rodríguez
CO-ASESOR

.....
Mg. Sc. Medali Huarhua Zaquinaula
MIEMBRO

.....
Ph.D. Walter Apaza Tapia
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mi madre, Marisa, y a mi padre, Julio. Por su amor y ejemplo. Por enseñarme que únicamente lo obtenido de forma transparente, honesta y justa, con esfuerzo y dedicación propios, vale la pena para lograr paz y tranquilidad.

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A Jehová, Dios, por todo.

A la Ph.D. Liliana María Aragón Caballero por la confianza y oportunidad brindadas. Por aceptar ser asesora de esta tesis, por sus enseñanzas, consejos y liderazgo a lo largo de todo este proceso académico.

Al Ph.D. Miguel Ángel Dita Rodríguez por la oportunidad y aceptar ser co-asesor de este trabajo, por el apoyo y consejos brindados y por la dirección del proyecto en el que estuvo insertada esta investigación.

Al Ing. Mg. Sc. Julio Ernesto Marín Horna del SENASA, por su ejemplo y el apoyo en la logística, organización de los viajes y nexos con las Direcciones Ejecutivas del SENASA.

Al D.Sc. Daniel Winter Heck de Cornell College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, por brindarme sus valiosos consejos y observaciones para el análisis epidemiológico y mejorar este trabajo.

A los profesores del Departamento de Fitopatología. En especial al profesor Ph.D. Tomas Adán Melgarejo Gutiérrez, por su amistad, enseñanzas, sus consejos y recomendaciones desde pregrado hasta la actualidad, por sus referencias y apoyo en resolver dudas en cualquier momento. Al profesor Ph.D. Walter Eduardo Apaza Tapia, por sus valiosas enseñanzas, su ímpetu y motivación en esta hermosa rama de la agricultura. Y al profesor Ing. MSc. César Fribourg, por sus consejos y enseñanzas.

A los miembros del jurado.

A The Alliance Bioversity International & CIAT, por la gran oportunidad y apoyo brindados.

Al Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) y en especial a los colaboradores de sus Direcciones Ejecutivas por el soporte constante en los trabajos en campo.

A los productores de plátanos y bananos de las regiones de la Selva peruana por participar y colaborar en el proyecto y ser parte fundamental de este.

A Karen Barzola por su transparencia y ejemplo íntegro, por su paciencia, comprensión y apoyo inmensos.

A mis amigos.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Importancia y producción de plátanos y bananos en el Perú	5
2.2. La marchitez por <i>Fusarium</i> (MF) en plátanos y bananos	6
2.3. El hongo <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i>	7
2.4. Síntomas de la MF	9
2.5. Aspectos epidemiológicos de la MF en plátanos y bananos	10
2.5.1. Inicio y desarrollo del ciclo de la MF	10
2.5.2. Dispersión de Foc	11
2.5.3. Cuantificación de la enfermedad	11
2.5.4. Factores que afectan la intensidad de la MF	12
2.6. Análisis de patrones espaciales	13
2.7. Características de los análisis espaciales de las epidemias	15
2.7.1. Distribuciones estadísticas para la incidencia de la enfermedad	15
2.7.2. Índice de dispersión (<i>D</i>)	17
2.7.3. Ley de la potencia binaria de Taylor (BPL)	17
2.7.4. Jerarquía espacial	18
2.7.5. Métodos basados en distancias (SADIE)	19
2.8. Características y manejo del cultivo en relación con la intensidad de la enfermedad	19
2.9. Estimación de pérdidas ocasionadas	20
III. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1. Fincas evaluadas	22
3.2. Evaluación de la marchitez por <i>Fusarium</i> (MF) en plátanos y bananos	23
3.3. Cuantificación de la intensidad de la MF en plátanos y bananos	23
3.4. Características del manejo del cultivo	24
3.5. Análisis espacial de la incidencia de la MF	24
3.5.1. Análisis de los patrones espaciales a nivel de unidad muestral o a menor escala (basados en cuadrantes)	24
a. Análisis de jerarquía espacial	24
b. Índice de dispersión (<i>D</i>)	25
c. Ajuste a distribuciones	25

3.5.2. Análisis de los patrones espaciales a nivel de finca o mayor escala	26
a. Análisis espaciales basados en índices de distancias (SADIE)	26
b. Semivarianza	26
3.6. Análisis de concordancia	27
3.7. Ley de la potencia binaria de Taylor (BPL)	27
3.8. Determinación de los factores de manejo cultural que afectan la intensidad y distribución espacial de la MF	28
3.9. Estimación de pérdidas relacionadas con la MF en plátanos y bananos	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1. Fincas evaluadas	29
4.2. Evaluación de la marchitez por Fusarium (MF) en plátanos y bananos	29
4.3. Prevalencia de la MF	35
4.4. Incidencia de la MF	39
4.5. Análisis de los patrones espaciales de la incidencia de la MF	47
4.5.1. Análisis de jerarquía espacial	47
4.5.2. Índice de dispersión (<i>D</i>)	49
4.5.3. Ajuste a distribuciones estadísticas	50
4.5.4. Análisis espaciales basados en índices de distancia (SADIE)	54
4.5.5. Semivarianza	61
4.5.6. Análisis de concordancia entre métodos	63
4.5.7. Ley de la potencia binaria de Taylor (BPL)	65
4.6. Determinación de los factores de manejo cultural que afectan la intensidad y distribución espacial de la MF	77
4.7. Estimación de pérdidas relacionadas con la MF en plátanos y bananos	84
V. CONCLUSIONES	88
VI. RECOMENDACIONES	90
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
VIII. ANEXOS	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localización de las 189 fincas inicialmente evaluadas en 07 regiones, 15 provincias y 39 distritos en la Selva peruana	30
Figura 2: Fincas evaluadas para la marchitez por Fusarium (MF) de plátanos y bananos en diferentes regiones, sistemas de producción y paisajes	31
Figura 3: Síntomas externos típicos de la marchitez por Fusarium (MF)	32
Figura 4: Planta con síntomas de la marchitez por Fusarium (MF) y pudriciones blandas	33
Figura 5: Planta de la variedad Isla en Bagua – Amazonas afectada por la MF pero aparentemente sana	33
Figura 6: Características culturales de hongos aislados del xilema de plátanos y/o bananos con síntomas de la MF	34
Figura 7: Características morfológicas de hongos aislados del xilema de plátanos y bananos afectados por la MF	35
Figura 8: Número de campos evaluados (base), campos con fincas con plantas sintomáticas (centro) y prevalencia de la MF (%) (superior) de las zonas evaluadas de Perú	36
Figura 9: (a) Contribución de cada zona evaluada a la dependencia con la probabilidad de prevalencia de la MF y (b) asociación significativa entre zonas con la de prevalencia de la MF en plátanos y bananos	37
Figura 10: (a) Contribución de cada variedad a la dependencia con la prevalencia de la MF y (b) asociación significativa entre variedades y la prevalencia de la enfermedad	38
Figura 11: (a) Contribución de cada interacción entre variedad y localidad a la dependencia entre estas y (b) asociación significativa entre variedad utilizada y zona evaluada para la MF	38
Figura 12: (a) Localización de las 53 fincas afectadas por la marchitez por Fusarium (MF) en las cinco regiones que fueron analizadas en este estudio y (b) diagrama de cajas de la incidencia de la MF (%) en fincas de plátanos y/o bananos en diferentes regiones y (c) distintas variedades	39
Figura 13: (a) Histograma de frecuencias de la incidencia de la MF (%) por variedad empleada en 53 fincas evaluadas en 05 regiones en Perú. (b) Aporte de cada combinación entre región y variedad a la dependencia entre estas y (c) asociaciones significativas entre regiones y variedades	44

Figura 14: Relación entre la incidencia de la MF en niveles jerárquicos de (a) 2×2 , (b) 4×4 y (c) 6×6 plantas por cuadrante en 53 fincas productoras de musáceas en el Perú	48
Figura 15: Histogramas del (a) índice de dispersión (D); (b) parámetro β -binomial (θ) del ajuste a distribuciones estadísticas; (c) índice de agregación (I_a) del análisis SADIE; y (d) rango práctico (metros) del modelo esférico del análisis empírico de la semivarianza para la incidencia de la MF	53
Figura 16: Fincas con focos dispuestos de forma aleatoria (D : agregado; I_a : aleatorio)	57
Figura 17: Fincas con plantas totalmente aleatorizadas en finca (D : aleatorio; I_a : aleatorio) localizadas en JUN	58
Figura 18: Fincas con un gran foco bien definido en cada una (D : agregado; I_a : agregado) localizadas en AMA y de la variedad Seda	60
Figura 19: Fincas con plantas aleatorias en una zona definida de la finca (D : aleatorio; I_a : agregado)	61
Figura 20: Relación entre el logaritmo de la varianza observada y de la varianza teórica para una distribución binomial para datos de incidencia de la MF en 53 fincas evaluadas en Perú (a) de forma general y (b) según variedad empleada	66
Figura 21: Relación entre el logaritmo de la varianza observada y el logaritmo de la varianza teórica para una distribución binomial de los datos de incidencia de la MF en 53 fincas evaluadas en Perú (a) según daños por <i>C. sordidus</i> y (b) asociaciones entre daños, incidencias y estadísticos espaciales	70
Figura 22: Distribución espacial de las unidades muestrales de tamaño efectivo en fincas con mayores daños por CS según MAPComp y visualización de nuevos focos a mayores escalas asociados con mayores daños y la variedad Isla	72
Figura 23: Relación entre el logaritmo de la varianza observada y el logaritmo de la varianza teórica para una distribución binomial de los datos de incidencia de la MF en 53 fincas evaluadas en Perú según (a) intensidad de manejo y (b) conocimientos sobre la MF	73
Figura 24: Relación entre el logaritmo de la varianza observada y el logaritmo de la varianza teórica para una distribución binomial de los datos de incidencia de la MF en 53 fincas evaluadas en Perú (a) según temperaturas y (b) altitudes climáticas medias	75
Figura 25: Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA) a partir de datos cualitativos de 53 fincas evaluadas para la incidencia de la Marchitez por <i>Fusarium</i> (MF) de plátanos y bananos en cinco zonas en Perú	78

Figura 26: Análisis de Componentes Principales (PCA) a partir de datos cuantitativos de 53 fincas evaluadas para la incidencia de la Marchitez por Fusarium (MF) de plátanos y bananos en cinco zonas en Perú 80

Figura 27: Regresión general (línea sólida continua) y regresión por variedades (líneas discontinuas) para la (a) relación entre la incidencia de la MF (%) y las pérdidas en rendimiento y (b) la incidencia de la MF (%) y las pérdidas económicas estimadas 85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Descripción de las fincas analizadas para la incidencia (%) y patrones espaciales de la MF en CAJ, AMA Y JUN	41
Tabla 2: Descripción de las fincas analizadas para la incidencia (%) y patrones espaciales de la MF en JUN	42
Tabla 3: Descripción de las fincas analizadas para incidencia (%) y patrones espaciales de la MF en JUN, CUS y SML	43
Tabla 4: Valores promedio (Prom.) y mediana (Med.) de la prevalencia (Prev.) e incidencia (\bar{y}) de la marchitez por Fusarium (MF) (%) de plátanos y bananos (musáceas) y proporción de campos clasificados con patrones agregados (Agr.) con significancia estadística por cada uno de los estadísticos espaciales para diferentes regiones de Perú ^a	52
Tabla 5: Concordancia por Kappa de Cohen y Kappa de Fleiss y proporción de campos con la misma clasificación según los estadísticos espaciales	64

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Encuesta empleada en las entrevistas a productores	106
Anexo 2: Base de datos de fincas con incidencia de la MF (Resultados)	110

RESUMEN

La Marchitez por *Fusarium* (MF), ocasionada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc), es la principal enfermedad de plátanos y bananos a nivel mundial. La llegada de la Raza 4 Tropical (Foc R4T) al Perú ha aumentado la preocupación con esta enfermedad, pues amenaza la seguridad alimentaria y producción de 135 mil hectáreas en la Selva peruana. La comprensión del desarrollo epidemiológico de la MF es crucial para implementar estrategias de manejo efectivas; sin embargo, no existe información básica sobre la intensidad, los patrones espaciales, los modos de diseminación de Foc, ni los potenciales factores involucrados en estos procesos de la MF en el Perú. En este trabajo se realizó un estudio observacional en 189 fincas distribuidas en 06 zonas productoras y 199.47 ha, con los siguientes objetivos: estimar la intensidad de la MF (prevalencia e incidencia); determinar su relación con las variedades cultivadas; generar conocimientos sobre sus patrones de distribución espacial mediante el cálculo del índice de dispersión, ajuste a distribuciones de probabilidad, SADIE y MAPComp; verificar la relación entre las prácticas de manejo con su intensidad y distribución espacial mediante encuestas, evaluaciones *in situ*, uso de la ley de la potencia binaria de Taylor y análisis multivariados y estimar las pérdidas asociadas a la MF. La prevalencia fue de 28.04% (53/189 fincas en 05 zonas), fue mayor en Junín (55.56%), nula en Madre de Dios y estuvo afectada por la variedad. La incidencia media fue baja (1.853%), fue mayor en Junín (2.163%) y en la variedad Isla (Iholena, AAB) (2.21%). El patrón espacial predominante fue agregado y fue detectado por todos los métodos en 24 fincas (45.28% del total), estuvo influenciado por la incidencia y edad del cultivo, hubo mayor agregación en la variedad Seda (Gros Michel, AAA) que en Isla y en fincas con menores daño por *Cosmopolites sordidus* (CS). Hubo aleatorización de focos a nivel de finca con mayores daños por CS. Un manejo del cultivo más intenso y con mayor empleo de insumos químicos se asoció con la región Junín, el uso de la variedad Isla, mayores incidencias de la MF, menor agregación, mayores daños por CS, mayores precipitaciones y el origen de material de siembra de zonas distantes. Las pérdidas en rendimiento a nivel regional variaron entre 6.2 y 1134.44 kg x ha⁻¹ x año⁻¹, en promedio de 207.95 kg x ha⁻¹ x año⁻¹ y, en general, cada 1% de incidencia de la MF ocasionó pérdidas económicas medias de S/. 98.916 x ha⁻¹ x año⁻¹.

Palabras Claves: *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, marchitez por *Fusarium*, epidemiología, prevalencia, incidencia, patrón espacial

ABSTRACT

Fusarium Wilt (FW), caused by the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc), is the major disease of bananas and plantains. The arrival of Tropical Race 4 (Foc TR4) in Peru has increased concern about this disease, as it threatens the food security and production of 135 000 hectares in the Peruvian rainforest. Understanding the epidemiological features of FW is crucial to implement effective management strategies; nevertheless, there is no basic information on the intensity, spatial patterns, modes of dissemination of Foc, and potential factors involved in these processes of FW in Peru. In this work, a survey was carried out in 189 farms distributed in 06 producing areas and 199.47 ha, with the following objectives: to estimate the intensity of FW (prevalence and incidence); to determine its relationship with cultivated varieties; to generate knowledge about its spatial distribution patterns by calculating the dispersion index, fitting probability distributions, SADIE and MAPComp; to verify the relationship between management practices and its intensity and spatial distribution through interviews, *in situ* evaluations, use of Taylor's binary power law and multivariate analysis and to estimate the losses associated with FW. The prevalence was 28.04% (53/189 fields in 05 zones), it was higher in Junin (55.56%), null in Madre de Dios and was affected by variety. The mean incidence was low (1.853%), it was higher in Junín (2.163%) and in the Isla variety (Iholena, AAB) (2.21%). The predominant spatial pattern was aggregate and was detected by all methods on 24 fields (45.28% of the total), it was influenced by incidence and crop age, there was more aggregation on the Seda variety (Gros Michel, AAA) than Isla and on fields with less damages by *Cosmopolites sordidus* (CS). There was randomisation of foci at the farm level with higher CS damages. More intensive crop management and greater use of chemical inputs was associated with the Junin region, the use of the Isla variety, higher incidences of MF, lower aggregation, higher CS damages, higher rainfalls, and the origin of planting material from distant areas. The estimated losses at regional level ranged from 6.2 to 1134.44 kg x ha⁻¹ x year⁻¹, with an average of 207.95 kg x ha⁻¹ x year⁻¹; and overall, estimated losses increased on average by S/. 98.916 x ha⁻¹ x año⁻¹ at each 1% of incidence.

Keywords: *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, Fusarium wilt, epidemiology, prevalence, incidence, spatial pattern

RESUMO

A murcha de Fusarium (MF), causada pelo fungo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc), é a maior doença da banana. A entrada da Raça 4 Tropical (Foc R4T) no Peru tem aumentado a preocupação com essa doença, pelo fato de ameaçar a segurança alimentar e a produção de 135 000 hectares na selva peruana. A compreensão do desenvolvimento epidemiológico da MF é crucial na implementação de estratégias de manejo efetivas; porém, não há informações básicas sobre a intensidade, os padrões espaciais, os modos de disseminação do Foc nem dos possíveis fatores envolvidos nesses processos da MF no Peru. Este estudo de levantamento foi realizado em 189 fazendas distribuídas em 06 áreas produtoras de musáceas e 199.47 ha, com os seguintes objetivos: estimar a intensidade da MF (prevalência e incidência); determinar sua relação com as variedades cultivadas; gerar conhecimento quanto aos padrões de distribuição espacial por meio do cálculo do índice de dispersão, ajuste de distribuições de probabilidade, SADIE e MAPComp; verificar a relação entre práticas de manejo e a intensidade e distribuição espacial por meio de enquetes, avaliações *in situ*, uso da lei de potência binária de Taylor e análises multivariadas e estimar as perdas associadas à MF. A prevalência foi de 28,04% (53/189 campos em 05 zonas), foi maior em Junín (55,56%), nula em Madre de Dios e foi afetada pela variedade. A incidência média foi baixa (1,853%), foi maior em Junín (2,163%) e na variedade Isla (Iholena, AAB) (2,21%). O padrão espacial predominante foi o agregado, detectado por todos os métodos em 24 campos (45,28% do total), influenciado pela incidência e pela idade do pomar; a agregação foi maior na variedade Seda (Gros Michel, AAA) do que na Isla e em campos com menores danos por *Cosmopolites sordidus* (CS). Ocorreu aleatoriedade de focos no nível da fazenda com maiores danos de CS. O manejo mais intensivo das culturas e o maior uso de agroquímicos foram associados à região Junín, ao uso da variedade Isla, à maiores incidências de MF, à menor agregação, à maiores danos por CS, à maiores precipitações e à origem do material de plantio de áreas distantes. As perdas de produtividades estimadas em nível regional atingiram de 6,2 a 1134,44 kg x ha⁻¹ x ano⁻¹, com média de 207.95 kg x ha⁻¹ x ano⁻¹ e, em geral, cada 1% de incidência de MF resultou em perdas econômicas médias de 98.916 S/. x ha⁻¹ x ano⁻¹.

Palavras-chave: *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, murcha de Fusarium, epidemiologia, prevalência, incidência, padrão espacial

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de plátanos y bananos (*Musa* spp.) es de gran importancia para la seguridad alimentaria en todo el mundo (IICA, 2021), especialmente para los pobladores rurales de la selva peruana, quienes son en su mayoría de escasos recursos y se benefician de la fruta como alimento básico y fuente continua de ingresos (Rojas et al., 2022). En el Perú, las musáceas son cultivadas en más de 170 000 ha, con más del 70% de las fincas localizadas en la selva (SENASA, 2019), representan las frutas de mayor importancia en cuanto a volumen producido, son cultivadas casi exclusivamente por pequeños agricultores, con predominancia de agricultura familiar y elevada diversidad en variedades cultivadas y sistemas de producción (Rojas et al., 2022). Adicionalmente, el Perú es un importante exportador de bananos orgánicos de las variedades del subgrupo Cavendish (AAA) hacia 15 destinos a nivel mundial (SENASA, 2019; Redagrícola, 2020; Mosquera et al., 2023).

La marchitez por Fusarium (MF), causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (E.F. Smith) W.C. Snyder & H.N. Hansen (Foc), es una enfermedad que afecta de forma letal a este grupo de cultivos y es actualmente la enfermedad más devastadora para plátanos y bananos (Wardlaw, 1972; Ploetz y Pegg, 2000; Robinson y Saúco, 2010). Moore et al. (2001) la han catalogado como una de las enfermedades más ampliamente dispersas en el mundo y más destructivas en la historia de la agricultura.

La raza 1 de Foc (Foc R1) fue reportada por primera vez en Australia en el año 1874 (Bancroft, 1975), luego en América Central, se diseminó mundialmente y hoy está presente prácticamente en todos los países donde se cultivan plátanos y bananos (Wardlaw, 1972; Ploetz y Pegg, 2000; Robinson y Saúco, 2010). Durante el siglo XX, la MF devastó plantaciones de bananos del subgrupo Gros Michel (AAA) en Centro y Sudamérica, cuya fruta era exportada a todo el mundo, diezmó más de 50 000 ha de estas variedades a nivel mundial y ocasionó pérdidas estimadas en 2.3 billones de dólares entre los años 1940 y 1960, considerando solo las empresas exportadoras. Esto obligó al reemplazo por las variedades del subgrupo Cavendish (AAA) resistentes a las cepas predominantes de Foc (Ploetz, 2006; Ploetz y Pegg, 2000; Blomme et al., 2013; Ploetz, 2015).

El problema de las epidemias causadas por Foc R1 durante el siglo XX fue mitigado con el cambio de uso por las variedades del subgrupo Cavendish, lo que detuvo el estudio y búsqueda de información básica sobre la enfermedad; pero a partir de 1960, se tuvo evidencia de que estas variedades eran afectadas por una cepa más agresiva: la raza 4 Tropical de Foc (Foc R4T) (Ploetz, 2006).

El patógeno Foc R4T, de mayor virulencia, rango de hospedantes y capacidad de dispersión, ha ocasionado pérdidas financieras graves como las estimadas por el CGIAR en el año 2013: más de 121 millones de dólares en Indonesia, 253 millones en Taiwán, 14 millones en Malasia y más de 7.5 millones de dólares en Mozambique. Lo mencionado ilustra la necesidad de estudios a mayor profundidad acerca de Foc, su biología, epidemiología, diversidad, detección, cuantificación de pérdidas y manejo (Thangavelu et al., 2020). Por esto, la MF es la mayor preocupación para los países productores de plátanos y bananos en todo el mundo (Dita et al., 2018).

En el Perú, la MF ocasionada por Foc R1 ha afectado gravemente a las variedades Isla (Iholena, AAB), Seda (Gros Michel, AAA), Manzano (Silk, AAB), Palillo (Capirona, Guayabo) (Maouli Popoulu, AAB) y Morado (Red, AAA), mayormente en selva central, selva norte y valles de la costa (Mala y Chicama). También se ha observado síntomas en la variedad Sapo o Sapino (Bluggoe, ABB) que se cultiva en la selva (Marín, 2010). Además, el año 2021 se confirmó la presencia de Foc R4T en plantas de variedades del subgrupo Cavendish (AAA) afectadas por la MF en un área inicialmente limitada en el distrito de Sullana, desde donde se ha dispersado a otros distritos en la región de Piura (Acuña et al., 2022), representando el riesgo de afectar severamente a la mayoría de las variedades cultivadas en el Perú (Martínez de la Parte, 2024).

Este patógeno puede sobrevivir durante décadas en suelo infestado y en ausencia de su hospedante al ser capaz de producir esporas asexuales de paredes gruesas denominadas clamidosporas como estructuras de conservación, las que constituyen el principal inóculo primario (Ploetz, 2015) y propágulo de dispersión a través de suelo contaminado, maquinaria agrícola, agua de riego o material de siembra infectado y actividades antropogénicas (Dita et al., 2018). Foc es introducido a nuevas áreas principalmente por el movimiento de material de siembra infectado (Blomme et al., 2013). Este hongo coloniza el xilema de su hospedante y, una vez establecido en la planta, no es posible el control químico ni biológico (Dita et al., 2018), siendo el uso de cultivares resistentes o la siembra

de cultivares sanos y libres de la enfermedad en suelos libres del patógeno las únicas alternativas efectivas (Ploetz, 2006).

La llegada de Foc R4T a América: Colombia (2019) (García-Bastidas et al., 2019), Perú (2021) (Acuña et al., 2022) y Venezuela (2023) (Herrera et al., 2023), refleja la gran capacidad de dispersión del patógeno y la dinámica de la MF a cortas y largas distancias, lo que ha sido favorecido por alteraciones y fenómenos atmosféricos, así como las características del cultivo. Según información directa del SENASA (Perú), actualmente existen más de 500 focos de la enfermedad en la región Piura, causando grandes pérdidas directas e indirectas y amenazando a todas las regiones productoras de plátanos y bananos del Perú, principalmente localizadas en la región amazónica e involucrando en su mayoría a pobladores de escasos recursos (Rojas et al., 2022). Esto hace de vital importancia la ejecución de estudios para obtener información sobre la ocurrencia y factores asociados a la MF, que permitirán implementar adecuadamente estrategias de manejo por parte de los organismos nacionales y regionales de protección fitosanitaria (Ploetz, 2006) y por los productores de plátanos y bananos, tomando en cuenta sus características particulares.

Frente a lo mencionado, los estudios espaciales y temporales de la enfermedad sirven para entender el desarrollo de las epidemias y los potenciales factores involucrados: ambiente (plagas, temperatura, suelo, etc.), hospedantes (cultivares o variedades, susceptibilidad, edad, etc.), patógenos (dispersión, virulencia, etc.), así como al factor antropogénico (Bergamin-Filho et al., 2004; Madden et al., 2007). Existe un gran vacío en la epidemiología de la MF, especialmente en cómo afecta y/o es afectada la dispersión o distribución espacial de la enfermedad (y patógeno) en campo, sobre la dinámica de la epidemia (Dita et al, 2018).

No existe información sobre la cuantificación de la intensidad de la MF en el Perú a gran escala, tampoco sobre los patrones espaciales predominantes en condiciones naturales ni de los factores que influyen sobre estos. Se asume que la incidencia de la enfermedad puede llegar al 100% en áreas cultivadas con variedades muy susceptibles a Foc y en condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad, áreas que suelen ser abandonadas o donde el cultivo es reemplazado. Los resultados de incidencia son variables entre países evaluados (Karangwa et al., 2016; Heck et al., 2019). En todo el mundo, solo existen cuatro estudios sobre los patrones espaciales de la MF en condiciones reales de campo (Meldrum et al., 2013; Liu et al., 2015; Heck et al., 2019; Heck et al., 2021a).

En el Perú, solo un estudio ha indicado la relación entre las prácticas de manejo del cultivo y la intensidad y/o distribución espacial de la MF en una zona limitada de San Luis de Shuaro, Junín (Román-Jerí, 2012). Adicionalmente, en todo el mundo se ha estudiado muy poco el posible rol del principal insecto plaga de las musáceas: *Cosmopolites sordidus* (CS), como posible vector de los propágulos de Foc (Meldrum et al., 2013; Heck et al., 2021b). Las características propias de los paisajes, incluyendo el factor antropogénico, pueden influir en el comportamiento y efecto de los actores involucrados en el patosistema, lo que es raramente tomado en cuenta en los estudios epidemiológicos, pero con gran efecto sobre la adopción y eficiencia de las medidas de manejo que se proponen (Mc Roberts et al., 2011; McQuaid et al., 2017; Dita et al., 2018; Alves, 2022).

El manejo de la MF depende del conocimiento de las características espaciales y temporales de la enfermedad y de los factores que influyen sobre estas, por lo que, en marco del proyecto “*Fortaleciendo conocimientos, capacidad de diagnóstico y buenas prácticas frente a la amenaza de Fusarium y otros problemas fitosanitarios para las familias productoras de plátanos del Perú*”, financiado por la Secretaría Técnica de Coordinación (STC) con CGIAR del MIDAGRI, los objetivos de este trabajo buscaron reducir la brecha de conocimientos y obtener bases epidemiológicas sólidas mediante las respuestas a preguntas asociadas a estos factores para obtener en el país información útil en el desarrollo de estrategias de manejo efectivas buscando mitigar los daños producidos por las cepas de Foc ampliamente dispersas en el Perú y reducir el riesgo de una mayor dispersión de Foc R4T, colaborar con el SENASA en sus acciones de vigilancia y control, y beneficiar a los productores, asociaciones, empresas, entre otros, a mejorar sus decisiones en el manejo de la enfermedad, reducir las pérdidas presentes y/o potenciales en sus cultivos y proteger la seguridad alimentaria de los pobladores de la selva y costa peruanas.

Por lo expuesto, se plantearon los siguientes objetivos: a) Cuantificar la intensidad de la MF de plátanos y bananos en las principales zonas de producción del Perú, b) determinar su relación con las variedades cultivadas, c) generar conocimientos sobre los patrones de distribución espacial de la MF mediante el uso de herramientas epidemiológicas, d) verificar la relación entre las prácticas de manejo y la intensidad y/o distribución espacial de MF y e) estimar las pérdidas asociadas con la MF a nivel regional.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia y producción de plátanos y bananos en el Perú

El cultivo de plátanos y bananos tiene gran importancia social y económica en el Perú, principalmente en la Amazonía y zonas tropicales de la costa norte del país (Rojas et al., 2022). Más del 90% de la producción total es destinada al consumo interno y una menor parte al comercio exterior. Este cultivo es una fuente de ingresos continua, de gran versatilidad y funciona como una “caja chica” para los pequeños productores (INIA, 2020). El consumo anual per cápita de plátanos y bananos es de 58.4 Kg (Mosquera et al., 2023), lo que les convierte en las frutas más consumidas por los peruanos y, según el INEI (2014), esto ha resultado mayor en los estratos socioeconómicos más pobres, mientras que en la selva peruana se ha indicado en 104.3 Kg.

Según FAOSTAT (2023), se han producido aproximadamente 2 378 045.18 toneladas de plátanos y bananos en un área de más de 174 100 ha, siendo el principal producto frutícola en cuanto a volumen producido, cuarto en general y el quinto producto que genera más divisas en el Perú, con S/. 845 620 000. En el año 2021 se tuvo una productividad media de aproximadamente 13.66 toneladas por hectárea (Mosquera et al., 2023); además, más del 70 % de la producción nacional se da en la selva peruana (Rojas et al., 2022).

Los plátanos y bananos cultivados pertenecen al género *Musa*, familia Musaceae, orden Zingiberales y clase Monocotiledóneas (Martínez, 2023). Estas musáceas son principalmente diploides, triploides o tetraploides con número básico de cromosomas igual a 11 ($x = n$) y surgieron a partir de hibridaciones de *Musa acuminata* (AA, $2n = 22$) o *Musa balbisiana* (BB, $2n = 22$) en el sudeste de Asia, en donde presentan semillas de forma silvestre (Ploetz, 2006; Dantas et al., 2009). En la evolución de las musáceas cultivadas una mutación inicial de *M. acuminata* (AA) originó a los cultivares diploides partenocárpicos del grupo AA, luego ocurrió la hibridación entre cultivares del grupo AA y plantas silvestres de *M. balbisiana* (BB) que originaron a los cultivares del grupo AB, actualmente raros. Posteriormente se dieron cruzamientos espontáneos entre el polen de los

parentales (*M. acuminata* y *M. balbisiana*) o los cultivares AA, con los grupos AA o AB, que dieron origen a los triploides AAA, AAB o ABB (Dantas et al., 2009).

Los plátanos y bananos han sido nombrados en el Perú bajo la denominación de “clon”, siendo complicado el empleo de sinónimos reconocidos a nivel mundial, regional o entre regiones dentro de un país (Krauss et al., 1999). Los plátanos se consumen cocidos y son fuente fundamental de carbohidratos en la dieta de los pobladores, de los cuales destacan: Bellaco (Plantain, ABB), Bellaco plantano, Inguiri o Dominico (Plantain, AAB), entre otros. Los bananos son utilizados directamente como postre cuando están maduros, resaltando las variedades del subgrupo Cavendish (AAA) y Gros Michel (AAA), Isla (Iholena, AAB), Moquicho o Biscochito (Sucrier, AA), Palillo o Capirona (Maoli Popoulu, AAB), Rojo (Red, AAA) y Manzano (Silk, AAB) (Rojas et al., 2022). Se ha reportado al menos 37 clones en zonas de comercio rural, lo que ilustra la complejidad en cuanto a diversidad, denominación y distribución que envuelve a este cultivo; además, se ha indicado diferentes respuestas de estos frente a las distintas plagas y enfermedades que afectan a las musáceas (Krauss et al., 1999).

La producción de plátanos y bananos en el Perú se da principalmente bajo sistemas de producción tradicionales o asociados con café, cítricos, cacao, entre otros, mayormente cumpliendo el rol de sombra temporal; así como bananos en sistemas de monocultivo (Rojas et al., 2022). El manejo se da principalmente con escasa tecnología productiva, con excepciones por parte de asociaciones de productores y empresas agroexportadoras con capacidad suficiente de inversión para lograr una tecnología adecuada. Esto se traduce en diferencias productivas y heterogeneidad entre producción y superficie cosechada. La selva es la región de mayor producción de plátanos y bananos; mientras que, en la costa peruana, Piura, seguido de Tumbes, destacan en la producción de bananos (INIA, 2020).

2.2. La marchitez por *Fusarium* (MF) en plátanos y bananos

La marchitez por *Fusarium* (MF), fusariosis o antes llamado “mal de Panamá” de plátanos y bananos, es una enfermedad causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc), patógeno habitante del suelo que afecta el tejido vascular de plantas del género *Musa* (Ploetz et al., 2015; Dita et al., 2018), considerada como una de las enfermedades más devastadoras en la historia de la agricultura y la más destructiva en bananos y plátanos (Moore et al., 2001). En los últimos años ha surgido la controversial sugerencia de que más de una especie de *Fusarium* está asociada con la enfermedad (Maryani et al., 2019; Torres-

Bedoya et al., 2021), pero en este trabajo se emplea el nombre más reconocido y relacionado con Foc.

Esta enfermedad fue descrita por primera vez en Australia en el año 1874, pero no fue hasta 1890 que Erwin F. Smith reportó al hongo *Fusarium oxysporum* como el microorganismo habitante de suelo asociado a la enfermedad en plantaciones de bananos con síntomas de marchitez en Cuba (Ploetz et al., 2015; Dita et al., 2018). La MF fue reportada por primera en el Perú, específicamente el año 1951 en el departamento de Tingo María, luego Foc se propagó a Tumbes y después a Piura (Pinchinat et al., 1986).

La MF debida a la raza 1 de Foc (Foc R1) fue la que ocasionó la destrucción de 50 000 ha de bananos del subgrupo Gros Michel y obligó al cambio de este por las variedades del subgrupo Cavendish, resistentes a Foc R1. Hasta 1989 se conocía que una variante de Foc, afectaba y ocasionaba la enfermedad en Cavendish bajo condiciones subtropicales o frías, como en las Islas Canarias. Pero a inicios de 1990 esta enfermedad comenzó a preocupar nuevamente a los principales productores de banano cuando se encontraron plantaciones de del subgrupo Cavendish con síntomas de la MF en el sudeste asiático y en zonas de clima tropical y en ausencia de condiciones predisponentes, lo que acabó con la idea de que estas variedades no serían afectadas por Foc en las condiciones tropicales más favorables para el cultivo de musáceas (Ploetz et al., 2015; Dita et al., 2018). La dispersión de esta última cepa, la raza 4 Tropical de Foc (Foc R4T), alertó nuevamente a la industria de bananos y producción de plátanos, lo que empezó a ser de interés global debido a las características del patógeno.

Según el CABI (2023), la MF ocasionada por Foc R4T ha sido reportada afectando musáceas en 22 países alrededor del mundo, incluyendo una zona bajo control oficial en el norte del Perú, en Piura. Asimismo, Foc y todas sus cepas patogénicas en musáceas, han sido reportados en casi el total de regiones productoras de dichos cultivos, alcanzando a afectarlas en 94 países dentro de seis continentes en todo el mundo (CABI, 2023).

2.3. El hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*

El género *Fusarium* es uno de los más importantes para la agricultura y dentro del cual está incluido el complejo de especies de hongos morfológicamente similares (especies crípticas) denominado *Fusarium oxysporum* (FOSC), que incluye especies principalmente saprófitas y hongos patógenos de plantas que causan el síndrome de marchitez en sus

hospedantes (Ploetz, 2006; Gordon, 2017). Estos fitopatógenos tienen como características la capacidad de invadir los tejidos radiculares de naturaleza epidérmica, colonizar los haces vasculares gracias a la producción de enzimas, toxinas y/o hormonas, dispersarse internamente al producir micelio y/o esporas (macro y microconidias) dentro de los vasos xilemáticos de la planta y llegar a matar a su hospedante por colonizar y obstruir este tejido vascular e impedir del flujo de agua y nutrientes (Stover, 1962). Estos hongos pueden también ocasionar pudriciones radiculares, así como chupaderas, y afectar a cientos de especies vegetales (Beckham, 1985, mencionado por Huarhua, 2018; Ploetz, 2006).

Según CABI (2021), la especie *Fusarium oxysporum*, es clasificada dentro de la clase Sordariomycetes (división Ascomycetes), orden Hypocreales y familia Nectriaceae. Su taxonomía intraespecífica es compleja y existe la clasificación práctica en formas especiales (*formae speciales*) en función de la especie o grupo de especies para los que los aislados son patogénicos, con reportes de 106 *formae speciales* bien caracterizadas, siendo para el caso de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* la característica de causar enfermedad en especies vegetales dentro del género *Musa* (Eder-Hertman y Lecomte, 2019).

El término de raza es empleado para reflejar las diferencias de patogenicidad al comparar los aislamientos que atacan a determinados cultivares o según la relación genética involucrada en la resistencia. Las razas se nombran de acuerdo con la cronología de su descubrimiento. Se han caracterizado las razas dentro de 25 de las formas especiales anteriormente indicadas (Eder-Hertman y Lecomte, 2019).

Dentro de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* se han descrito diferencias en función de la patogenicidad en algunos genotipos de bananos y plátanos, lográndose la definición de cuatro razas: la raza 1 (Foc R1) es diferencialmente patogénica en las variedades del subgrupo Gros Michel (AAA), la raza 2 (Foc R2) en Bluggoe (ABB), la raza 4 subtropical (Foc R4ST) en bananos del subgrupo Cavendish (AAA) en condiciones subtropicales o estreses abióticos y la raza 4 tropical afecta bananos del subgrupo Cavendish (AAA) en condiciones tropicales (Ploetz, 2006; Czislowzky et al., 2018). Esta última raza afecta adicionalmente a los cultivares susceptibles y resistentes a las otras razas, habiéndose propuesto y discutido la denominación de Foc R4T como una especie distinta: *Fusarium odoratissimum* (Maryani et al., 2019; Torres-Bedoya, 2021). Se ha sugerido una definición práctica para Foc R4T como los aislamientos con capacidad patogénica frente a las variedades del subgrupo Cavendish en condiciones tropicales (Torres-Bedoya, 2021).

2.4. Síntomas de la MF

La marchitez por *Fusarium* (MF) de plátanos y bananos es reconocida por el conjunto de síntomas típicos de la enfermedad: síndrome de la marchitez por *Fusarium*. Los síntomas externos se manifiestan generalmente como amarillamiento progresivo de las hojas más viejas hacia las más jóvenes, iniciándose en los bordes del limbo con un avance uniforme hacia la nervadura principal. Se aprecia epinastia de hojas, luego marchitez, seguido del doblado del pecíolo unido al pseudotallo, por lo que consecuentemente la planta adquiere el aspecto típico de la enfermedad en forma de paraguas cerrado o “falda hawaiana”. Algunas veces se presenta marchitez sin amarillamiento (síndrome de hoja verde). A su vez, la lámina foliar de las hojas jóvenes (bandera) sufre distorsiones y se ve más erguida. Puede observarse rajaduras del pseudotallo en su parte externa cercana al suelo. Estos síntomas son comunes en plantas de más de cuatro meses (Moore et al., 1995; De Beer et al., 2001; Ploetz, 2006; Cordeiro et al., 2005, Dita et al., 2021).

Los síntomas internos se observan al hacer cortes transversales o longitudinales en el pseudotallo o corno de plantas en estados más avanzado de la enfermedad, donde se aprecia una decoloración parda a rojiza del xilema debido a la oxidación de fenoles. En corte transversal del pseudotallo, la decoloración vascular se concentra en las partes periféricas con progreso hacia el centro. A este nivel es característico de la MF la presencia de bolsillos gomosos (“gum pockets”) de color marrón a púrpura oscuro correspondientes a los vasos del xilema colonizados por *Foc*. En corte longitudinal, es notorio el avance de la necrosis vascular como filamentos continuos de color marrón a púrpura. En el corno o rizoma se logra observar una decoloración más pronunciada en el área de mayor densidad vascular donde la estela se une al córtex e iniciándose a partir de las raíces absorbentes, donde inicia la infección; asimismo, las manchas y filamentos de decoloración vascular son amarillentas y no oscuras ni blancas (De Beer et al., 2001; Ploetz, 2006; Cordeiro et al., 2005; Dita et al., 2021).

2.5. Aspectos epidemiológicos de la MF en plátanos y bananos

2.5.1. Inicio y desarrollo del ciclo de la MF

El principal inóculo primario de Foc son las clamidosporas y luego las conidias, las que una vez en el suelo no podrán moverse sin influencia externa y permanecerán en estado latente hasta ser estimuladas por los exudados radiculares de hospedantes musáceos, no hospedantes (como endófito) o por el contacto directo con las raíces de alguna planta susceptible (Ploetz y Pegg, 2000; Cordeiro et al., 2005; Ploetz, 2006; Dita et al., 2018).

La infección se da por las raíces laterales secundarias o terciarias, pero no por la principal, salvo exista alguna herida. La penetración mayormente es directa o a través de heridas naturales. Se produce micelio y conidias aproximadamente luego de 6 a 8 horas de la germinación de las clamidosporas y se forman nuevas clamidosporas cada 2 o 3 días. La colonización progresa a través de los espacios intercelulares y, una vez que Foc alcance la zona vascular de las raíces laterales, podrá continuar en dirección al cormo, pasando a la zona vascular en los lugares de inserción de las raíces afectadas e iniciando la infección sistémica a partir de la llegada del patógeno a la corteza y cilindro central del cormo debido a la presencia de gran cantidad de vasos xilemáticos. A partir de este nivel inicia la oclusión del sistema vascular evitando el paso de agua y nutrientes. Las conidias se moverán a través del pseudotallo por medio de los haces vasculares y colonizarán los demás tejidos, moviéndose hacia el tejido parenquimático contiguo a los haces vasculares (Ploetz y Pegg, 2000; Cordeiro et al., 2005; Ploetz, 2006; Dita et al., 2018).

Foc produce enzimas y toxinas que, junto a las respuestas de su hospedante, como la formación de geles o tilosas, favorecen el desarrollo de la MF, lo que se manifiesta en el síndrome de marchitez típico de la enfermedad. En estados avanzados de la MF, Foc formará microconidios y clamidosporas que retornarán al suelo “luego de que la planta muera”. El ciclo de la enfermedad empieza nuevamente y se repite cuando los propágulos germinan y se encuentran en posición de afectar a un nuevo hospedante (Ploetz y Pegg, 2000; Cordeiro et al., 2005; Ploetz, 2006; Dita et al., 2018).

2.5.2. Dispersión de Foc

La dispersión de Foc es explicada por el movimiento pasivo de propágulos a cortas y largas distancias, a nivel local, entre fincas, países o continentes. El ser humano es el principal agente de diseminación a largas distancias. Para distancias cortas entran en acción eventos naturales como salpicaduras y escorrentía de agua, movimiento de animales o suelo infestado, así como contacto entre raíces de una planta infectada con una sana. Cualquier elemento capaz de mover partículas y esporas del suelo es capaz de diseminar al patógeno. El movimiento de partes de una planta infectada, con o sin síntomas, cumple un rol importante en la dispersión de Foc y será siempre una posible fuente de inóculo y/o dispersor del patógeno. Por esto, el material de siembra infectado es una de las principales fuentes de inóculo y dispersión de Foc. El traslado de cualquier parte de las plantas de musáceas, sea como material de siembra o para su utilización en prácticas agrícolas o no agrícolas, puede tener influencia en la dispersión de Foc a nivel local, regional o continental (Ploetz, 2006; Pérez-Vicente et al., 2014; Dita et al., 2018).

2.5.3. Cuantificación de la enfermedad

Cuantificar una enfermedad para obtener información sobre su ocurrencia y desarrollo de es fundamental en los estudios epidemiológicos; no obstante, es laborioso y a veces caro. Es útil para evaluar la importancia relativa de distintas enfermedades, diferentes medidas de control, resistencia varietal, etc. Sirve para calcular la relación entre la intensidad de las enfermedades y los daños en la producción con el objetivo de estimar pérdidas (French y Heber, 1982; Madden et al., 2007; Riveiro do Vale et al., 2004).

La intensidad de una enfermedad puede ser calculada en términos de incidencia como el número de unidades de evaluación (plantas, hojas, etc.) que está visiblemente enferma (con síntomas y/o signos) y su relación entre el número total de unidades evaluadas. La incidencia es utilizada cuando una sola lesión acarrea pérdidas, en patógenos del suelo que causan marchiteces y pudriciones, virosis sistémicas, en estudios de dinámica poblacional y toma de decisiones en el manejo integrado (French y Heber, 1982; Madden et al., 2007; Riveiro do Vale et al., 2004). La prevalencia es una medida de la incidencia de la enfermedad a nivel regional como la proporción o número de fincas con plantas enfermas dentro un área o región, de un total de fincas evaluadas (Campbell y Madden, 1990; Nutter et al., 2006).

La evaluación de la importancia de las enfermedades implica no solo analizar casos aislados, sino disponer de datos representativos de la enfermedad que involucren toda un área, región o país. Estos datos pueden ser obtenidos por medio de levantamientos correctamente planificados y/o muestreos uniformes (Riveiro do Vale et al., 2004).

2.5.4. Factores que afectan la intensidad de la MF

La intensidad de la MF depende de la diversidad del patógeno y la relación de esta con la diversidad del material vegetal potencialmente susceptible, es decir, la agresividad o virulencia y capacidad de dispersión de Foc y la resistencia de las variedades de musáceas en una determinada zona, bajo condiciones ambientales y sistemas de producción específicos. Los estudios que involucran estos factores son escasos (Dita et al., 2018).

Los nematodos fitoparásitos ocasionan daños en las raíces de las musáceas y pueden favorecer la intensidad de la MF. El nematodo *Radopholus similis* favoreció la infección de Foc R1 en hospedantes con resistencia a este hongo (Rocha et al., 2020); sin embargo, el sinergismo del nematodo es menos acentuado en interacciones con genotipos muy susceptibles a Foc (Dita et al., 2018). Adicionalmente, la presencia de insectos plaga de plátanos y bananos, como *Cosmopolites sordidus* (CS), podría tener una relación directa en la intensidad de la MF, sumando esto a la capacidad de dispersión de Foc y siendo un factor influyente en la epidemiología de esta enfermedad. Por otro lado, suelos supresivos y un microbioma diverso, tanto en suelo como en planta, favorecen la reducción de la enfermedad, pudiendo afectar la infección y colonización de Foc (Meldrum et al., 2013; Chaves et al., 2014; Dita et al., 2018).

El ambiente podría afectar ciertas respuestas de defensa de las plantas y, en algunas condiciones microbiológicas y químicas del suelo, ejercer un rol importante en el desarrollo de las epidemias de la MF en determinadas variantes de Foc que se presentan bajo ciertas condiciones ambientales, como es el caso de Foc R4ST (Ploetz et al., 2015).

Las características y manejo del suelo tienen influencia en el desarrollo de la enfermedad. Valores bajos de pH favorecen a la enfermedad, y las fuentes de nitrógeno empleadas afectan a este parámetro, por ejemplo, el empleo de urea y amonio tienen efectos en el pH del suelo y la fisiología de la planta, favoreciendo a la enfermedad; al contrario, el empleo de nitrato aumenta el pH de la rizosfera y favorece la síntesis y acumulación de lignina luego de la infección por Foc, mejorando la absorción de nutrientes que participan en el

proceso de resistencia y reduciendo la intensidad de la enfermedad. Se ha indicado que la aplicación de elevadas dosis de fósforo al suelo afecta indirectamente la intensidad de la MF al afectar la absorción de zinc por la planta. Adicionalmente, la elevada disponibilidad de potasio en el suelo reduce la intensidad de la enfermedad (Datnoff et al., 2007; Dong et al., 2016; Mur et al., 2016; Deltour et al., 2017; Dita et al., 2018).

Suelos con elevada diversidad y actividad biológica, como los de campos bajo manejo orgánico, son más supresivos frente a las infecciones fúngicas, comparados con los de manejos convencionales. Asimismo, aplicar fertilizantes naturales aumenta la diversidad bacteriana en la rizosfera, influyendo en la epidemiología de la enfermedad (Shen et al., 2013; Van Bruggen et al., 2015).

Texeira et al. (2021), en un estudio realizado en Brasil, analizaron la influencia de las características del suelo y nutritivas de plátanos y bananos sobre la intensidad de la MF al comparar su incidencia en campos con diferencias en el modo de producción y uso de insumos químicos. Los campos con uso de variedades del subgrupo Cavendish o 'Prata' y empleo de fertilizantes químicos estuvieron asociados con elevada acidez del suelo, bajos niveles de fósforo, calcio, manganeso y un elevado nivel de intensidad de la enfermedad, asimismo, bajos niveles de saturación de bases estuvieron asociados a la incidencia de la MF. Al contrario, en campos con uso de las variedades Manzano o 'Prata' y poco o sin empleo de fertilizantes químicos, solo hubo asociación de bajos niveles de boro con la incidencia de la MF; además, la densidad y resistencia a la penetración fueron mayores en las fincas con alta incidencia de la enfermedad.

2.6. Análisis de patrones espaciales

Una epidemia se origina cuando una población del patógeno se establece y causa enfermedad en una población de su hospedante. El estudio de las epidemias comprende los análisis de los cambios en tiempo y espacio de las enfermedades a nivel poblacional (Madden et al., 2007). Los estudios temporales han tenido mayor atención en Fitopatología debido a su mayor simplicidad, pero el análisis espacial es de gran importancia para la toma de decisiones, evaluar medidas de control y el monitoreo de enfermedades de plantas; lográndose una visión más completa de la estructura y del comportamiento de los patosistemas a partir de la combinación de estudios con ambos enfoques (Bergamin-Filho et al., 2002; Bergamin-Filho et al., 2004).

El patrón espacial que presenta una enfermedad es una propiedad ecológica definida como la disposición de las plantas o entidades enfermas (con síntomas y/o signos) relacionadas entre sí, originada a partir de la interacción de diversos factores físicos, químicos, biológicos y ecológicos que influyen en la dispersión del patógeno desde una o varias fuentes dentro y/o fuera del área en estudio, en el proceso de infección y desarrollo de la enfermedad (Campbell y Benson, 1994; Madden et al., 2007).

Los patrones espaciales pueden ser agregado (disposición en grupos), disperso (disposición aleatoria) o uniforme (disposición regular). El patrón aleatorio existe cuando las probabilidades de que las plantas estén enfermas son bajas, iguales para todos los individuos e independientes entre sí; mientras que en un patrón espacial agregado, las probabilidades son distintas para cada planta y dependientes entre sí, es decir una planta tiene más probabilidad de estar enferma si está más cercana a otra planta enferma (Campbell y Madden, 1990; Madden et al., 2007).

El análisis de los patrones espaciales permite generar hipótesis sobre los factores que afectan la dinámica de la enfermedad, los mecanismos que operan en la dispersión del patógeno y que subyacen al patrón espacial observado (Madden et al., 2007; Gigot et al., 2017). Esto es útil para desarrollar estrategias de manejo efectivas (Madden et al., 2007; Gigot et al., 2017), diseñar planes de muestro secuencial (Heck et al., 2021c; Heck et al., 2023), puede ofrecer información cuantitativa sobre la dinámica poblacional del patógeno y ser de gran ayuda para el diseño de experimentos epidemiológicos (Gilligan, 1983), desarrollar una metodología de muestreo (planeamiento, tamaño de muestra, forma de recorrido o tipo de unidad de muestreo) y monitoreo del patógeno (Gilligan, 1983; Campbell y Benson, 1994; Bergamin-Filho et al., 2004).

Es posible caracterizar los patrones espaciales por varias técnicas según el tipo de datos y conocimiento del área en estudio. Se pueden emplear variables aleatorias como conteo de propágulos, infecciones u órganos enfermos, donde las unidades de muestreo pueden ser plantas o cuadrantes ('quadrats') dentro del campo. Se puede estudiar la posición de plantas enfermas o sanas dentro de una línea de plantío, conteo de parcelas o cuadrantes en el campo junto a mapeamiento, ajustes de distribuciones discretas de frecuencias, índices de dispersión y grados de autocorrelación espacial entre cuadrantes. El uso de mapas y softwares apropiados puede ayudar a crear líneas isópatas dentro de un área mayor y evidenciar localidades con un mismo nivel de enfermedad, además de poder relacionar

factores ambientales y epidemiológicos (Campbell y Madden, 1990; Bergamin-Filho et al., 2002; Bergamin-Filho et al., 2007).

En la fase inicial de epidemias de enfermedades ocasionadas por patógenos que se diseminan a través del suelo y ocasionan enfermedades vasculares, como lo es Foc y la MF, inicialmente es posible detectar plantas enfermas con distribución al azar, con el tiempo el patógeno se disemina en el campo desde una planta a otra, llegando a tener, la enfermedad, una distribución o patrón espacial agregado, lo que es más común de apreciar en diversas áreas con plátanos y bananos afectados por Foc (Meldrum et al., 2013).

2.7. Características de los análisis espaciales de las epidemias

Existen diversos métodos para el análisis de los patrones espaciales, los que poseen diferentes características, por lo cual Perry et al. (2002) formularon criterios para seleccionar los más adecuados y analizar los atributos espaciales: (i) hacer uso extensivo de técnicas de visualización simples como gráficos y mapas como primer paso para comprender las características espaciales de los datos; (ii) seleccionar métodos estadísticos que estén disponibles y sean apropiados para el tipo de datos; (iii) seleccionar métodos que puedan responder preguntas pertinentes, proporcionar información espacial relevante y tomar en cuenta las características particulares y (iii) teniendo en consideración de que la mayoría de los métodos son distintos y ninguno puede identificar todas las características espaciales de los datos, se deberían emplear varias técnicas distintas para un mejor análisis.

2.7.1. Distribuciones estadísticas para la incidencia de la enfermedad

El análisis del patrón espacial de la enfermedad en fincas puede realizarse con el uso físico o simulado (por programas estadísticos) de subdivisiones del área en cuadrantes ('quadrats') definidos como la unidad de muestreo con dimensiones según la decisión del investigador. En cada unidad de muestreo se determina el número de plantas enfermas y se construye una distribución de frecuencias, dependiendo del número o tamaño de cuadrantes, siendo recomendado emplear distintos tamaños (Bergamin-Filho et al., 2004).

Se determina cuál es la distribución de frecuencia esperada en el caso de que las plantas enfermas en la finca presentasen un patrón espacial al azar. Es posible responder esto partiendo de una distribución binomial (para datos de incidencia) o distribución de Poisson (para conteos o incidencias menores al 20%), con la principal diferencia de que en la primera existe un número limitado posible de plantas enfermas dentro de un cuadrante,

pero en la segunda no existe límite máximo; en ambos casos las dos distribuciones son específicas para los patrones aleatorios. En caso de agregación, las frecuencias observadas se ajustarán a las distribuciones del tipo binomial negativa (datos de conteo) o β - binomial (datos binarios o incidencia) (Madden y Hughes, 1995; Madden et al., 2018).

La distribución binomial es apropiada cuando el estatus sanitario de una planta dentro un cuadrante es independiente al del resto de plantas de esa misma unidad de muestreo, por lo que es adoptada como la distribución referencial para patrones espaciales aleatorios de la incidencia de la enfermedad a escala de unidad muestral. Antes de emplear de la fórmula binomial para estimar la varianza se debe realizar una prueba de bondad de ajuste, como la de χ^2 , para demostrar que la distribución binomial realmente explica la distribución de la frecuencia de la incidencia de la enfermedad observada (Madden et al., 2007).

Cuando las plantas o sus partes presentan similar grado de la enfermedad dentro de una misma unidad de muestreo, la distribución β -binomial describirá mejor la distribución de la frecuencia de plantas enfermas por unidad muestral observada. Entonces, la suposición de que la probabilidad de encontrar un individuo enfermo dentro de la unidad muestral sea constante (como en la distribución binomial) pasa a ser una variable, denotando la probabilidad de que se encuentren Y plantas enfermas dentro de n plantas contenidas en la unidad muestral, lo que describe un patrón agregado (Madden et al., 2007).

A diferencia de la distribución binomial, que presenta un único parámetro (p o la probabilidad de enfermedad esperada), la β -binomial posee dos parámetros: p y θ (una medida de la heterogeneidad en la incidencia de la enfermedad, tal que θ aumenta proporcionalmente el nivel de heterogeneidad o agregación). Un adecuado ajuste a la distribución binomial sugiere un patrón espacial aleatorio, mientras que un buen ajuste de los datos a la distribución β -binomial sugiere un patrón espacial agregado de la incidencia de la enfermedad a nivel de unidad muestral (Gigot et al., 2017).

Adicionalmente, el uso del estadístico de prueba de relación de logaritmos (LRS) para cada conjunto de datos sirve para determinar si la distribución β -binomial explica mejor la distribución de frecuencias observadas de plantas enfermas que la binomial, siendo $LRS = 2 (\ln \Omega_{\beta\text{bin}} - \ln \Omega_{\text{bin}})$; donde $\Omega_{\beta\text{bin}}$ y Ω_{bin} son las funciones de verosimilitud para la distribución β -binomial y binomial, respectivamente. La LRS presenta una distribución de χ^2 con un grado de libertad, con la suposición o hipótesis nula de que la distribución β -

binomial no se ajusta mejor a los datos que la binomial (no hay diferencias entre las funciones de verosimilitud logarítmica) (Sparks et al., 2008; Gigot et al.; 2017).

2.7.2. Índice de dispersión (D)

El índice de dispersión (D) puede ser calculado a partir de la relación entre la varianza y la media del conjunto de datos del área experimental. A partir de estos índices se pueden estimar patrones espaciales regulares ($D < 1$), al azar ($D = 1$) o agregados ($D > 1$), lo que es adecuado para datos de conteo. Sin embargo, según Madden y Hughes (1995), el empleo de índices de dispersión basados en distribuciones de Poisson debe evitarse a partir del uso de datos de incidencia (principalmente mayores a 20%), pues al tratarse de datos binarios, una mejor aproximación a la aleatoriedad se da a partir de la distribución binomial y, por lo tanto, se debe emplear un índice de dispersión distinto. De esta forma, el índice de dispersión es la relación entre la varianza observada y la varianza teórica binomial esperada ($D = \text{varianza observada} / \text{varianza teórica}$), con la forma de la varianza en la distribución binomial: $V_{\text{bin}} = p(1-p) / n$; donde p es la incidencia en el campo o parcela y n el número de plantas por ‘quadrat’ (Bergamin Filho et al., 2004).

2.7.3. Ley de la potencia binaria de Taylor (BPL)

La ley de la potencia binaria de Taylor (BPL) ha sido empleada con el objetivo de caracterizar la heterogeneidad espacial de la incidencia de la enfermedad entre unidades de muestreo a pequeña escala (nivel de cuadrante y menores) como alternativa a la ley de la potencia de Taylor que es empleada para conteos sin límite superior. La BPL considera al logaritmo de la varianza observada como función lineal del logaritmo de la varianza para una suposición de una distribución binomial o patrón aleatorio (Madden et al., 2007).

Madden y Hughes (1992) desarrollaron esta alternativa y caracterizaron la heterogeneidad espacial de la incidencia de la enfermedad o cualquier otra variable con un límite superior a través de un modelo que relaciona dos varianzas definidas, con la forma: $\log(V_{\text{obs}}) = \log(A) + b \cdot \log(V_{\text{bin}})$; siendo indicada la aleatoriedad si $b = 1$ y $A = 1$, resultando que el $\log(V_{\text{obs}}) = \log(V_{\text{bin}})$, es decir que la variancia observada es igual a la variancia binomial. Por otro lado, si $b = 1$ y $A > 1$, el índice D será siempre igual que A para todos los datos, es decir, D no variará con cambios en la incidencia de la enfermedad (p) en una parcela o campo (n). Asimismo, si $b > 1$, el $\log(V_{\text{obs}})$ aumentará debido al $\log(V_{\text{bin}})$ a una razón mayor que V_{bin} , es decir que D variará si la incidencia de la enfermedad (p) en un

campo o parcela (n) varía. A partir de esto, el valor del parámetro b es un indicador de agregación pero que no debe ser analizado sin considerar el valor de A (Madden y Hughes, 1995; Bergamin Filho et al., 2004; Hau et al., 2011; Madden et al., 2018).

2.7.4. Jerarquía espacial

Según Hughes (1997), la forma en que se recogen los datos proporciona información sobre la agregación de la enfermedad en diferentes niveles de jerarquía espacial. Turecheck y McRoberts (2013) señalan que el concepto de escala es muy importante en los estudios de relaciones ecológicas, pero ha sido descuidado en los estudios fitopatológicos pese a su importancia, especialmente en los análisis espaciales de las enfermedades, a pesar de que existen técnicas estadísticas para su consideración. La escala afecta la aparición y ajuste de las observaciones a las distribuciones probabilísticas; esto tiene relación con la heterogeneidad de la incidencia y sus patrones espaciales, por lo que su consideración es importante para la adecuación de los estudios a nivel de campo.

La relación entre la jerarquía espacial y la cuantificación de la intensidad de la enfermedad tiene importancia para lograr un adecuado muestreo de esta, tanto a partir de la incidencia (como evaluaciones a partir de conglomerados de plantas) o por conteos, logrando así que los datos discretos obtenidos y sus distribuciones estadísticas logren representar fehacientemente la intensidad de la enfermedad dentro de las unidades muestrales. Estas últimas pueden ser clasificadas como sanas o enfermas siempre en función de la escala muestral adoptada y llegar a que los datos en conjunto representen una jerarquía espacial (Hughes et al., 1997; Madden et al., 2007).

La probabilidad de que un elemento dentro de la unidad muestral presente enfermedad es denotada como p_{low} y hace referencia a una escala inferior a la unidad muestral. Bajo la hipótesis de que la distribución binomial describe adecuadamente la frecuencia de la incidencia de la enfermedad observada a escala de unidad muestral o cuadrante, la probabilidad de que ninguna planta presente la enfermedad dentro de un cuadrante que contenga n plantas, estará definida por: $\Pr(Y=0) = (1-p_{low})^n$, mientras que la probabilidad de que al menos una planta presente enfermedad dentro del cuadrante estará dada por el complemento de esta última expresión y se referirá a la escala de la misma unidad muestral: $p_{high} = 1 - (1-p_{low})^n$ (Hughes et al., 1997; Madden et al., 2007).

De existir agregación en p_{low} (o dentro de p_{high}), el ploteo del término cero las curvas de ambas probabilidades con los ejes p_{low} y p_{high} resultará con la curva binomial por encima. El tamaño de v será menor cuando el efecto de la agregación sea mayor. El valor de v se puede estimar a partir de la transformación log-log complementaria de las expresiones dadas (Hughes y Gottwald, 1999). Esto es útil para optimizar el muestreo cuando la suposición es el patrón agregado (Madden et al., 2007).

2.7.5. Métodos basados en distancias (SADIE)

Los análisis espaciales por índices de distancia (SADIE) son una alternativa a los métodos basados en autocorrelación espacial y semivarianza de los análisis por mapeo espacial intensivo y han sido empleados para análisis espaciales de mayor escala, logrando un enfoque geoestadístico al trabajar con las posiciones relativas o localización de las unidades de muestreo ('quadrats') y el número de individuos enfermos por unidad muestral, con el objetivo de analizar el arreglo espacial en función de la cuantificación de la distancia a la regularidad (D_r). Esta última indica la distancia mínima total que deberían "recorrer" los individuos o plantas enfermas a partir del punto inicial definido por las observaciones iniciales hasta un punto final en donde se encuentre el mismo número de plantas enfermas en cada unidad muestral, es decir, en donde el patrón de las observaciones encontradas será lo más regular posible para cada unidad muestral, logrando caracterizar así el grado de no aleatoriedad y el grado de agregación como proporcional a la distancia a la regularidad (Perry et al., 1999; Madden et al., 2007; Gigot et al., 2017). En otros análisis de los patrones espaciales, como el basado en cuadrantes, los eventos son definidos como observaciones de plantas enfermas o densidad poblacional del patógeno, pero en los métodos que emplean distancias, los análisis se basan en intervalos de espacio (distancias) entre los eventos considerados (Madden et al., 2007).

2.8. Características y manejo del cultivo en relación con la intensidad de la enfermedad

El manejo del cultivo puede afectar el desarrollo epidemiológico de la marchitez por *Fusarium* en plátanos y bananos (Dita et al., 2018); sin embargo, existen muy pocos estudios publicados sobre la relación entre intensidad de enfermedades de musáceas y prácticas agrícolas en el Perú (Román-Jerí, 2012). En China, el cultivo intercalado y la rotación con cebolla china (*Allium* spp.) redujeron significativamente la MF (Zhang et al., 2013). En Brasil se ha reportado que el uso de cultivares mixtos reduce la intensidad y

severidad de la Sigatoka en bananos (Gonçalves et al., 2008). Karangwa et al. (2016), indicaron que, en estudios de sistemas de subsistencia en países del este de África, existió asociación significativa entre la incidencia de la MF y la altitud, edad de plantación y cultivares empleados, y encontraron una relación directa entre la edad de plantación y la incidencia de la enfermedad.

En el Perú, Román-Jerí (2012) evaluó la distribución e hizo el primer reporte de la cuantificación de la MF, determinó su intensidad y la relación de esta con las características de los sistemas de producción en la región de la Selva Central del Perú en el distrito de San Luis de Shuaro, provincia de Chanchamayo, Junín. Caracterizó los sistemas de producción locales y detectó posibles factores influyentes en la epidemiología de la MF. Encontró intensidades entre 0.15 y 19.74% para la región, atribuyó las diferencias al sistema de producción y uso de variedades, con la variedad Isla como más afectada. Adicionalmente, comparó esta intensidad con la reportada en la variedad Gros Michel en Nicaragua y en Costa Rica, de 16 y 7.31%, respectivamente, indicando que lo determinado se encontraba en un valor dentro de los límites de agresividad de Foc previo al desarrollo de una epidemia.

Fuentes (2014), utilizó herramientas SIG y otros análisis estadísticos, analizó la distribución espacial de la MF en la misma región de la Selva Central de Perú y con los mismos datos. No logró demostrar existencia de autocorrelación espacial para la incidencia de la enfermedad y concluyó una distribución aleatoria, pero sugirió un análisis de espacial a nivel de finca (como el realizado en el presente trabajo) y a diferentes escalas. Adicionalmente, encontró que las variables que mejor explicaron las diferencias de incidencia fueron pH de suelo, altitud, densidad de plantación e índice de calidad de suelo.

2.9. Estimación de pérdidas ocasionadas

El manejo de enfermedades busca evitar llegar al nivel de daño económico, por lo que la cuantificación de daños causados por las enfermedades de plantas es un factor esencial para su eficiencia, siendo una condición para el desarrollo de cualquier programa de manejo y control de enfermedades. Sin embargo, las estimaciones pueden ser muy variables y tener un elevado margen de error. Es posible estimar el daño o pérdidas asociadas a una enfermedad mediante el análisis de las relaciones entre intensidad y daño a través de modelos de punto crítico, múltiples puntos, integrales, de superficie de respuesta y modelos sinecológicos. Independientemente del método utilizado, se busca obtener una

relación entre variables dependientes (producción o daño) e independiente (enfermedad) (Teng, 1985; Bergamin-Filho y Amorim, 1996; De Jesus Junior, 2004).

Si bien existen muchos ejemplos favorables con el uso de modelos que consideran la relación entre intensidad y daño, muchas veces se torna una tarea complicada, pues los parámetros como producción máxima variarán entre campos de una localidad específica, siendo influenciados por factores ambientales, labores de campo, época de infección, etc. Por esto, los modelos mencionados servirán para el pasado vivido y en un local específico, en donde se realizó y evaluó el ensayo. Sin embargo, existen otros abordajes tomando en cuenta modelos mecanísticos, considerando parámetros específicos (Bergamin-Filho y Amorim, 1996; De Jesus Junior, 2004).

Madden et al. (2007) indican al rendimiento (W) como una función (lineal o no lineal) de la epidemia de la enfermedad, siendo posible caracterizar una población de plantas, campo o parcela con este parámetro W y con la pérdida del rendimiento (L) que puede ser definida mediante la comparación con otra población, campo o parcela sin la enfermedad o alguna con un bajo nivel de su intensidad. La ecuación de la función podría referirse como un modelo de pérdida de rendimiento. Adicionalmente, es pertinente el uso de opiniones de expertos o estadísticas para la obtención de datos informativos necesarios, de no existir la posibilidad de obtenerlos de forma directa, especialmente en áreas o zonas en donde no se han realizado estudios relacionados y donde son necesarios. No existen datos acerca de la cuantificación de daños y pérdidas ocasionadas por la MF en el Perú.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Fincas evaluadas

Se realizó un estudio observacional y análisis exploratorio. Se evaluaron inicialmente 189 fincas productoras de plátanos y bananos en el Perú, distribuidas en 199.47 ha en los departamentos o zonas de Cajamarca ($n = 15$), Amazonas ($n = 37$), Junín ($n = 46$), Cusco ($n = 31$), Madre de Dios ($n = 16$) y San Martín-Loreto ($n = 44$), entre los meses de abril y octubre del 2022 (Figura 1). Se analizaron los datos de la incidencia de la MF en los campos con ocurrencia natural de la enfermedad ($N = 53$; 52.32 ha) (Figura 12a y Tablas 1,2 y 3). Estas fincas fueron agrupadas según su localización geográfica: Cajamarca (CAJ; $n = 4$), Amazonas (AMA; $n = 13$), Cusco (CUS; $n = 9$), Junín (JUN; $n = 25$), San Martín-Loreto (SML; $n = 2$), e incluyeron las variedades Seda (Gros Michel, AAA; $n = 23$), Isla (Iholena, AAB; $n = 21$) y mixtura de variedades (plátanos que nunca presentaron síntomas y las variedades sintomáticas comúnmente encontradas; $n = 6$) y otras (Manzano, Silk, AAB o Rojo, Red, AAA; $n = 3$). Se evaluó cada finca junto a sus propietarios, a quienes se les encuestó sobre el manejo del cultivo y conocimiento y manejo de la MF.

Se georreferenció el perímetro de cada finca evaluada y se tomó datos de la densidad de plantación y/o espaciamento entre plantas. Se obtuvieron datos climáticos de temperatura anual media, precipitación anual media y otros, de cada localidad a partir del portal de NASA POWER (National Aeronautics and Space Administration Prediction of Worldwide Energy Resource, Washington DC) y/o de forma directa de la estación meteorológica más cercana del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), para el período desde enero de 1991 a diciembre del 2021 (30 años).

3.2. Evaluación de la marchitez por *Fusarium* (MF) en plátanos y bananos

Se evaluó visualmente todas las plantas de cada finca (censo) para los síntomas externos típicos y los que generaron sospecha de la MF: amarillamiento de las hojas adultas, colapso de la base del pecíolo y caída de estas en forma de falda, ruptura y/o rajadura y desecación de la parte basal del pseudotallo (Cordeiro et al., 2005; Dita et al., 2021). Se confirmó la sintomatología con los síntomas internos típicos de la enfermedad: decoloración y/o necrosis del tejido vascular de forma continua, formación de “bolsas” en el tejido vascular, para lo cual se realizó un corte en el pseudotallo a modo de ventana (5 cm x 10 cm aproximadamente) y se extrajo parte del tejido xilemático (aproximadamente 3 vainas) (Beckman, 1993; Carlier et al., 2002; Dita et al., 2021), se secó con papel toalla y se guardó en sobre de papel cerrado en refrigeración. Se aisló en PDA (cultivo monospórico) y se visualizó la morfología del hongo (Leslie y Summerell, 2008). Se consideró toda la mata enferma y se georreferenció con un GPS manual (GPSMAP®66SR, Garmin) cuando la planta madre y/o hijos presentaron ambos síntomas (mapeo intensivo) (Madden et al., 2007).

3.3. Cuantificación de la intensidad de la MF en plátanos y bananos

Se cuantificó la intensidad de la enfermedad a nivel regional y de finca y se comparó entre regiones y cultivares. Para lo cual se estimó la prevalencia de la enfermedad mediante el porcentaje de fincas con presencia de al menos una planta con síntomas de la MF del total de fincas evaluadas por departamento o región (Campbell y Madden, 1990). Se comparó la prevalencia entre regiones por la prueba de bondad de ajuste de χ^2 y se determinó la dependencia entre la prevalencia, región y/o variedad por la prueba de asociación de χ^2 de Pearson. Se determinó el nivel de asociación a través de la cuantificación del coeficiente de contingencia o de V de Cramer. Adicionalmente, se cuantificó la incidencia de la MF (%) con la fórmula: $\bar{y} = y_i / n_i$, donde y_i fue el número de plantas enfermas en cada finca y n_i el número total de plantas evaluadas en la *i-ésima* finca (Madden et al., 2007). Los datos de incidencia fueron sometidos a las pruebas de Shapiro-Wilk, Bartlett y Levene; luego, transformados a la forma $\log(x)$, previo al análisis de varianza (ANOVA) y/o Kruskal-Wallis. Esto se realizó con el paquete *stats* del software R versión 4.2.1. Finalmente se mostraron los valores de incidencia como el porcentaje (%) de plantas enfermas del total de plantas evaluadas.

3.4. Características del manejo del cultivo

Se evaluó cada finca junto a cada uno de sus propietarios y se realizaron encuestas sobre el manejo de material de siembra, manejo del cultivo, características del sistema de producción y conocimiento sobre la enfermedad (Anexo 1). Debido a la gran cantidad de datos y respuestas, estas se definieron y agruparon por factores categorizados según indicaciones de Savary et al. (1995) para variables y datos cualitativos.

3.5. Análisis espacial de la incidencia de la MF

Se utilizaron los datos de coordenadas geográficas correspondientes a los polígonos que delimitaron cada finca evaluada y a las plantas enfermas de cada una de las fincas. Se emplearon ambos conjuntos de datos para los análisis espaciales en cada finca. Se realizaron dos tipos de análisis espaciales: uno basado en cuadrantes (menor escala) y otro basado en distancias (geoestadística) (mayor escala). Se utilizaron los conjuntos de datos de los polígonos y plantas enfermas para elaborar mapas con la distribución espacial de las plantas enfermas, para lo cual se utilizó la función *chull()* del paquete *R4PDE* del software R versión 4.2.1 (Del Ponte, 2023).

3.5.1. Análisis de los patrones espaciales a nivel de unidad muestral o a menor escala (basados en cuadrantes)

Los mapas de incidencia provenientes de los datos georreferenciados se transformaron en cuadrantes con la función *quadratcount* del paquete *spatstat* del software R (Baddeley y Turner 2005), para esto se empleó el número de plantas por finca, densidad y/o arreglo de la plantación y las coordenadas geográficas obtenidas para cada finca. Los análisis espaciales se realizaron con el número de plantas enfermas en cada cuadrante.

a. Análisis de jerarquía espacial

Se determinó el tamaño adecuado del cuadrante para los análisis en función del tamaño efectivo de muestreo (Madden y Hughes, 1999; Madden et al., 2007). Se analizaron tres niveles jerárquicos del número estimado de plantas contenido en los cuadrantes: 2 x 2 (mínimo), 4 x 4 y 6 x 6 (máximo), en función de la probabilidad de que una unidad muestral (cuadrante) contenga al menos una planta enferma (p_{low}) o sea considerada como enferma (p_{high}) mediante la relación: $p_{high} = 1 - (1 - p_{low})^v$ (Hughes y Gottwald, 1999), la que se transformó a la forma complementaria log-log (CLL). Luego se estimó el valor de v

como el tamaño de muestra efectivo a través de la caracterización de las curvas β -binomiales para determinar la agregación dentro del cuadrante. Este análisis se realizó con la función *spatial_hier* del paquete *epiphy* del software R (Gigot, 2018).

b. Índice de dispersión

Se calculó el índice de dispersión (D) de los datos binomiales para la incidencia de la MF en cada parcela evaluada a partir de la relación entre la varianza estimada para la suposición de la distribución binomial y la varianza observada (Madden y Hughes, 1995), siendo s^2/s_{bin}^2 , donde $s_{bin}^2 = p(1-p)/n$ y n fue el tamaño efectivo de la unidad de muestreo o cuadrante. El valor de $D < 1$ indicó un patrón espacial regular; $D = 1$, un patrón aleatorio; y $D > 1$, un patrón agregado. Luego, se comprobó o no la igualdad del índice de dispersión a la unidad ($D = 1$) o un patrón randomizado mediante la prueba de χ^2 con $N - 1$ grados de libertad, donde N fue el número de unidades muestrales en cada finca. En este análisis se empleó la función *agg_index* del paquete *epiphy* (Gigot, 2018).

c. Ajuste a distribuciones

Se realizó el ajuste a las distribuciones binomial y/o β -binomial para patrones espaciales aleatorios o agregados, respectivamente (Madden y Hughes, 1995). Se estimaron los parámetros de los modelos mediante el método de *maximum likelihood* a partir de los datos de incidencia de la MF en cada finca, para lo cual se empleó el tamaño efectivo del cuadrante de 2 x 2 o 4 plantas. Se realizó la prueba de bondad de ajuste de χ^2 para estas dos distribuciones y la prueba de la razón logarítmica de verosimilitud (LRS) (*Likelihood ratio test*) para comprobar si la distribución β -binomial explicó mejor la frecuencia observada (Gigot et al., 2017; Sparks et al, 2008). Siendo el estadístico $LRS = 2(\ln L_{\beta-bin} - \ln L_{bin})$, donde $L_{\beta-bin}$ y L_{bin} fueron la función *likelihood* para la distribución β -binomial y binomial, respectivamente. El estadístico LRS tuvo una distribución χ^2 con un grado de libertad, bajo la hipótesis nula de inexistencia de diferencias entre los dos *log-likelihoods*, es decir que la distribución β -binomial no explicó mejor la distribución de los datos que la binomial (Gigot et al., 2017). Este análisis se realizó con las funciones *fit_two_distr*, *gof* y *llr* del paquete *epiphy* del software R (Gigot, 2018).

3.5.2. Análisis de los patrones espaciales a nivel de finca o mayor escala

a. Análisis espaciales basados en índices de distancias (SADIE)

Se calculó la distancia a la regularidad (D_r) con los datos de georreferencia de los cuadrantes previamente obtenidos para cada finca, sus posiciones relativas y el número de plantas enfermas por cuadrante. Se empleó un algoritmo iterativo para “desplazar” las ubicaciones observadas de cada cuadrante hasta la disposición regular en el campo y se calculó la distancia entre la posición observada inicial y final en cada finca (Perry et al., 1996). Se calculó el índice de agregación (I_a) definido como la relación entre la distancia recorrida hasta lograr el patrón regular para los datos observados (D_r) y la distancia media a la regularidad para muestras aleatorias a partir de la distancia promedio a la regularidad de puntos permutados aleatoriamente (E_p), siendo: $I_a = D_r / E_p$, donde $I_a > 1$ indica un patrón agregado, $I_a = 0$ un patrón aleatorio e $I_a < 1$, un patrón regular (Li et al., 2012). Se evaluó la significancia del I_a diferente de 1 con una prueba de aleatoriedad espacial (200 permutaciones) (P_a). Esto se realizó con la función *sadie* del paquete *epiphy* (Gigot, 2018).

Adicionalmente, se realizó el análisis MAPCOMParison basado en el cálculo de una distancia formal (la distancia *Hellinger*) entre el mapa de densidad de conteo de plantas sintomáticas en cada unidad muestral y el mapa de densidad del esfuerzo de muestreo (Lavigne et al., 2010). Esto, con el objetivo de evitar el sesgo de los otros métodos, como por cercanía a los bordes, forma o tamaño de focos, etc., y comprobar la hipótesis nula de homogeneidad espacial con mayor eficiencia (Xu y Madden, 2005). Este análisis, el mapeo explícito de focos, su heterogeneidad y la relación entre estos, se realizó con la función *mapcomp* del paquete *epiphy* del software R (Gigot, 2018). Adicionalmente, se compararon los mapas de la MF y las características de algunas fincas.

b. Semivarianza

Con los datos de georreferencia de los cuadrantes previamente obtenidos para cada finca, se realizó el variograma empírico o experimental. Se escogieron los datos de partida para los parámetros del semivariograma con la función *eyefit* del paquete *geoR* (Diggle y Ribeiro, 2007). Se realizó el ajuste al modelo adecuado y se determinaron la semivarianza y los parámetros nugget, meseta y rango práctico con la función *variofit*. Se compararon los parámetros de rango práctico del modelo esférico entre fincas. Estos análisis se realizaron con las funciones mencionadas del paquete *geoR* del software R Studio (Diggle

y Ribeiro, 2007) y el software GS⁺ Version 10.0 (Geostatistic for the Environmental Science, Gamma Design Software).

3.6. Análisis de concordancia

Las fincas evaluadas fueron clasificadas como de patrón agregado o aleatorio, según lo indicado por cada uno de los seis (06) métodos analíticos empleados. Se compararon los resultados entre distintos métodos y se determinaron las coincidencias múltiples por pares de métodos y de forma general por todos los métodos. Se realizó la prueba de kappa de Cohen y la prueba de kappa de Fleiss para determinar un acuerdo por pares y de forma general entre todos los métodos, esto se realizó con la funciones *kappa2* y *kappam.fleiss* del paquete *irr* del software R, respectivamente.

3.7. Ley de la potencia binaria de Taylor (BPL)

Se empleó la Ley de la Potencia Binaria de Taylor (BPL) para evaluar la relación entre la varianza observada y la de una suposición para la distribución binomial de la incidencia de la MF empleando cuadrantes de tamaño efectivo (2 x 2), buscando resumir la información y caracterizar la heterogeneidad espacial de diferentes conjuntos de datos (distintas fincas) y la influencia de factores categorizados a escala de unidad muestral (Madden et al., 2018). Se analizó la ecuación de la forma binaria de la ley de la potencia de Taylor: $\log_e(s^2_y) = \log_e(A_p) + b \log_e(s^2_{bin})$, donde s^2_y fue la variancia observada y s^2_{bin} fue la variancia para una distribución binomial. Adicionalmente, se estimaron los valores de A_p y b , que fueron los parámetros de la regresión lineal. Se usó la prueba *t* de Welch para verificar la hipótesis nula de una distribución binomial o patrón aleatorio: $A_p = 1$ o $\log_e(A_p) = 0$ y $b = 1$ (Madden et al., 2018; Heck et al., 2021c).

Se categorizaron los diferentes factores (Savary et al., 1995): variedad (Seda, Isla, Mix y otras), sistema (monocultivo o asociado), manejo del material de siembra (menor, moderado o mayor), conocimiento sobre la MF (menor, moderado o mayor), intensidad de manejo del cultivo (menor, moderado o mayor), edad de la plantación (menor o mayor que 2 años), daños por *Cosmopolites sordidus* (CS) (menor o mayor que 9.5 galerías por cormo en promedio) (Dassou et al., 2015), temperatura climática anual media (menor o mayor que 20 °C), precipitación climática anual media (menor o mayor que 1100 mm), altitud (menor o mayor que 900 msnm), que fueron incluidos en el conjunto de datos. En cada caso se realizó una prueba de *t* modificada por Welch para comparar los parámetros

estimados del modelo frente a los esperados para una distribución binomial y entre los parámetros obtenidos para las distintas categorías de un mismo factor. Para este análisis se crearon funciones propias empleando los paquetes *epiphy*, *ggsci* y *ggplot* del software R.

3.8. Determinación de los factores de manejo cultural que afectan la intensidad y distribución espacial de la MF

Se determinó la influencia del manejo y características del cultivo sobre la incidencia y distribución espacial de la MF con el uso del análisis de correspondencias múltiples (MCA) empleando variables cuantitativas suplementarias. Adicionalmente, se buscó entender los factores cuantitativos relacionados a la intensidad y patrón espacial de la MF, para lo cual se emplearon los datos de clima (temperatura, precipitaciones, humedad relativa, viento), daños por CS, altitud, frecuencia de aplicaciones químicas, edad de plantación, longevidad máxima de cultivo e intensidad de agregación (D e I_a), que fueron empleados junto a variables cualitativas suplementarias en el análisis de componentes principales (PCA). Ambos análisis se realizaron con los paquetes *factominer* y *factoextra* del software R (Husson et al., 2018).

3.9. Estimación de pérdidas relacionadas con la MF en plátanos y bananos

Debido a las características de los sistemas evaluados, inexistencia y necesidad de datos relacionados, se estimaron las pérdidas a escala regional según la metodología empleada en otros estudios bajo condiciones similares (Szyniszewska et al., 2017; Scheerer et al., 2018; Heck et al., 2021a), siguiendo indicaciones de Campbell y Madden (1990) y opiniones de expertos (Dita, 2022; Garret, 2022; comunicaciones directas) (Madden et al., 2007). Se estimaron las pérdidas (L) por hectárea y por cada campo evaluado mediante la ecuación: $L = W * \dot{p}$; donde W fue la producción o rendimiento real por año (toneladas por hectárea y por año) y \dot{p} fue la incidencia estimada (en proporción). El rendimiento real fue el rendimiento promedio de la región o zona en el que se ubicó el campo evaluado. La pérdida económica se calculó como $L (\$/.) = L * \dot{P}$; donde \dot{P} fue el precio promedio en chacra ($\$/.$). Los precios mensuales fueron obtenidos de los datos estadísticos del Sistema Integrado de Información Agraria del MIDAGRI (<https://siea.midagri.gob.pe/>) y de los boletines anuales de la misma entidad. Se determinó la relación entre pérdida de rendimiento e incidencia de la MF mediante el análisis de regresión: $L = \beta_0 + \beta_1 * \dot{p}$; donde β_0 y β_1 fueron los parámetros de regresión. Los análisis se realizaron con el software R.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Fincas evaluadas

Se evaluó visualmente 213005 plantas de plátanos y bananos en 189 fincas (199.47 ha), de las cuales 978 plantas presentaron síntomas internos y externos de la marchitez por *Fusarium* (MF) y estuvieron distribuidas en 53 fincas (52.32 ha). Estas últimas fueron analizadas en cinco (05) regiones localizadas entre las latitudes: -12.785974 y -5.343832, longitudes: -78.805694 y -72.565773 y elevaciones en el rango de 132 en SML y 1505 msnm en JUN (Chanchamayo) (Figura 1). Las plantaciones de musáceas estuvieron asociadas con otros cultivos o en monocultivo, algunas veces en mixtura de variedades y en diversos paisajes (Figura 2). El área de las fincas varió entre 0.3 y 2 ha, mientras que la edad de plantación varió entre 6 y 130 meses.

Según los datos del MIDAGRI, la participación de las regiones estudiadas en la producción y área sembrada nacionales de plátanos y bananos el año 2022 fue: CAJ, 1.89 % y 3.6 %; AMA, 4.89 % y 6.74 %; JUN, 9.12 % y 10.64 %; CUS, 1.19 % y 1.94 %; MDD, 1.5 % y 1.7 %; SML, 20.09 % y 21.8 %. De forma global, estas regiones representaron el 38.68 % de la producción nacional y el 46.24 % del área total de musáceas cultivadas.

4.2. Evaluación de la marchitez por *Fusarium* (MF) en plátanos y bananos

Se visualizó junto a los propietarios de cada finca las variedades Isla, Seda, Manzano, Guineo Rojo o Morado con síntomas externos típicos de la MF, los que fueron variables, pero esto se confirmó con la sintomatología interna típica de la enfermedad (Figura 3). La importancia de realizar la visualización de síntomas internos frente a cualquier sospecha o en la población circundante a una planta con síntomas confirmados descansa sobre la base de que las musáceas tienen una capacidad vascular mayor a su necesidad fisiológica, lo que se traduce en la aparición de síntomas externos tardíamente (Beckman, 1990) y un período de latencia que puede durar muchos meses (Dita et al., 2018). Los síntomas visualizados tuvieron concordancia con los reportados para la MF y los ocasionados por hongos asociados con la enfermedad (Plotez, 2015; Maryani et al., 2019; Santos et al., 2022).

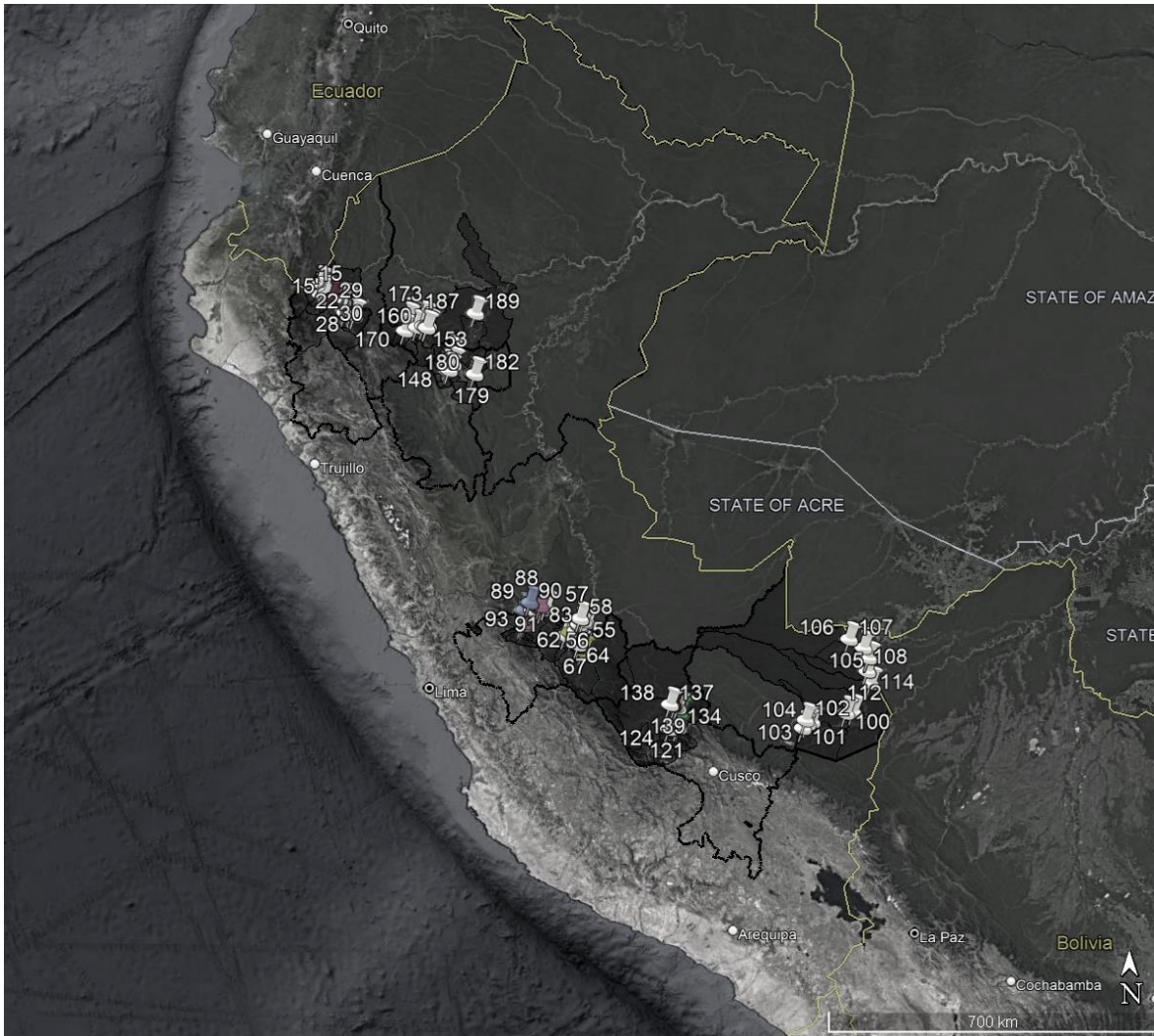


Figura 1: Localización de las 189 fincas inicialmente evaluadas en 07 regiones, 15 provincias y 39 distritos en la Selva peruana

Nota: La mayoría de las fincas no presentaron plantas sintomáticas por la MF (puntos de color blanco). Las provincias en donde se ubicaron las fincas evaluadas están sombreadas de color más oscuro.

La visualización de plantas sintomáticas por la MF es el aspecto esencial para el estudio de las epidemias de la MF y su dinámica. La MF es considerada “policíclica” al poder darse múltiples ciclos de la enfermedad en una plantación (Pegg et al., 2019; Ploetz, 2015). El período de latencia depende de factores relacionados al triángulo de la enfermedad: resistencia y estatus fisiológico del hospedante, densidad de inóculo y virulencia de Foc, condiciones ambientales, entre otros. La comprensión de estos factores y sus interacciones epidemiológicas es crucial para evitar la propagación del patógeno y desarrollo de las epidemias, teniendo como eje central la distinción de plantas enfermas para iniciar las acciones de control, estimar la distribución y cuantificar el inóculo en suelo, ejecutar análisis espaciales y/o temporales, etc. (Pegg et al., 2019; Ploetz, 2015).



Figura 2: Fincas evaluadas para la marchitez por *Fusarium* (MF) de plátanos y bananos en diferentes regiones, sistemas de producción y paisajes

Nota: Fincas en asociación con (a) cítricos en San Ramón (Marankiari) – Junín, (b) papayo en Bagua - Amazonas, (c) copoazú en Yurimaguas – Loreto, (d) café en San Ignacio – Amazonas y en monocultivo (e) en Junín, (f) de la variedad Isla en San Martín, (g) en Bagua – Amazonas y (h) San Martín.



Figura 3: Síntomas externos e internos típicos de la marchitez por *Fusarium* (MF)

Nota: Se muestra (a, b) el síndrome de la marchitez, amarillamiento y decaimiento de las hojas más viejas y disposición de estas a manera de falda hawaiana por doblado del peciolo; (c) corte a modo de ventana para confirmar la sintomatología interna en los haces vasculares del xilema, (d) vista lateral del tejido extraído del pseudotallo con necrosis continua del xilema, (e) corte del pseudotallo a modo de ventana en una planta sana y (f) síntomas internos de necrosis vascular de xilema y decoloración amarillenta a nivel de cormo.

Hubo diferencias en la edad de plantas con síntomas (varió entre 7 y 96 meses), variedad y estado fenológico del cultivo, en algunos casos los síntomas se apreciaron en las plantas hijas o solo madres, la severidad de estos fue variable y en ciertas ocasiones se presentó la rajadura del pseudotallo. Muchas veces la sintomatología de la MF estuvo asociada con síntomas de otras enfermedades como pudriciones blandas (Figura 4).

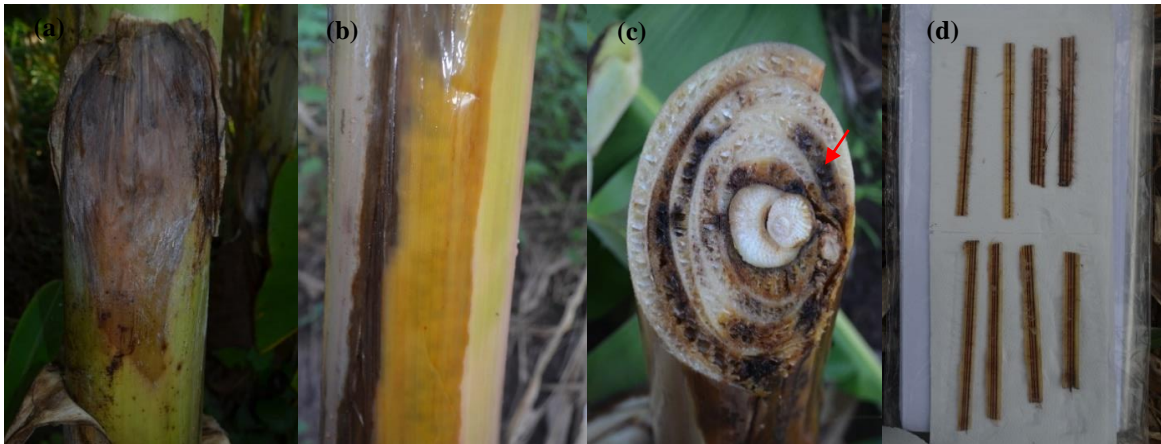


Figura 4: Planta con síntomas de la marchitez por *Fusarium* (MF) y con pudriciones blandas

Nota: Planta con (a, b y c) síntomas externos de la MF y confirmación de la enfermedad por (c) los síntomas internos de los haces vasculares con formación de bolsillos oscuros a nivel de xilema y (d) necrosis continua del xilema.

Algunas veces los síntomas foliares no fueron evidentes debido a prácticas agrícolas como el deshoje, pero cualquier síntoma o situación que generó sospecha fue confirmado con la sintomatología interna de necrosis y decoloración continua de los haces vasculares (xilema) y formación de bolsas o bolsillos gomosos de coloración púrpura, marrón o muy oscuras ('gum pockets') a vista transversal del pseudotallo (De Beer et al., 1999) (Figura 5).



Figura 5: Planta de la variedad Isla en Bagua – Amazonas afectada por la MF pero aparentemente sana

Nota: Planta (a) sin evidentes síntomas foliares debido al deshoje, (b) pero con rajadura del pseudotallo y (c, d) evidentes síntomas internos de necrosis y decoloración de los haces vasculares (xilema).

Los aislamientos obtenidos a partir de tejido de xilema con síntomas de necrosis y decoloración vascular continuas presentaron características culturales y morfológicas sobre medio PDA propias del género *Fusarium*. Las características culturales fueron variables, normalmente rosadas, rojizas o púrpuras con diferentes tonalidades, más o menos oscuras (Figura 6). Las características y tamaño de las estructuras morfológicas permitieron la aproximación a patógenos de *Fusarium oxysporum* asociados a los síntomas descritos, al observarse macroconidias con células “pie”, microconidas dispersas o agrupadas desde falsas cabezas en microconidióforos o monofiálides y clamidoporas (Figura 7) (Leslie y Summerell, 2006; Maryani et al., 2019).

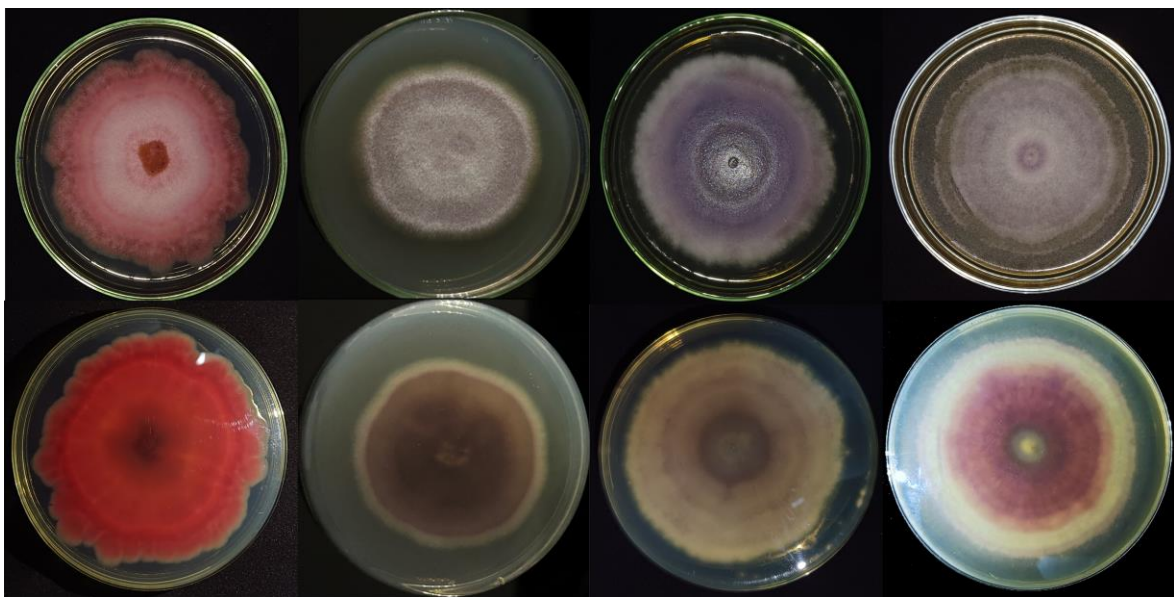


Figura 6: Características culturales de hongos aislados del xilema de plátanos y/o bananos con síntomas de la MF

Nota: Aislamiento obtenidos de las variedades (a) Isla ‘Iholena’, (b,c) Manzano ‘Silk’ y (d) Seda ‘Gros Michel’ creciendo sobre medio PDA y relacionadas a *Fusarium oxysporum*. Se muestran las placas en vistas de anverso (superior) y reverso (inferior).

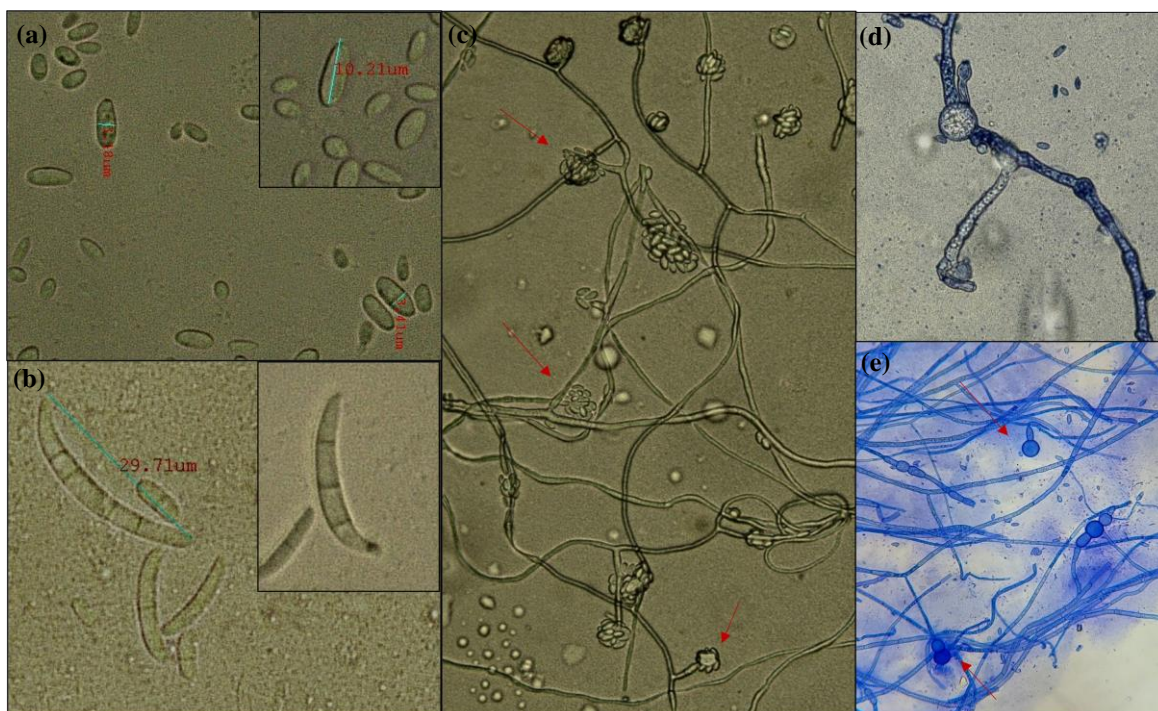


Figura 7: Características morfológicas de hongos aislados del xilema de plátanos y bananos afectados por la MF

Nota: Se muestran las estructuras relacionadas a *Fusarium oxysporum*: (a) microconidas, (b) macroconidas con células “pie”, (c) microconidas a partir de fiálides en falsas cabezas y (d, e) clamidosporas.

4.3. Prevalencia de la MF

De las 189 fincas evaluadas (Figura 1), 53 presentaron al menos una planta con síntomas de la marchitez por *Fusarium* (MF) (Figura 12a, Tablas 1, 2 y 3), las que representaron la prevalencia global del 28.04 %, como se observa en la Figura 8. La prevalencia de la MF (%) a nivel regional difirió estadísticamente entre zonas estudiadas ($\chi^2 = 84.248$; $\chi^2_{(0.05, 5gl)} = 11.0705$; $p < 2.2e-16$); asimismo, la región JUN presentó la mayor prevalencia de la enfermedad con 25 de 45 fincas evaluadas (55.56 %) y tuvo el mayor aporte para este parámetro (Figura 9a); luego, AMA con 13 de 37 campos evaluados (35.14 %). Siguieron las regiones de CUS con 9 de 31 fincas (29.03 %) y CAJ con 4 de 16 fincas (25 %). La zona SML presentó 2 fincas de un total de 44 evaluadas (4.55 %), y el aporte a las diferencias entre regiones fue dirigido a menores valores de prevalencia. Finalmente, en la región MDD no se encontraron fincas con plantas afectadas por la MF en ninguna de las 16 fincas evaluadas.

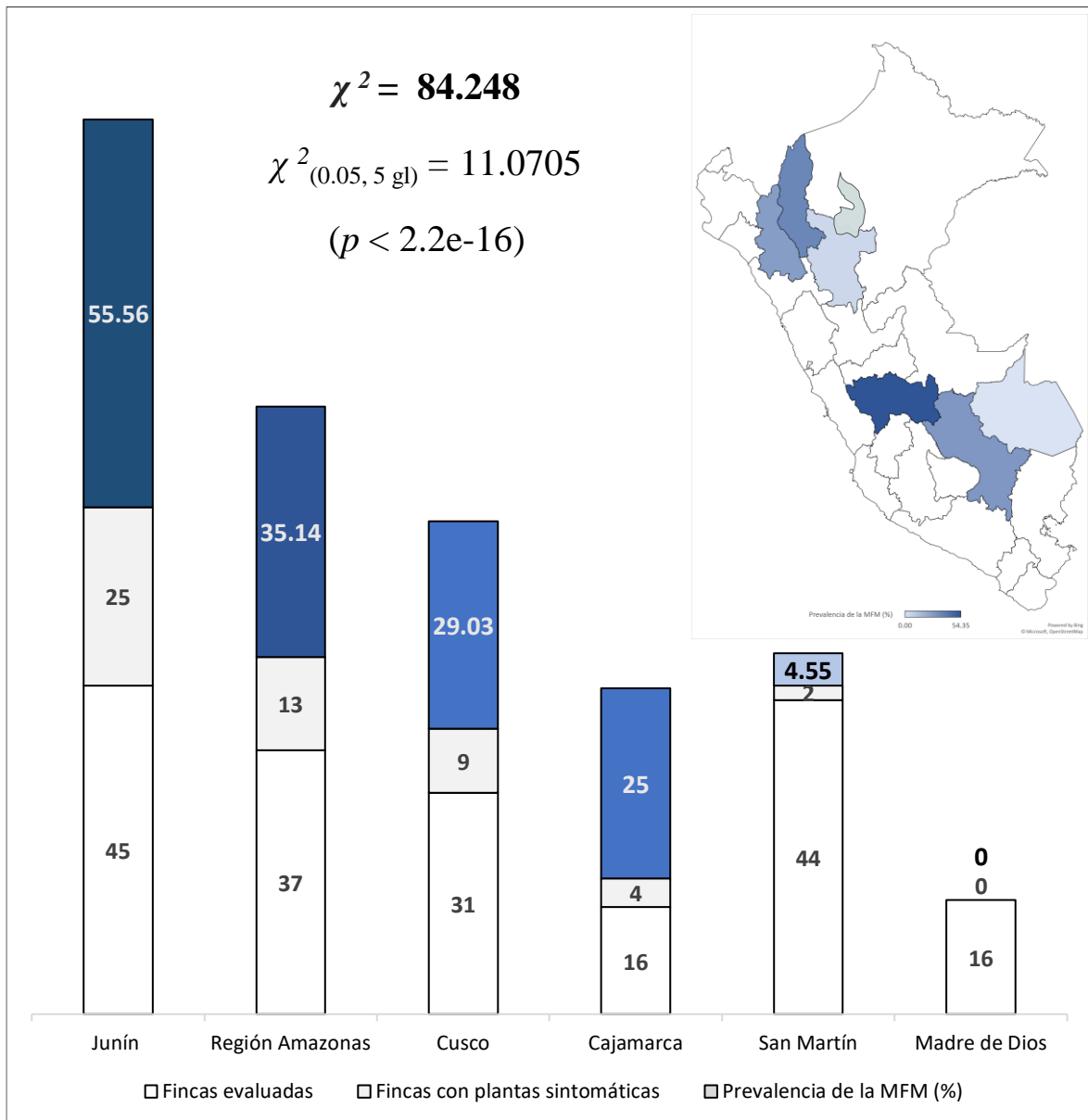


Figura 8: Número de campos evaluados (base), campos con fincas con plantas sintomáticas (centro) y prevalencia (%) de la MF (superior) de las zonas evaluadas de Perú

Nota: Se muestran los valores de χ^2 y significancia obtenidos de la prueba de bondad de ajuste de χ^2 .

La Figura 9 indica que la prevalencia de la MF (%) tuvo asociación significativa con determinadas localidades ($\chi^2 = 35.00028$; $\chi^2_{(0.05, 5 \text{ gl})} = 11.0705$; $p < 1.504e-06$), además que la asociación entre prevalencia y región fue moderada (Cramer's V = 0.43). Las fincas localizadas en JUN tuvieron, estadísticamente, mayor probabilidad de presentar plantas afectadas por la MF, pues presentó asociación significativa con la prevalencia de la enfermedad. La asociación fue mayor en las zonas que presentaron mayor incidencia promedio de la MF, considerando las fincas que presentaron plantas sintomáticas. La región SML presentó asociación estadísticamente negativa con la prevalencia de la MF.

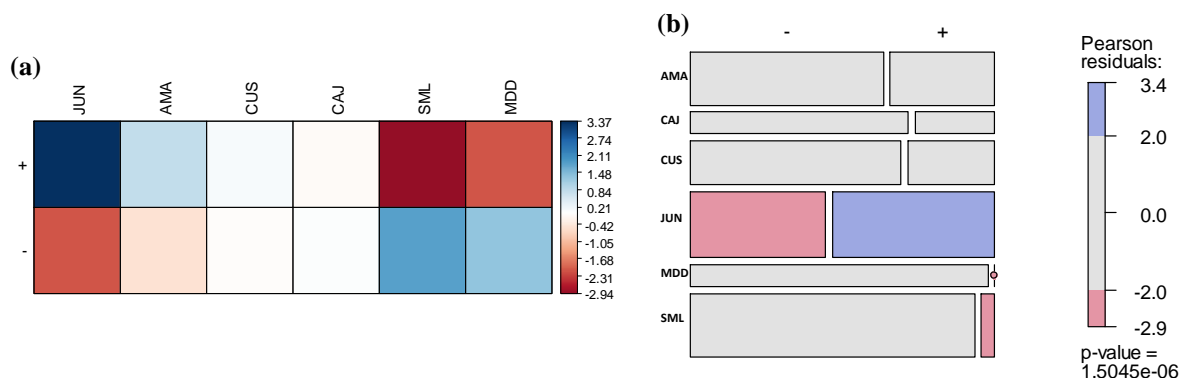


Figura 9: (a) Contribución de cada zona evaluada a la dependencia con la probabilidad de prevalencia de la MF y (b) asociación significativa entre zonas con la de prevalencia de la MF en plátanos y bananos

Nota: Se comparan los residuales entre el valor observado y esperado de la prueba de χ^2 . Los datos fueron a partir de evaluaciones en 189 fincas.

El uso de determinadas variedades estuvo significativamente asociado con la prevalencia de la MF (%) ($\chi^2 = 63.10123$; $\chi^2_{(0.05, 8gl)} = 15.50731$; $p < 1.14425e-10$) y dicho parámetro tuvo dependencia alta a moderada con la variedad empleada (Cramer's V = 0.578) (Figura 10). Solo se encontraron plantas sintomáticas pertenecientes a las variedades Isla (Iholena, AAB) (21/41 fincas), Seda (Gros Michel, AAA) (23/56 fincas), Rojo o Morado (Red, AAA) (1/1 finca), Manzano (Silk, AAB) (2/3 fincas) y mixtura de variedades que no presentaron síntomas con las que sí (6/7 fincas). Este rango de hospedante hizo presumir de que los hongos aislados del xilema de plantas enfermas pertenecen a los aislamientos de Foc R1 (Marín, 2010; Ploetz et al., 2015; Martínez de la Parte et al., 2024). Se evaluaron fincas donde se utilizaron variedades que nunca presentaron síntomas de la enfermedad en todas las fincas evaluadas y fincas con combinaciones de variedades que frecuentemente presentaron síntomas junto a variedades que nunca presentaron síntomas: Bizcocho (Sucrier, AA) ($n = 3$), Inguri o Dominico (Plantain, AAB) ($n = 37$), Sapo o Sapino (Bluggoe, ABB), FHIA (AAAA), Palillo (Maoli Popoulu, AAB) ($n = 3$), los tipos de las variedades Bellaco (Plantain, AAB, $n = 31$) y las del subgrupo Cavendish (AAA, $n = 4$).

En las Figuras 10a y 10b, se observa que el uso de las variedades Bellaco y Dominico o Inguri estuvo negativamente asociado con la prevalencia de la MF u ocurrencia de que una finca donde se siembre esta variedad presente plantas afectadas por la enfermedad; mientras que el uso de la variedad Isla (Iholena, AAB) tuvo una significativa asociación con la prevalencia de la MF y fue la que aportó más a las diferencias, de igual modo en las fincas donde se empleó mixtura variedades.

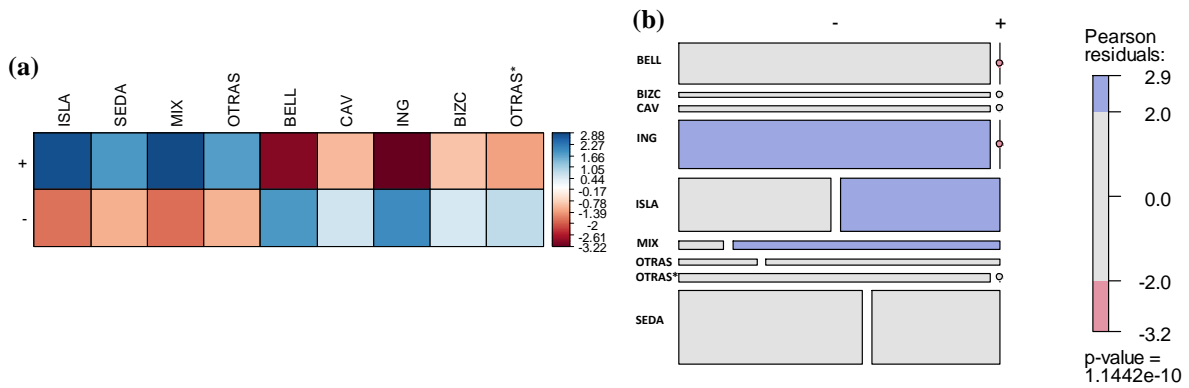


Figura 10: (a) Contribución de cada variedad a la dependencia con la prevalencia de la MF y (b) asociación significativa entre variedades y la prevalencia de la enfermedad

Nota: Se compararon los residuales entre el valor observado y esperado de la prueba de χ^2 . Los datos fueron a partir de evaluaciones en 189 fincas.

La relación entre la variedad utilizada y la región evaluada tuvo efecto en la prevalencia de la MF (%) pues existió asociación significativa entre la zona evaluada y la variedad de plátano o banano empleada ($\chi^2 = 237.8309$; $\chi^2_{(0.05, 40 \text{ gl})} = 55.75848$, $p < 5.955261e-30$); asimismo, la dependencia de la variedad con la localidad fue alta (Contingency Coeff = 0.746) (Figura 11). Se observó que en JUN se sembró predominantemente la variedad Isla y que esta asociación significativa, junto a la predominancia de la variedad Inguiri en la zona SML, aportaron más a las diferencias. Existió asociación entre la variedad Seda y las regiones AMA y CUS, respectivamente. Esto pudo estar asociado con la ocurrencia de la MF, por lo que la variedad empleada afectó a la prevalencia y la preferencia en emplear una determinada variedad afectó la prevalencia de la MF en cada región.

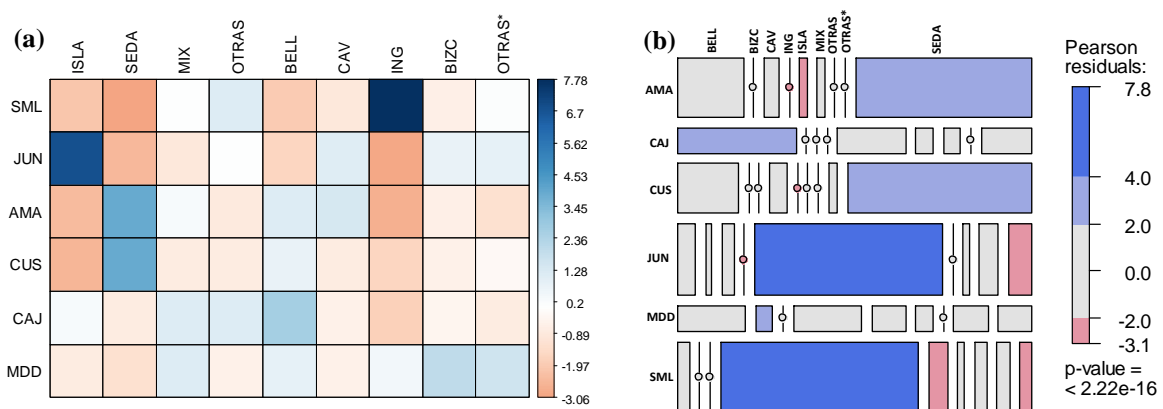


Figura 11: (a) Contribución de cada interacción entre variedad y localidad a la dependencia entre estas y (b) asociación significativa entre variedad utilizada y zona evaluada para la MF

Nota: Se compararon los residuales entre el valor observado y esperado de la prueba de χ^2 . Los datos fueron a partir de evaluaciones en 189 fincas.

4.4. Incidencia de la MF

La incidencia de la MF en las 53 fincas con ocurrencia natural de la enfermedad varió entre 0.09 y 10.81%, con promedio y mediana de 1.853 y 0.9%, respectivamente (Figura 12a, Tablas 1, 2 y 3). No existieron diferencias significativas entre zonas ($p > 0.05$) pero hubo variación numérica. El mayor valor de incidencia promedio fue en SML con 2.853% (mediana de 2.85%; $n = 2$ fincas) seguido de JUN con 2.163 % (mediana de 0.81 %; $n = 25$ fincas). La región AMA fue la tercera con la incidencia media de 1.80 % (mediana de 1.27 %; $n = 13$ fincas), seguida de CUS con 1.324 % (mediana de 0.72 %; $n = 9$ fincas) y por último CAJ con 0.788 % (mediana de 0.83 %; $n = 4$ fincas) (Figura 12b).

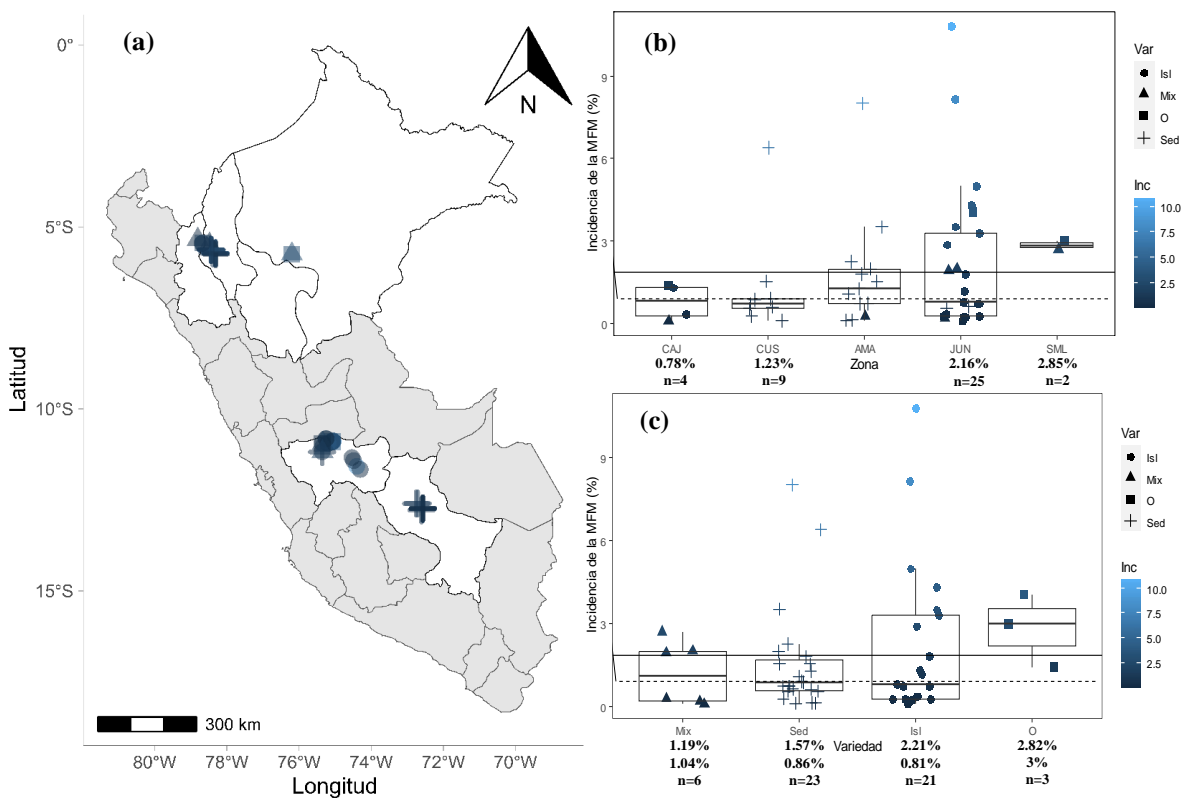


Figura 12: (a) Localización de las 53 fincas afectadas por la marchitez por *Fusarium* (MF) en las cinco regiones que fueron analizadas en este estudio y (b) diagrama de cajas de la incidencia (%) de la MF en fincas de plátanos y/o bananos en diferentes regiones y (c) variedades

Nota: La ubicación exacta de las fincas se determinó mediante formas geométricas correspondientes a cada variedad. Las fincas situadas en localidades cercanas están superpuestas en el mapa y se aprecian más oscuras. El nivel de incidencia está representado por la intensidad del color azul. Los valores de incidencia promedio y mediana de este parámetro están representados como una línea continua y discontinua, respectivamente.

La incidencia de la MF (%) presentó diferencias numéricas no significativas al comparar variedades ($p > 0.05$). La mayor incidencia media se dio en el grupo clasificado como “otras” ($n = 3$) que agrupó fincas de las variedades Manzano (Silk, AAB; $n = 2$) y Morado (Red, AAA; $n = 1$), con el valor de 2.82 % (mediana de 3 %). En segundo lugar, estuvo la variedad Isla (Iholena, AAB; $n = 21$ fincas) con la incidencia promedio de 2.21 % (mediana de 0.81%), seguida de la variedad Seda (Gros Michel, AAA; $n = 23$ fincas) con el valor de 1.57 % (mediana de 0.86 %). Por último, las fincas sembradas con variedades mixtas, mayormente entre plátanos sin la enfermedad y las variedades antes mencionadas, presentaron el menor valor con 1.19 % (mediana de 1.04 %; $n = 6$ fincas) (Figura 12c).

Las dos variedades más frecuentemente afectadas por la MF fueron Seda ($n = 23$ fincas) e Isla ($n = 21$ fincas) con incidencias máximas de 8.01% en Amazonas y 10.81% en Junín, respectivamente, ambas en monocultivo (Figura 13a, Tablas 2 y 3). Al evaluar si la variedad sembrada afectó a la incidencia a nivel regional, existió dependencia significativa entre estas ($\chi^2 = 57.04168$; $\chi^2_{(0.05, 12 \text{ gl})} = 21.02607$; $p < 7.768432e-08$), la que fue alta (Contingency Coeff = 0.72). Resaltó la asociación significativa entre la variedad Isla y JUN, interacción que aportó más a las diferencias; por el contrario, la asociación fue negativa entre la variedad Seda y JUN. Adicionalmente, existió dependencia significativa de la variedad Seda con AMA y CUS (Figuras 13b y 13c). Esto tuvo relación y siguió la tendencia de la prevalencia de MF (%) y la incidencia a nivel regional y por variedad.

Los resultados de incidencia de la MF (%) a nivel de región y variedad indicaron elevada variabilidad entre las fincas localizadas en JUN y luego en CUS, así como en la variedad Isla seguida de Seda. Esto sugirió que en estas categorías existieron factores que influyeron en diferencias de los niveles de incidencia de la MF entre fincas. En los Tablas 1, 2 y 3 se presentan la geolocalización de cada finca, variedad afectada, incidencia de la MF (%) y sus características.

Tabla 1: Descripción de las fincas analizadas para la incidencia (%) y patrones espaciales de la MF en CAJ, AMA Y JUN

<i>Finca</i>	<i>Región</i>	<i>Provincia</i>	<i>Variedad (genoma)</i>	<i>Sistema de producción</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Altitud</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Incidencia de la MF (%)</i>
1	CAJ	Jaén	Mix ^a	Monocultivo	-5.343832	-78.805694	627	1.00	0.09
2	CAJ	Jaén	Isla (AAB)	Monocultivo	-5.442342	-78.673608	501	2.00	1.3
3	CAJ	Jaén	Isla (AAB)	Monocultivo	-5.451529	-78.688618	439	1.00	0.36
4	CAJ	Jaén	Manzano (AAB)	Monocultivo	-5.441112	-78.671133	510	0.50	1.4
5	AMA	Utcubamba	Seda (AAA)	Monocultivo	-5.727269	-78.311619	920	1.00	0.72
6	AMA	Utcubamba	Seda (AAA)	Monocultivo	-5.729296	-78.314162	867	1.00	0.72
7	AMA	Utcubamba	Seda (AAA)	Asoc. c/Cacao	-5.716972	-78.316394	969	1.00	1.98
8	AMA	Utcubamba	Seda (AAA)	Monocultivo	-5.723134	-78.31817	908	1.00	8.01
9	AMA	Utcubamba	Seda (AAA)	Monocultivo	-5.72334	-78.317808	895	0.50	1.27
10	AMA	Utcubamba	Seda (AAA)	Monocultivo	-5.751375	-78.308799	783	0.75	0.12
11	AMA	Bagua	Mix ^a	Monocultivo	-5.475067	-78.480019	550	1.00	0.27
12	AMA	Bagua	Seda (AAA)	Monocultivo	-5.626802	-78.442604	749	1.00	2.25
13	AMA	Bagua	Seda (AAA)	Monocultivo	-5.632114	-78.437881	820	0.75	0.12
14	AMA	Bagua	Seda (AAA)	Asoc. c/Cacao	-5.629756	-78.41975	750	0.50	1.8
15	AMA	Bagua	Seda (AAA)	Asoc. c/Cacao	-5.624901	-78.443794	717	1.00	1.53
16	AMA	Bagua	Seda (AAA)	Monocultivo	-5.635542	-78.434374	856	1.00	3.51
17	AMA	Utcubamba	Seda (AAA)	Monocultivo	-5.722569	-78.395563	580	1.00	1.08
18	JUN	Satipo	Isla (AAB)	Asoc./Frutales	-11.579567	-74.40167	890	1.50	8.16

Nota: CAJ (Cajamarca), AMA (Amazonas), JUN (Junín), (a) Bellaco (Plantain, AAB) + Manzano (Silk, AAB).

Tabla 02: Descripción de las fincas analizadas para la incidencia (%) y patrones espaciales de la MF en JUN

<i>Finca</i>	<i>Región</i>	<i>Provincia</i>	<i>Variedad (genoma)</i>	<i>Sistema de producción</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Altitud</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Incidencia de la MF (%)</i>
19	JUN	Satipo	Isla (AAB)	Asoc. c/Cacao	-11.66392	-74.304708	840	1.00	0.09
20	JUN	Satipo	Isla (AAB)	Monocultivo	-11.335067	-74.534081	684	1.00	0.09
21	JUN	Satipo	Isla (AAB)	Monocultivo	-11.420423	-74.487356	727	1.00	0.81
22	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Asoc. c/Café	-10.902174	-75.079777	621	1.00	0.27
23	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.909717	-75.0788	1015	1.00	0.72
24	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.898107	-75.070387	1044	1.00	0.36
25	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.897808	-75.070762	1033	1.00	0.27
26	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.895741	-75.053641	954	1.00	4.32
27	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.887237	-75.066789	880	1.00	1.8
28	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.892475	-75.060211	972	0.50	10.81
29	JUN	Chanchamayo	Morado (AAA)	Asoc. c/Café	-10.901360	-75.080134	1057	1.00	4.05
30	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.898277	-75.079547	1039	1.00	0.72
31	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Asoc. c/Frijol	-10.872703	-75.06555	563	0.50	2.88
32	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.874539	-75.064233	607	1.00	3.51
33	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Asoc. c/Frutales	-10.949552	-75.190633	1025	1.00	5
34	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Asoc. c/Frutales	-10.950129	-75.194651	1082	1.50	3.3
35	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Asoc. c/Café	-10.822795	-75.249412	1460	1.00	1.17
36	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.812249	-75.249413	1280	1.00	0.23

Nota: JUN (Junín).

Tabla 03: Descripción de las fincas analizadas para incidencia (%) y patrones espaciales de la MF en JUN, CUS y SML

<i>Finca</i>	<i>Región</i>	<i>Provincia</i>	<i>Variedad (genoma)</i>	<i>Sistema de producción</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Altitud</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Incidencia de la MF (%)</i>
37	JUN	Chanchamayo	Isla (AAB)	Monocultivo	-10.945828	-75.351395	1334	1.50	0.24
38	JUN	Chanchamayo	Mix ^b	Monocultivo	-10.946708	-75.340753	1430	0.25	2
39	JUN	Chanchamayo	Mix ^c	Asoc. c/Café	-10.95046	-75.358311	1505	1.00	0.18
40	JUN	Chanchamayo	Seda (AAA)	Asoc. c/Frutales	-11.179139	-75.359816	1336	1.00	0.63
41	JUN	Chanchamayo	Seda	Asoc. c/Café,Frutales	-11.18234	-75.360324	1070	1.00	0.54
42	JUN	Chanchamayo	Mix ^d	Monocultivo	-11.177161	-75.35049	1150	0.75	1.92
43	CUS	La Convención	Seda (AAA)	Monocultivo	-12.785974	-72.605714	1018	1.00	0.72
44	CUS	La Convención	Seda (AAA)	Monocultivo	-12.731391	-72.572162	1007	1.50	0.6
45	CUS	La Convención	Seda (AAA)	Asoc. c/Papaya	-12.749288	-72.572958	1008	0.25	6.4
46	CUS	La Convención	Seda (AAA)	Asoc. c/Café,Cacao	-12.74824	-72.572895	986	1.00	0.1
47	CUS	La Convención	Seda (AAA)	Asoc. c/Cacao	-12.747925	-72.575089	1009	1.00	0.9
48	CUS	La Convención	Seda (AAA)	Monocultivo	-12.73444	-72.565773	969	0.50	0.54
49	CUS	La Convención	Seda (AAA)	Asoc. c/Cacao	-12.601417	-72.752206	741	2.00	0.86
50	CUS	La Convención	Seda (AAA)	Monocultivo	-12.601201	-72.70869	770	2.00	1.53
51	CUS	La Convención	Seda (AAA)	Asoc. c/Cacao	-12.731336	-72.566263	887	1.00	0.27
52	SML	Alto Amazonas	Mix ^e	Monocultivo	-5.747361	-76.196769	132	1.27	2.7
53	SML	Alto Amazonas	Manzano (AAB)	Monocultivo	-5.749185	-76.202417	151	0.30	3

Nota: JUN (Junín), CUS (Cusco), SM (San Martín-Loreto), (b): Inguiri (Plantain, AAB) + Isla (Iholena, AAB), (c): Bizcocho (Sucrier, AA) + Isla (Iholena, AAB), (d): Inguiri (Plantain, AAB) + Seda (Gros Michel, AAA), (e): Inguiri (Plantain, AAB) + Manzano (Silk, AAB).

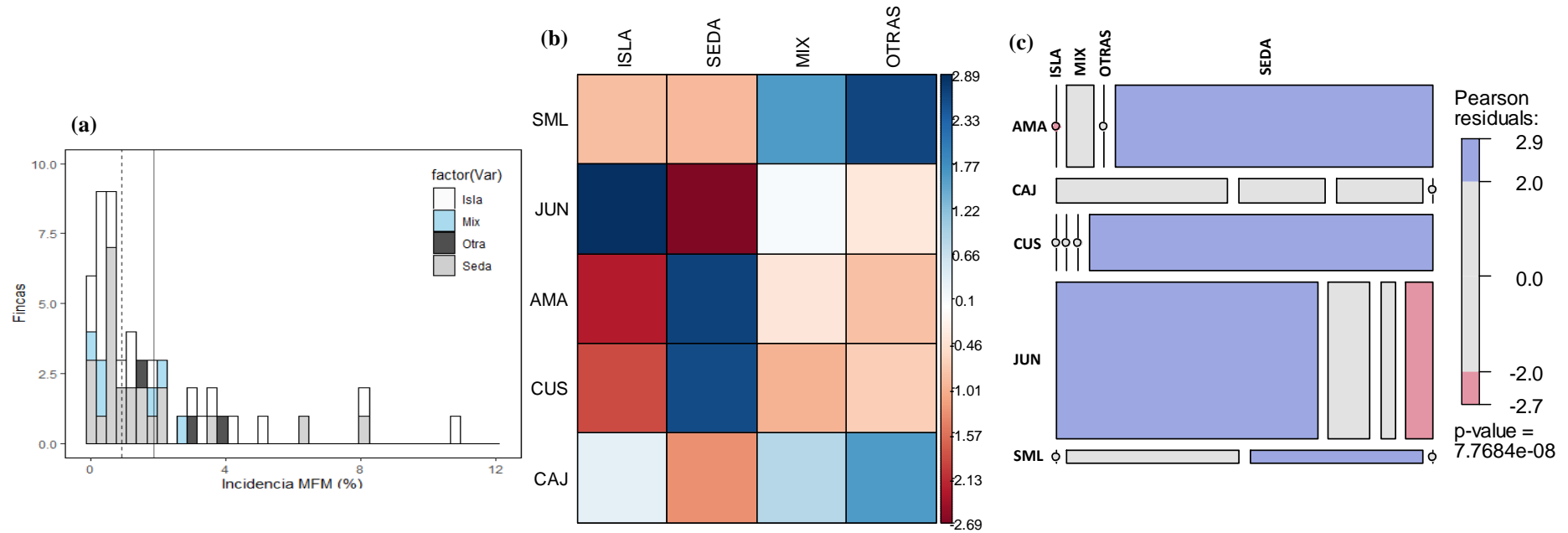


Figura 13: (a) Histograma de frecuencias de la incidencia de la MF (%) por variedad empleada en 53 fincas evaluadas en 05 regiones en Perú.

(b) Aporte de cada combinación entre región y variedad a la dependencia entre estas y (c) asociaciones significativas entre regiones y variedades

Nota: Se compararon los residuos entre el valor observado y esperado de la prueba de χ^2 de Pearson. Los resultados fueron a partir de datos de evaluaciones en 53 fincas con ocurrencia natural de la MF.

La incidencia global cuantificada fue baja (promedio 1.853, mediana 0.9 y máxima 10.81%) en comparación con las de otros países. La incidencia de la MF en Brasil fue moderada con media de 10.89%, varió entre 0.09 y 41% y las mayores incidencias estuvieron asociadas con una variedad del subgrupo Silk, AAB (relacionado a Manzano) (Heck et al., 2021a), dicha variedad es poco sembrada en el Perú, pero es reconocida por los agricultores como altamente afectada por la MF. En otro reporte de Brasil, Dita et al. (2020) indicaron que las variedades más afectadas fueron las del tipo Pome o subgrupo Prata (AAB) y Manzano o Maçã (Silk, AAB), con pérdidas de hasta el 30 y 100%, respectivamente. La incidencia en Etiopía fue mayor, con valores promedio de 14.7%, máxima de 77 % y prevalencia de 67% (Mengesha et al, 2018), frente los cuantificados en este estudio para el Perú, cuya prevalencia fue de 28.04%. Por su parte, Karangwa et al. (2016) cuantificaron incidencias mayores al 40% en la mayoría de las fincas evaluadas en África Central.

En un estudio realizado en el distrito de San Luis de Shuaro, Junín, las variedades afectadas por la MF fueron: Isla, Seda, Bizcocho, Manzano, Palillo y Morado, con incidencias de 0.15 a 19.74% y prevalencia de 61.745% (92/149 fincas) (Román-Jerí, 2012). Dichos valores fueron mayores que los del presente estudio para esa localidad (máxima de 1.17% y prevalencia de 50%), probablemente por el menor número de fincas evaluadas, lo que también pudo haber conllevado a la ausencia de plantas de la variedad Palillo, afectadas por la MF en aquel estudio. También fueron mayores que para toda la provincia de Chanchamayo (valores entre 0.18 y 10.81, media de 2.139, mediana de 1.17 y prevalencia de 75% o 21/28 fincas) y la región Junín (rango entre 0.09 y 10.81, promedio de 2.163 y mediana de 0.81, prevalencia de 54.348 % o 25/46 fincas) (Tabla 2). En el actual estudio, las menores de incidencias se presentaron en fincas con mixtura de variedades, lo que coincidió con lo indicado por Karangwa et al. (2016).

Las mayores incidencias a nivel regional y global fueron en la variedad Isla como monocultivo en Junín, y la tendencia fue que la mayor cantidad de fincas presentaron baja incidencia con valores menores a 2.35%, lo que coincidió con lo indicado por Román-Jerí (2012). Las bajas incidencias pudieron asociarse con la acción antropogénica, la cual mayormente eliminó las plantas afectadas por la MF y las reemplazó por otras variedades en la región JUN; asimismo, por la mayor capacitación brindada para los agricultores por parte del SENASA desde el estudio

realizado por Román-Jerí (2012) hasta el actual, esto último pudo confirmarse de forma directa con los productores y al evaluar el nivel de conocimiento sobre la MF en dicha localidad.

Los reportes de las respuestas de las variedades de musáceas a la MF en el Perú son escasos. Krauus et al. (1999) indicaron que Bizcochito o Moquicho (Sucrier, AA) tuvo respuesta variable de resistencia a susceptibilidad, Manzano (Silk, AAB) presentó muy alta susceptibilidad, en Isla y Seda se dio susceptibilidad y Bellaco e Inguiri presentaron resistencia. El SENASA (Marín, 2010), indicó las mismas variedades que en San Luis de Shuaro (Román-Jerí, 2012), pero no Bizcocho; esto coincidió con el presente estudio, salvo Palillo que sí fue afectada por la MF según lo indicado por Marín (2010). La variedad Isla tuvo las mayores frecuencias e intensidades de la MF en este estudio, es sembrada en pocos países y entre ellos el Perú, pero es susceptible a Foc R1 (Marín, 2010) y Foc R4T (Zhan et al., 2022a); asimismo, presenta diferentes respuestas frente a la MF dentro del grupo (Román-Jerí, 2012; Romero, 2020), algo que no fue considerado. Por su parte, Martínez de la Parte et al. (2024), indicaron que las variedades más sembradas en Latinoamérica tuvieron respuestas variables frente a Foc R1 y susceptibilidad a Foc R4T, donde Manzano (Silk) y Gros Michel fueron las más afectadas por ambos patógenos.

La importancia de los plátanos (Plantain) para la seguridad alimentaria en el Perú, los reportes de países como China (Zhan et al., 2022b), Cuba (Martínez de la Parte, 2023), Colombia (García-Bastidas et al., 2019) y Venezuela (Herrera et al., 2023) sobre la susceptibilidad de estos y otras variedades frente Foc R4T, la diversidad de variedades sembradas en Perú mayormente sin la enfermedad en todas las fincas evaluadas y con influencia directa en la intensidad de la MF a diferentes escalas debido a su aparente resistencia contra las cepas del patógeno predominantes, remarcan la importancia de una emergencia de Foc R4T en otras zonas distintas de Piura y su efecto en la economía y seguridad alimentaria de los pobladores del Perú.

4.5. Análisis de los patrones espaciales de la incidencia de la MF

4.5.1. Análisis de jerarquía espacial

En los tres niveles jerárquicos analizados, las curvas β -binomiales se localizaron por debajo de las curvas binomiales para todas las fincas evaluadas (Figura 14). Las comparaciones entre pares de niveles jerárquicos para cada finca siguieron la misma tendencia: $n_{2 \times 2}$ (39/53), $n_{4 \times 4}$ (43/53) y $n_{6 \times 6}$ (45/53). Los valores del tamaño efectivo de la muestra (v) fueron inferiores al número real de individuos por cuadrante (n) en todos los niveles jerárquicos ($p < 0,001$): $v_{2 \times 2} = 2.92 (\pm 0.10377)$ para cuadrantes de 2×2 con 4 individuos ($n_{2 \times 2} = 4$), de $v_{4 \times 4} = 9.079 (\pm 0.55767)$ para cuadrantes de 16 individuos ($n_{4 \times 4} = 16$), y de $v_{6 \times 6} = 16.386 (\pm 1.20635)$ para cuadrantes de 6×6 con 36 individuos ($n_{6 \times 6} = 36$). Estos valores de v correspondieron al 73.002%, 56.744% y 45.517% de n en los tres niveles jerárquicos, respectivamente, y fueron considerados adecuados. Se utilizó el tamaño de muestra 2×2 en los posteriores análisis basados en cuadrantes debido a su mayor simplicidad para los análisis espaciales y la posible utilidad de los resultados de este trabajo en enriquecer plataformas de muestreo secuencial (Heck et al., 2021c; Heck et al., 2023).

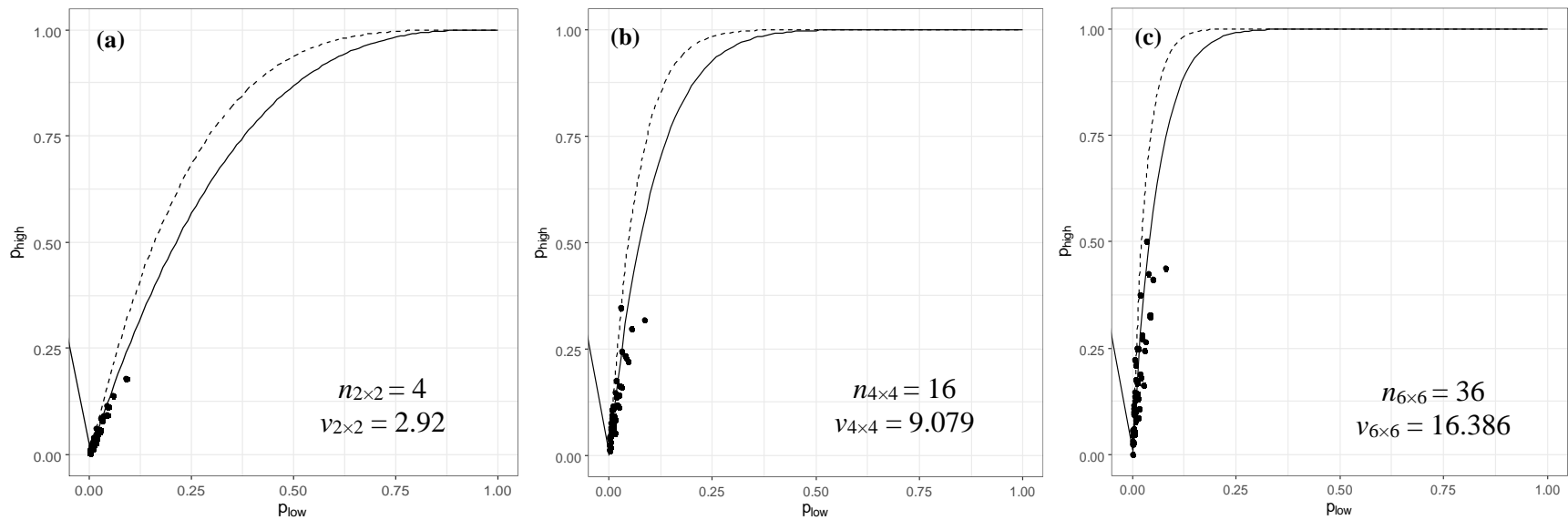


Figura 14: Relación entre la incidencia de la MF en niveles jerárquicos de (a) 2×2 , (b) 4×4 y (c) 6×6 plantas por cuadrante en 53 fincas productoras de musáceas en el Perú

Nota: La unidad de muestreo (cuadrante) fue el nivel jerárquico más alto (p_{high}) y el individuo (planta) fue el más bajo (p_{low}). Los datos se ajustaron a las distribuciones binomial (líneas discontinuas) y β -binomial (líneas continuas). En los gráficos se presentan el número de individuos (n) y el tamaño efectivo de la muestra (v) estimados en cada nivel.

4.5.2. Índice de dispersión (D)

Se calculó con éxito los valores del índice de dispersión (D) en las 53 fincas a partir de datos de cuadrante de tamaño efectivo. Los valores variaron entre 0.972 y 3.007 para todas las fincas, con valores de mediana y promedio de 1.666 y 1.712, respectivamente (Tabla 4). Se determinó la agregación estadísticamente significativa en 38/53 fincas analizadas ($p < 0.05$) y la aleatoriedad en 15/53 fincas (Figura 15a).

Existieron diferencias significativas del parámetro D entre Amazonas y Cusco, así como entre Amazonas y Junín ($p < 0.05$) (Tabla 4). No hubo diferencias significativas entre variedades ($p > 0.05$), pero numéricamente el grupo de “otras” variedades presentó el mayor valor de D , en promedio 2.23 y con 3/3 fincas significativamente agregadas; seguido de Seda con valores promedio y mediana de 1.70 y 1.67, respectivamente, y con 17/23 fincas con agregación significativa. La variedad Isla presentó 15/21 fincas con agregación significativa y el valor D promedio de 1.66; mientras que las fincas con mezcla de variedades presentaron 3/6 fincas con patrones agregados y el valor de D fue en promedio 1.63 (mediana de 1.228). Adicionalmente, el valor D fue estadísticamente superior en monocultivo (promedio de 1.832 y 26/34 fincas con patrón agregado) que en asociación (promedio de 1.495 y 12/19 fincas con patrón agregado) ($p < 0.05$).

El parámetro D puede tener como máximo valor el número de plantas en la unidad muestral ($n = 4$), por lo que la agregación a este nivel fue intermedia y fue mayor en AMA, cuya mediana fue de 2.157, es decir casi el 50 % de sus fincas presentaron mayores valores; mientras que en JUN y CUS las medianas fueron de 1.496 y 1.382, respectivamente, lo que indicó menor agregación a ese nivel.

Heck et al. (2021a) evaluaron la MF en Brasil y emplearon cuadrantes de tamaño 3 x 3 con valores de D en el rango de 1 y 6.5. Proporcionalmente, esto fue similar con lo hallado en este estudio, considerando las diferencias del tamaño de cuadrante. Además, el patrón espacial predominante fue el agregado, pero en mayor medida que el presente estudio debido a la mayor intensidad de la enfermedad; asimismo, proporcionalmente con respecto al tamaño de unidad muestral, en Brasil la mediana del parámetro D fue menor que la obtenida en este estudio, probablemente porque en dicho país existen factores que dispersan Foc en mayor medida. Adicionalmente, Liu et al. (2015), indicaron similares resultados de un patrón agregado y mayor agregación con mayor intensidad al evaluar la distribución espacial de la MF de seis fincas en China.

4.5.3. Ajuste a distribuciones estadísticas

La distribución β -binomial describió adecuadamente al número de plantas afectadas por la MF a nivel de cuadrantes de tamaño efectivo en 36/53 (67.925%) de las fincas evaluadas ($p > 0.05$) (Tabla 4), esto indicó la predominancia del patrón agregado a nivel de unidad muestral (Figura 15b). El parámetro de agregación θ varió entre 0.028 y 2.025, con promedio y mediana de 0.593 y 0.455, respectivamente (Tabla 4), valores similares a los encontrados previamente en Brasil (Heck, 2019); sin embargo, la mediana fue mayor en el presente estudio, posiblemente porque existió mayor diseminación de Foc en Brasil (mediana de 0.2). Las diferencias del parámetro de agregación entre regiones siguieron la misma tendencia que el valor D ($p < 0.05$), pero no existieron diferencias significativas entre variedades ni entre sistemas de producción ($p > 0.05$).

La prueba de LRS fue significativa ($p < 0.05$) e indicó que la distribución β -binomial describió mejor la frecuencia de la incidencia de la MF que la binomial en 37/53 (69.811%) del total de fincas evaluadas, con 37/40 (92.5 %) de las fincas cuyas incidencias se ajustaron inicialmente a ambas distribuciones ($p > 0.05$). Esto reafirmó la agregación a nivel de cuadrante en la mayoría de las fincas a escala regional y global (Tabla 4 y Figura 15). Por otro lado, la prueba LRS no fue significativa ($p > 0.05$) en 03 fincas, donde ambas distribuciones explicaron adecuadamente las frecuencias de los datos de incidencia de la MF a nivel de unidad muestral, con todas las fincas como monocultivo: 01 de la variedad Seda ($\bar{y} = 1.27$ %) de 18 meses de edad y localizada en AMA, Utcubamba; 02 ubicadas en JUN, Chanchamayo, con una de la mixtura varietal entre Dominico e Isla ($\bar{y} = 2$ %) de 20 meses; y otra de la mixtura varietal Dominico (sin la enfermedad) y Seda ($\bar{y} = 1.92$ %) de 12 meses. Las incidencias de estas fincas en JUN fueron mayores que el promedio global pero menores que la media regional (2.163 %) y mayores que las medianas global y regional. Además, el agricultor indicó conocer los síntomas de la enfermedad, saber de existencia de plantas enfermas en su finca y realizar la eliminación y reemplazo de estas, asimismo, el daño por *C. sordidus* (CS) fue más que el promedio (8.6 galerías por cormo).

Los datos de fincas con incidencias de la MF más bajas (menores que 0.18%) no se ajustaron a ninguna de las dos distribuciones (6/53 fincas), mientras que la mayoría de las fincas con patrón espacial aleatorio presentaron incidencias menores que 1%, pero existieron fincas con mayor incidencia, mayormente localizadas en JUN y que presentaron esta característica. La distribución binomial fue la única que explicó adecuadamente las

frecuencias de la incidencia de la MF en 7/53 o el 13.208% del total fincas, las que se clasificaron significativamente con patrones aleatorios y todas estuvieron localizadas en JUN (05 fincas) o CUS (02 fincas); asimismo, 03 fueron de la variedad Isla, 02 de la variedad Seda en JUN y 02 de esta misma variedad en CUS.

El enfoque del análisis de los índices de agregación y las pruebas de bondad de ajuste a distribuciones de probabilidades estadísticas implica la caracterización del grado de variabilidad en el nivel medio de intensidad de la enfermedad a escala de unidad muestral (Madden et al., 2018). Esto es de utilidad para determinar en qué medida existe diseminación de propágulos de Foc de una planta a otra y qué factores pueden favorecer o desviar este proceso a lo que se esperaría para este patógeno típico vascular y que es transmitido por el suelo. Encontrar la mayor proporción de fincas con patrón aleatorio y menores valores de índice de dispersión (D) y parámetro de agregación (θ) en JUN, pese a tener mayores niveles de intensidad de la enfermedad, indicaron que la diseminación de Foc fue más eficiente en estas fincas.

Tabla 4: Valores promedio (Prom.) y mediana (Med.) de la prevalencia (Prev.) e incidencia (\bar{y}) de la marchitez por Fusarium (MF) (%) de plátanos y bananos (musáceas) y proporción de campos clasificados con patrones agregados (Agr.) con significancia estadística por cada uno de los estadísticos espaciales para diferentes regiones de Perú ^a

Región ^b	\bar{y}			D^c			θ^c			LRS^c		$I_a^{c,d}$	
	Prev	Prom.	Med. ^{ns}	Prom.	Med.	Agr. ^{sig}	Prom.	Med.	Agr. ^{sig}	Agr. ^{sig}	Prom.	Med. ^{ns}	Agr. ^{sig}
CAJ ($n = 4$)	26.67	0.788	0.830	1.903 _{ab}	1.931 _{ab}	3/4	0.766	0.696 _{ab}	2/4	3/4	1.408	1.345	2/4
AMA ($n = 13$)	35.14	1.798	1.270	2.111 _a	2.157 _a	11/13	0.937	0.657 _a	10/13	10/13	1.597	1.678	8/13
JUN ($n = 25$)	54.35	2.163	0.810	1.538 _b	1.497 _b	15/25	0.461	0.423 _b	15/25	15/25	1.436	1.267	13/25
CUS ($n = 9$)	29.03	1.324	0.720	1.417 _b	1.382 _b	7/9	0.265	0.304 _b	7/9	7/9	1.645	1.394	6/9
SML ($n = 2$)	4.55	2.853	2.850	2.228	2.228	2/2	0.711	0.711	2/2	2/2	1.599	1.599	2/2
Global (N = 53)	28.04	1.853	0.900	1.712	1.666	38/53	0.593	0.455	36/53	37/53	1.515	1.412	31/53

Nota:

Se especifica el índice de dispersión (D), el parámetro β -binomial (θ), el estadístico log-likelihood ratio (LRS) y el índice de agregación (I_a) del Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE).

^a Se realizó el análisis estadístico espacial de 53 fincas evaluadas en diferentes regiones o zonas de Perú. Se infirió el patrón agregado cuando la hipótesis nula de aleatoriedad fue rechazada ($p < 0.05$). La inferencia del parámetro de agregación (θ) de la distribución β -binomial fue con la hipótesis nula de agregación ($p > 0.05$).

^b Cajamarca (CAJ), Amazonas (AMA), Cusco (CUS), Junín (JUN), San Martín-Loreto (SML).

^c Métodos basados en cuadrantes del tamaño efectivo de unidad de muestreo obtenido por el análisis de jerarquía espacial (2 x 2).

^d Método basado en distancias.

_{ab} Letras en subíndice indican diferencias estadísticamente significativas entre regiones ($p < 0.05$).

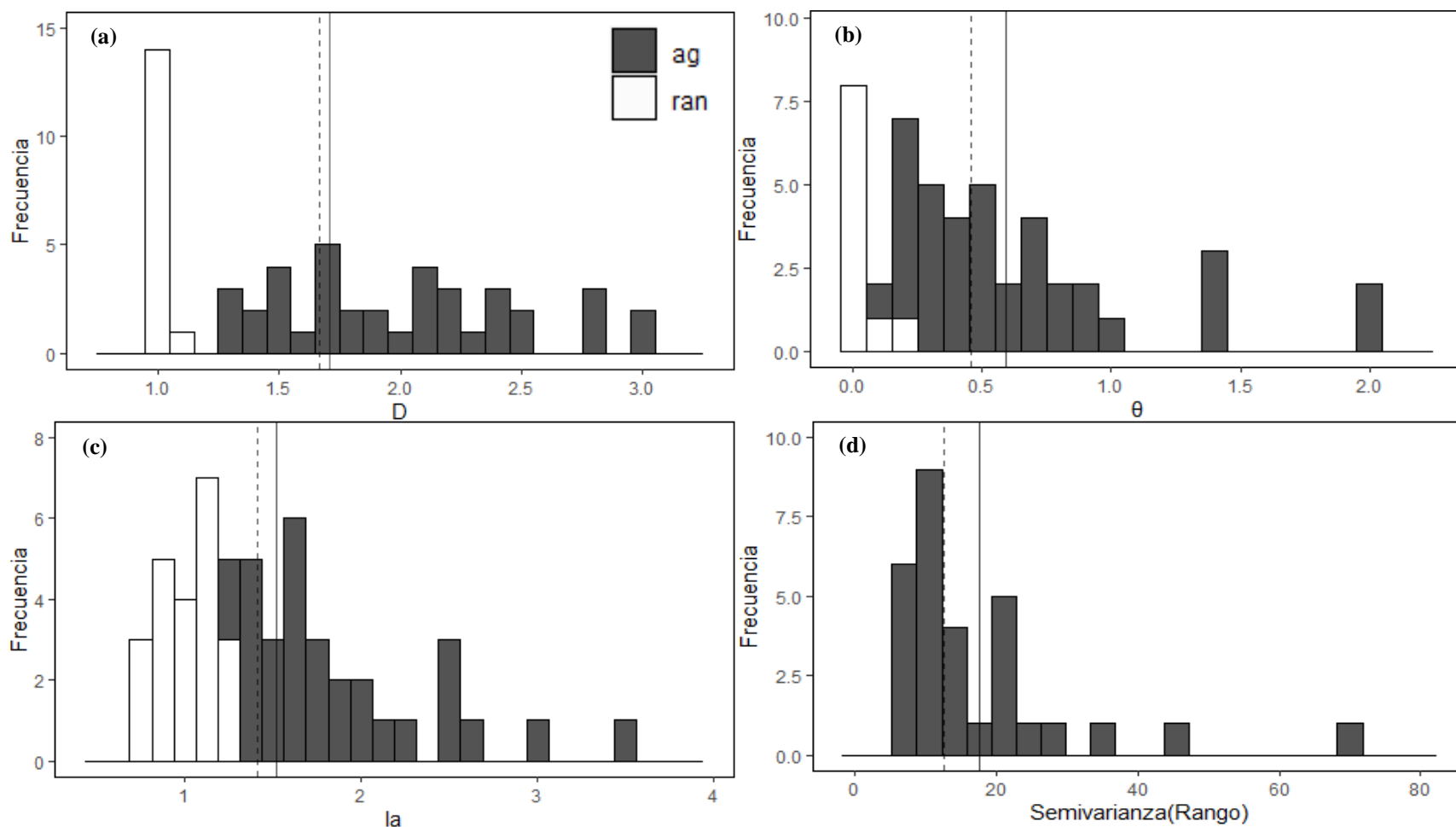


Figura 15: Histogramas del (a) índice de dispersión (D); (b) parámetro β -binomial (θ) del ajuste a distribuciones estadísticas; (c) índice de agregación (I_a) del análisis SADIE; y (d) rango práctico (metros) del modelo esférico del análisis empírico de la semivarianza para la incidencia de la MF

Nota: Las frecuencias se realizaron sobre la base de los datos de los 53 campos evaluados para la incidencia de la MF en el Perú. Los valores de promedio y mediana estadísticos están representados por líneas continuas y discontinuas, respectivamente. Las fincas están clasificadas como con patrones aleatorios (color blanco) o agregados (color oscuro).

4.5.4. Análisis espaciales basados en índices de distancia (SADIE)

Se computó la distancia a la regularidad (D_r) del método SADIE en las 53 fincas con ocurrencia de la MF. La mediana general del índice de agregación (I_a) fue de 1.412 y el promedio de 1.515 con variaciones entre 0.767 y 3.562 (Tabla 4 y Figura 15c). Dichos valores fueron ligeramente menores que los encontrados en Brasil (Heck, 2019). No existieron diferencias significativas entre regiones ($p > 0.05$), ni entre sistemas de producción como monocultivo (promedio de 1.43 y mediana de 1.41) o asociado (promedio 1.66 y mediana de 1.41) ($p > 0.05$). El grupo de “otras” variedades presentó el mayor valor de I_a (promedio de 1.99 y mediana de 1.73) y fue estadísticamente similar a Seda (promedio de 1.63 y mediana de 1.60), mientras que la variedad Isla (promedio de 1.43 y mediana de 1.25) fue similar al del grupo “Mix” (promedio de 1.127 y mediana de 1.09) y ambos grupos presentaron los menores valores de I_a ($p < 0.05$).

El patrón espacial predominante a nivel de finca fue el agregado con 31/53 fincas (58.491%) ($P_a < 0.001$), mientras que el patrón aleatorio fue significativo en 22/53 campos (41.509 %) ($P_a > 0.001$) (Tabla 4). Comparado con el porcentaje de fincas con patrón agregado determinado en Brasil (Heck, 2019), este fue menor en las fincas evaluadas en Perú debido a que la mayoría de estas presentaron menores valores de incidencia de la MF.

De las 22 fincas en donde se detectó el patrón aleatorio, la mayoría fue de la variedad Isla de 24 o menos meses de edad y en monocultivo. Los menores valores de I_a y la mayor proporción de fincas con patrón aleatorio (12/25) se presentaron en JUN (mediana = 1.267), pese a tener mayores valores de incidencia de la MF (Tablas 2, 3 y 4); mientras que las 13 fincas con patrón agregado localizadas en esta zona tuvieron predominancia de la misma variedad, pero de más de 24 meses de edad, con las de mayor I_a asociadas con otros cultivos. En general, las fincas con patrones aleatorios fueron mayormente de la variedad Isla, en monocultivo, menores que 24 meses de edad, con mayores daños por CS e incidencias regulares a mayores. Por otro lado, los mayores valores de I_a y proporción de patrones agregados detectados se dieron en fincas de la variedad Seda localizadas en AMA y CUS. En la región CUS se apreció que el valor de la mediana del I_a fue de 1.394, mayor que el obtenido para JUN; mientras que en AMA la mediana fue de 1.678 y se encontraron 8 fincas con patrones significativamente agregados con predominancia de la variedad Seda, más frecuentemente mayores de 30 meses de edad y en monocultivo.

Hubo correlación significativa entre el I_a y la incidencia de la MF ($R = 0.57$; $p < 0.001$), entre el I_a y el parámetro D ($R = 0.39$; $p < 0.01$) y entre D y la incidencia de la enfermedad ($R = 0.51$; $p < 0.001$) (Figura 21b), lo que indicó que mayormente la diseminación ocurrió de planta a planta contigua. Pero las menores proporciones de fincas con patrones agregados en JUN a nivel de cuadrante y/o finca, pese a presentar mayor incidencia media, indicó que existieron factores que diseminaron a Foc a mayores distancias, con el aumento del número de focos en la finca y que aportaron a la dinámica de la enfermedad en esa localidad.

Los gráficos “rojo y azul” y de isolíneas de “verde almendra” del método SADIE permitieron distinguir dentro de las fincas algunas zonas “donadoras” y “receptoras”, estadísticamente significativas. Esto demostró que la MF se presentó como epidemias con focos dispuestos aleatoriamente en la finca (D : agregado; I_a : aleatorio) (Figura 16), plantas totalmente aleatorizadas (D : aleatorio; I_a : aleatorio) (Figura 17), con un gran foco bien definido en la finca (D : agregado; I_a : agregado) (Figura 18) o plantas dispuestas de forma aleatoria en una zona definida en la finca (D : aleatorio; I_a : agregado) (Figura 19).

Las características como variedad, incidencia, daños por CS, sistema, localidad, etc., afectaron los patrones de distribución espacial en las fincas, como se aprecian en las Figuras 16 al 19, donde las zonas con puntos rojos hacen referencia a unidades muestrales con mayor número de plantas enfermas que el promedio en la finca y son catalogadas como “donadoras”, mientras que las zonas azules son las zonas con número de plantas enfermas por la MF menores que el promedio por finca y son denominadas “receptoras”. De esta forma, se apreció gráficamente el grado de contribución de cada unidad muestral o cuadrante al grado de agrupación global. Adicionalmente, los gráficos de isolíneas muestran las zonas con asociación local (de mismo color), tanto negativa como positiva, así como el suavizado de las zonas debido a la interpolación. Dichas imágenes muestran algunos posibles escenarios de una epidemia ocasionada por Foc a diferentes niveles de intensidad en el Perú, siendo lo esperado para una incursión de Foc R4T en zonas distintas a Piura que la fuente de inóculo sea el material de siembra infectado o movimiento a largas distancias de suelo infestado.

En la Figura 16 se aprecian dos fincas con focos dispuestos aleatoriamente en cada una, con diferencias asociadas a las características de las fincas y localidad. En la finca de la variedad Isla como monocultivo en JUN (Figura 16a), se observó mayor número de zonas

“donadoras”, lo que pudo deberse al material de siembra infectado por la mayor prevalencia de la MF en JUN y donde la mayoría de los agricultores obtenían los cormos o hijuelos desde fincas de otras localidades en la región (o más distantes) y no de una determinada zona o de la propia finca; además, el suavizado fue menos explícito, probablemente asociado a mayores daños por CS en dicha finca. Adicionalmente, la semivarianza indicó asociación espacial de estos focos (rango práctico = 11.96).

Por otro lado, en la finca de la variedad Seda asociada con papayo en CUS (Figura 16b), pese a la mayor edad de la plantación (48 meses) e incidencia de la MF (6.4%), hubo menos zonas “donadoras” que comprendieron áreas de la finca con un suavizado más notorio, probablemente por menor presencia de CS y menor dispersión de Foc; además, la semivarianza indicó un rango práctico de 7.14, menor al de la finca localizada en JUN. Adicionalmente, el propietario de la finca en Cusco indicó seleccionar el material de siembra de su propia finca, pero no se descartaría totalmente esta fuente de inóculo, o sino fuentes externas como las de los sustratos de plantines de papayos asociados, así como la diseminación por realización de labores culturales en este último cultivo. Es probable que la fuente de inóculo haya sido el suelo infestado y con divergencia en la densidad de inóculo o alguna de las fuentes externas mencionadas, a partir de donde Foc se diseminó de planta a planta en cada foco conforme pasó el tiempo, pues la edad de plantación fue de 48 meses. Adicionalmente, las zonas donadoras y el área que abarcó la semivarianza podrían ser las regiones del suelo con mayor densidad de inóculo o fuente inicial de inóculo.

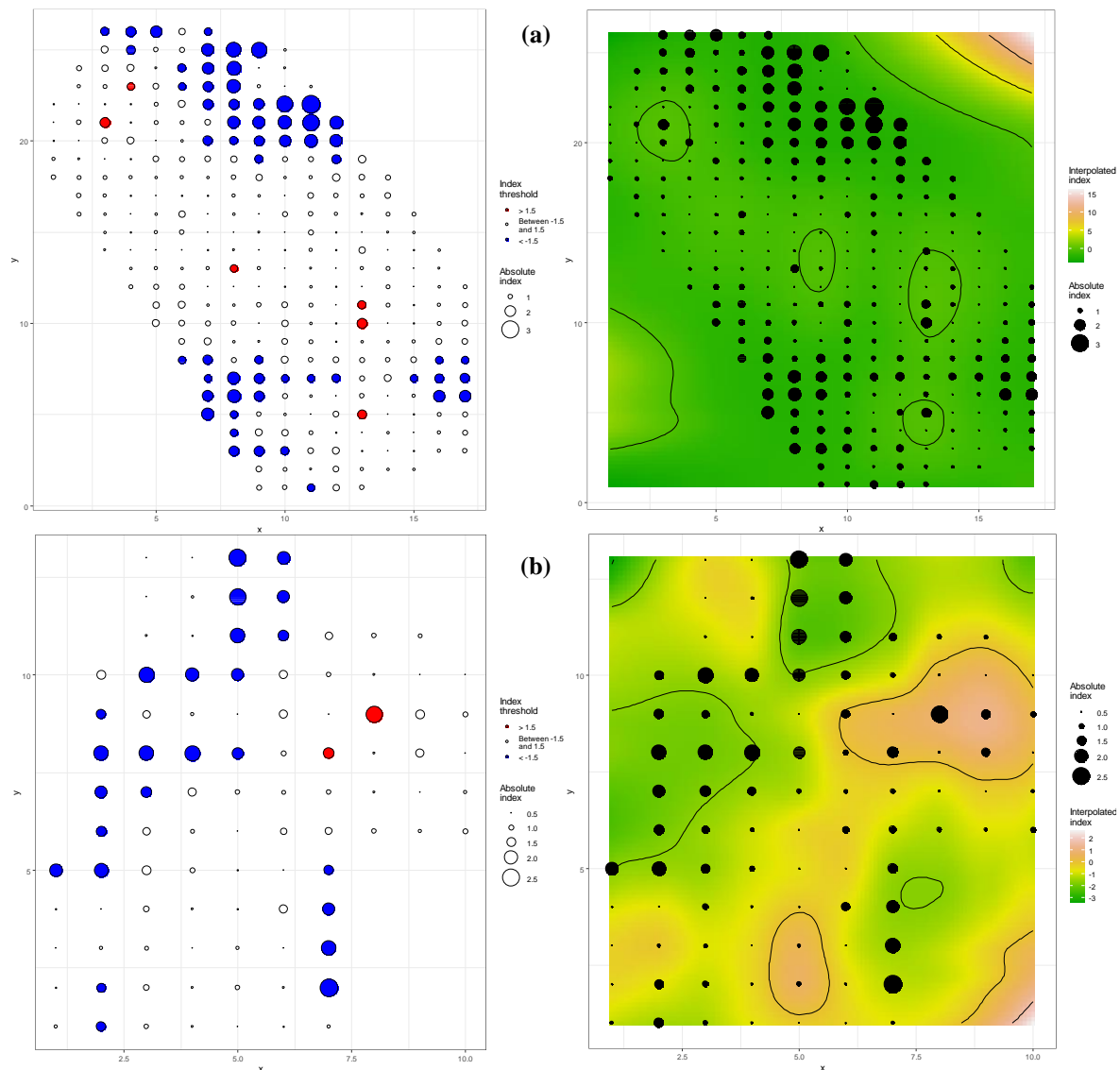


Figura 16: Fincas con focos dispuestos de forma aleatoria (*D*: agregado; *I_a*: aleatorio)

Nota: (a) Finca de la variedad Isla en monocultivo de 18 meses en JUN ($\bar{y} = 4.32\%$ y daño por CS = 10.1 galerías por cormo) y (b) finca de la variedad Seda en asociación con papaya de 48 meses en CUS ($\bar{y} = 6.4\%$ y daño por CS = 1.17 galerías por cormo).

En la Figura 17 se aprecian dos fincas de la variedad Isla en JUN con valores intermedios a bajos de incidencia de la MF y cuyas plantas afectadas estuvieron distribuidas aleatoriamente. En la de mayor edad y en asociación con café, se presentó mayor incidencia y menores daños por CS (Figura 17a); además, la semivarianza indicó un rango práctico de 10.98. El material de siembra en esta finca fue obtenido de viveros locales, con el probable menor riesgo de ser fuente de inóculo. Por otro lado, en la finca como monocultivo y de menor edad (Figura 17b), no existió asociación indicada por la semivarianza, esto coincidió con el mapa de SADIE sin asociación local ni interpolación. Las diferencias podrían deberse a que, pese a haber menores daños por CS en la primera finca, el sistema de producción podría favorecer la dispersión de Foc, además de la mayor

edad de plantación e incidencia; mientras que en la segunda finca, probablemente la fuente de inóculo haya sido el material de siembra infectado obtenido de fincas vecinas y no haya existido asociación indicada por la semivarianza por encontrarse en una fase inicial de la epidemia causada por Foc. Adicionalmente, la edad de plantación fue baja en ambos casos, siendo común para la MF que las epidemias inicien con patrones aleatorios y luego pasar a la agregación (Meldrum et al., 2013).

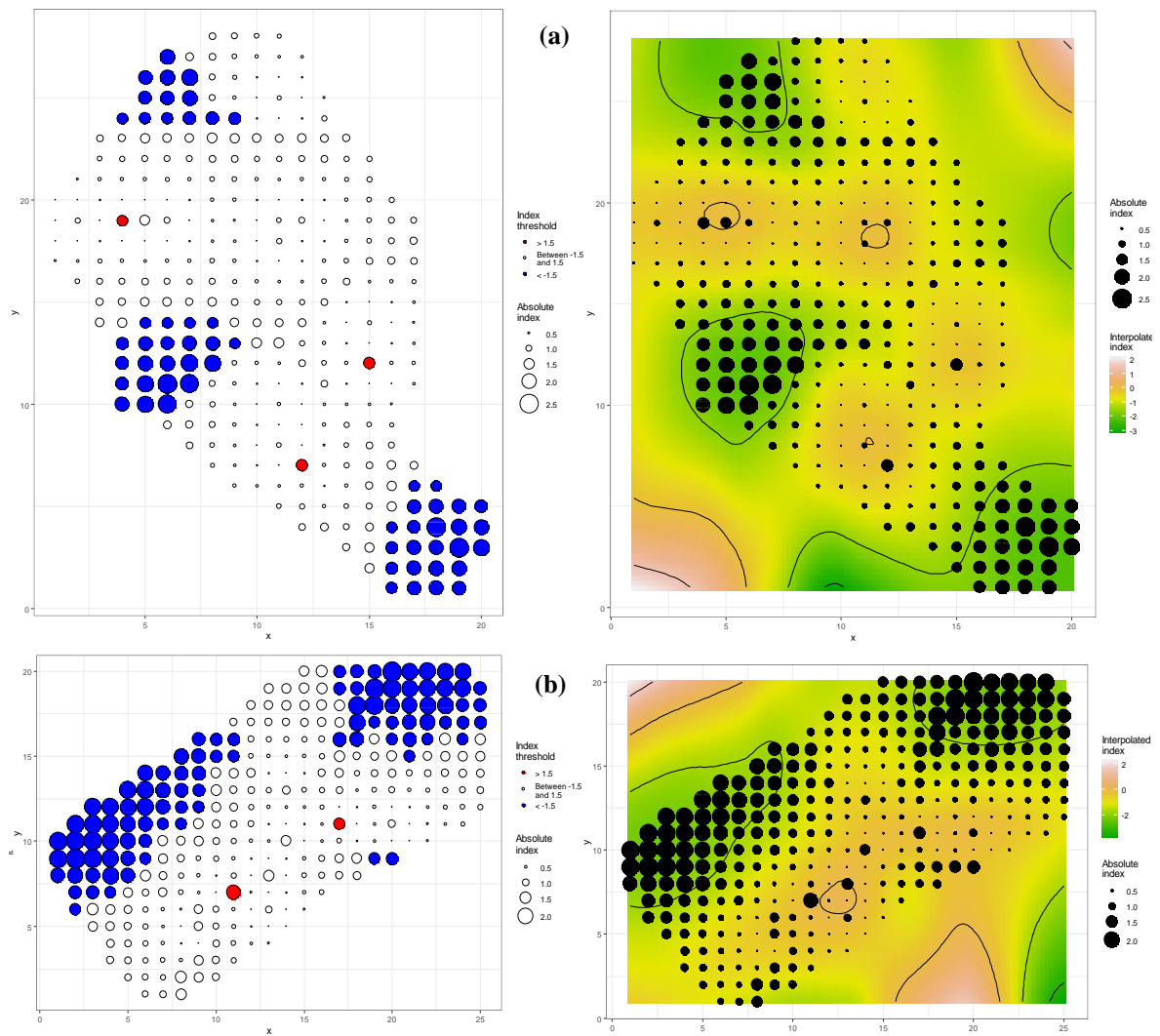


Figura 17: Fincas con plantas totalmente aleatorizadas en finca (D : aleatorio; I_a : aleatorio) localizadas en JUN

Nota: (a) Finca de la variedad Isla en asociación con café de 18 meses ($\bar{y} = 1.17\%$; daño por CS = 2.5 galerías por corno) y (b) finca de la variedad Isla en monocultivo de 7 meses ($\bar{y} = 0.72\%$; daño por CS = 7.6 galerías por corno).

De forma general, el resultado de patrón randomizado indicado por SADIE es un indicador de que el inóculo primario pudo haber provenído de una vía externa a la finca, como el material de siembra infectado, sustrato o suelo infestado, agua, viento, animales, personas,

etc. (Meldrum et al., 2013; Ploetz et al., 2015; Dita et al., 2018; Warman y Aitken, 2018; Heck et al., 2021a; Heck et al., 2021b).

En la Figura 18 se muestran dos fincas con uso de la variedad Seda en AMA y con presencia de grandes focos en un área bien definida, ambas con similares daños por CS, pero con diferencias en la intensidad de agregación e incidencia de la enfermedad. La finca de la parte superior hace referencia a una de las de mayor incidencia de la MF ($\bar{y} = 8.01\%$) de todas las fincas evaluadas, donde el sistema fue en monocultivo (Figura 18a). La agregación fue muy marcada con una zona de inicio en la parte inferior central de la finca. Hubo coincidencia entre el mapa “verde ciruela” de SADIE, que indicó un área con mayor asociación local (que disminuyó con la distancia: suavizado), y la semivarianza cuyo rango práctico fue de 45.78 (modelo esférico), que fue uno de los más amplios. El agricultor indicó seleccionar hijuelos de fincas vecinas en función de la producción de la planta madre. Esto último, la semivarianza y la edad de plantación (24 meses), podrían asociar el patrón agregado y el tamaño del foco con la fuente de inóculo de suelo infestado, pero no se tuvo información de los cultivos anteriores en esta finca, además se apreció una zona con mayor intensidad de la enfermedad a partir de donde se diseminó Foc y causó nuevas infecciones, como sugirió el rango práctico del modelo esférico de la semivarianza.

Por otro lado, en la Figura 18b se muestra una finca de la misma variedad Seda en asociación con cacao y de 48 meses de edad, cuya incidencia fue menor ($\bar{y} = 1.53\%$). No existió asociación indicada por la semivarianza. Además, el material de siembra fue obtenido de fincas de otras localidades o fincas siguiendo solo el aspecto visual externo de la planta madre. El parámetro D fue de 2.13, mayor que en la finca anterior ($D = 1.8$); mientras que el índice de agregación de SADIE (I_a) en esta fue de 3.059, mayor que el de la finca anterior ($I_a = 2.119$). Esto último indicó la MF en la finca en asociación con cacao estuvo más agregada que en la primera finca, y que los cuadrantes de tamaño efectivo presentaron mayor variación en la primera finca, pese a que la incidencia en la finca asociada a cacao fue menor. Las diferencias pudieron atribuirse al efecto del sistema de producción en asociación con cacao, resultando en menor dispersión de Foc y menor incidencia de la MF.

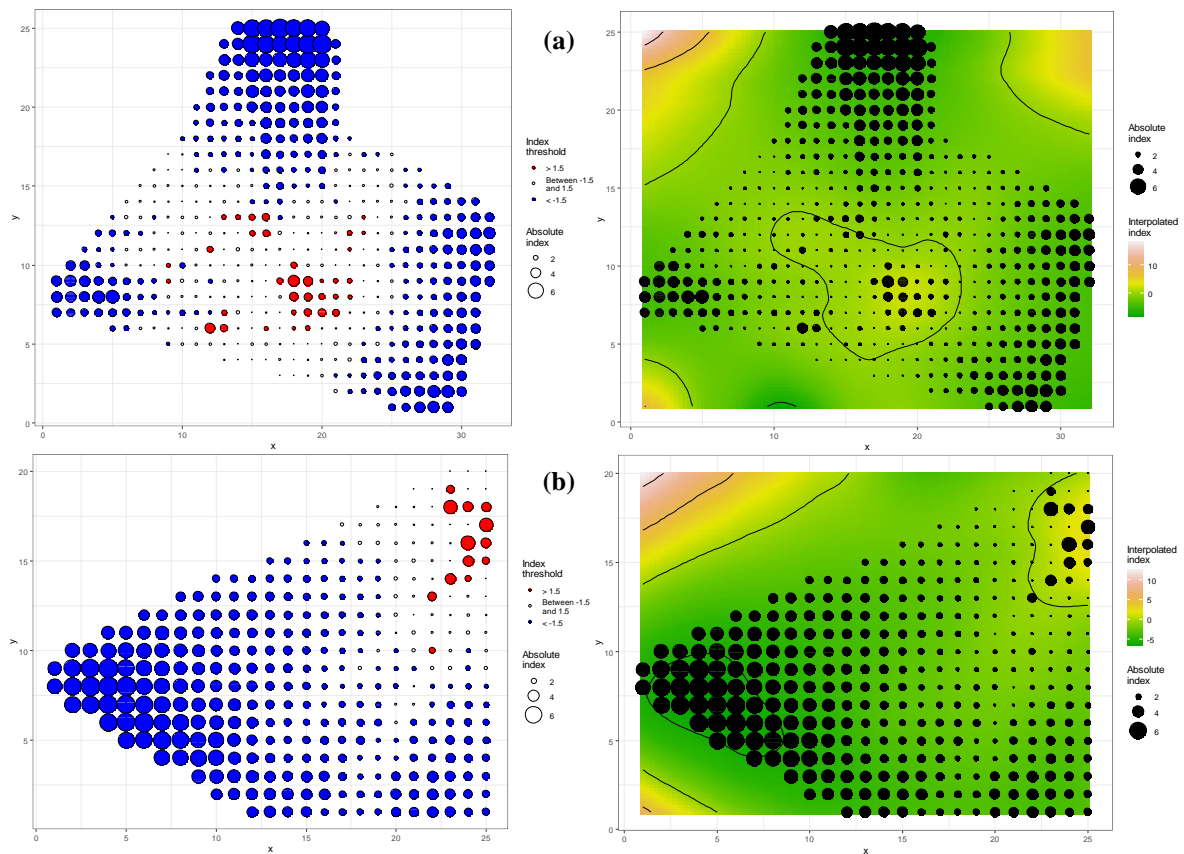


Figura 18: Fincas con un gran foco bien definido en cada una (D : agregado; I_a : agregado) localizadas en AMA y de la variedad Seda

Nota: (a) Finca en monocultivo de 24 meses ($\bar{y} = 8.01\%$ y daño por CS = 3.3 galerías por cormo) y (b) finca en asociación con cacao de 48 meses ($\bar{y} = 1.53\%$ y daño por CS = 3.1 galerías por cormo).

En la Figura 19 se aprecian dos fincas con plantas afectadas por la MF y distribuidas aleatoriamente en una zona bien definida en la finca. La finca representada en la Figura 19a utilizó la variedad Seda en JUN y en asociación con frutales, presentó menor incidencia ($\bar{y} = 0.63\%$) y menores daños por CS (2.8 galerías por cormo), pese a tener mayor edad (24 meses). Esto pudo deberse a que el agricultor obtuvo el material de siembra a partir de cámaras térmicas y siguió una selección de la planta madre más rigurosa que en la otra finca, con la probable fuente de inóculo a partir del suelo infestado *in situ* o adherido a sustrato de los frutales asociados (Moore et al., 1995). Además, la semivarianza indicó un rango de 10.62 (modelo esférico), lo que coincidió con la zona de asociación local del mapa “verde ciruela” y las zonas “donadoras” de SADIE. Por otro lado, en la Figura 19b se observa la finca en monocultivo de variedades mixtas: Dominico y Seda y que presentó mayor incidencia de la MF ($\bar{y} = 1.92\%$) y daños por CS (8.6 galerías por cormo). En ambas fincas, los parámetros D e I_a fueron similares. Además, en la última finca el agricultor realizó la eliminación y reemplazo de la variedad Seda, afectada por la

MF, por la variedad Dominico. Esto, junto a la menor edad de esta plantación, sugirió que probablemente el suelo haya sido la fuente de inóculo y que, junto a la posible propagación de Foc por CS, afectó la dinámica de la MF y conllevó a una mayor incidencia.

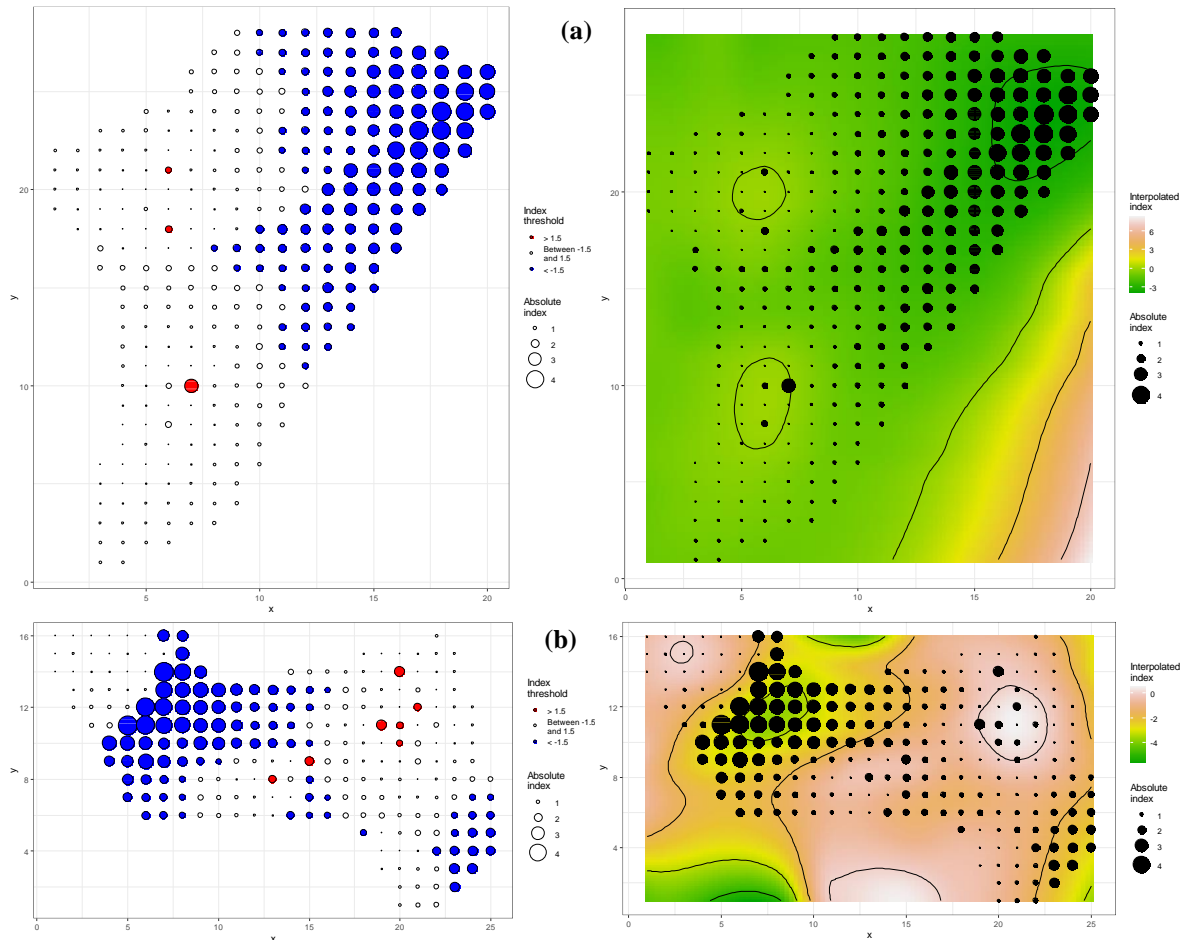


Figura 19: Fincas con plantas aleatorias en una zona definida de la finca (D : aleatorio; I_a : agregado)

Nota: (a) Finca de la variedad Seda en asociación con cítricos de 24 meses en JUN ($\bar{y} = 0.63\%$ y daño por CS = 2.8 galerías por corno) y (b) finca de Mixtura varietal de Dominico y Seda en monocultivo de 12 meses en JUN ($\bar{y} = 1.92\%$ y daño por CS = 8.6 galerías).

4.5.5. Semivarianza

El análisis de semivariogramas empíricos resultó en dependencia espacial en 48/53 fincas (90.566 %), con bajos valores del parámetro *nugget* o *pepita* (C_0) y en una proporción menor al 50 % del parámetro *meseta* o *sill* ($C_0 + C$); mientras que 5/53 fincas (9.434 %) presentaron valores muy altos de este parámetro debido a mayor variabilidad espacial a escalas menores que la distancia entre unidades de muestreo, lo que imposibilitó el procedimiento y determinación de sus parámetros (efecto *nugget* o *pepita*).

El modelo esférico explicó adecuadamente el semivariograma empírico en 30/53 fincas (56.604 %), en las cuales se determinó el rango práctico definido como la máxima distancia a la cual existe asociación o dependencia espacial entre las plantas o unidades muestrales y sobre la cual existe independencia espacial entre estas. El rango varió entre 7.140 y 71.040, con promedio y mediana de 17.594 y 12.510 metros, respectivamente, indicando que los focos estuvieron comprendidos dentro de esas medidas (Figura 15d). En general, los campos con mayor incidencia presentaron mayores de rangos y hubo variación de este parámetro entre fincas, dos de las cuales presentaron una moderada a pobre asociación espacial (proporción $Co/Co+C$ cercana a 50 %).

No hubo diferencias estadísticas entre los rangos prácticos del modelo esférico de las regiones evaluadas ($p > 0.05$), pero numéricamente JUN tuvo el mayor valor de rango promedio con 24.19 (mediana de 16.98 y máximo de 71.04) y 14/25 fincas cuyas incidencias se ajustaron al modelo esférico, le siguió AMA con el valor medio de 17.83 (mediana de 11.31 y máximo de 45.78) con 10/13 fincas ajustadas al modelo esférico, mientras que CUS tuvo menores valores con el promedio 11.66 (mediana de 9.67 y máximo de 20.7) y 5/9 fincas cuyas incidencias se ajustaron al modelo esférico. Al comparar variedades, no hubo diferencias significativas entre los rangos prácticos del modelo esférico ($p > 0.05$), pero numéricamente los mayores valores se presentaron en “Mix” de variedades (promedio de 26.73 y mediana de 17.82), seguido de Isla (21.74 y mediana de 14.94). Tampoco hubo diferencias significativas entre los rangos al comparar sistemas de producción ($p > 0.05$), pero numéricamente fue mayor en fincas de plátanos o bananos que estuvieron asociados con otros cultivos (mediana de 17.28 y máximos de 71.04 y 63.74), que en monocultivo (mediana de 12.039 y máximos de 45.78 y 35.34).

El rango de la semivarianza es la máxima separación sobre la cual las unidades muestrales están correlacionadas y puede estar influenciado por el cultivo, densidad de plantación, manejo, entre otros. Los mayores valores de rango y consecuentemente mayores tamaños de focos a nivel de finca se presentaron en JUN, luego AMA, y fueron correspondientes a las fincas con mayores incidencias. La finca con mayor rango fue de la variedad Isla con los segundos mayor incidencia de la MF (8.16 %) y daños por CS (16.8 galerías por cormo) de forma global. Por su parte, Heck et al. (2021a), determinaron valores de rango comprendidos entre 9.36 y 154.61 m, con la mediana de 30.80 metros en fincas evaluadas para la MF en Brasil y, similar a este estudio, los mayores rangos se asociaron a mayores incidencias de la MF pero estuvieron influenciados por la densidad de plantación. Por otro

lado, en la marchitez por *Fusarium* en tomate, el rango fue de 1.1 a 1.4 metros (Rekah et al., 1999), este cultivo es anual de ciclo corto y la distancia entre plantas mayormente es menor que 50 cm dentro de la línea de cultivo; mientras que los plátanos y bananos son cultivos semi perennes con distanciamiento de 1.5 a 7 metros entre plantas; sin embargo, la distancia en las fincas en Perú fue de aproximadamente de 3.3 metros. Muchos factores pueden favorecer la diseminación de Foc, como los ya mencionados y la esporulación a partir de esporodoquios desde las partes superficiales externas de plantas infectadas (Dita et al., 2018; Ploetz et al., 2015); sin embargo, esto último no fue concluyente.

4.5.6. Análisis de concordancia entre métodos

Se realizó un análisis exploratorio, por lo que se determinó la confiabilidad en los procesos y métodos utilizados para el análisis espacial a través de la concordancia de los resultados obtenidos. El análisis de concordancia de Kappa de Cohen entre pares de métodos indicó que la concordancia fue muy pobre o no significativa en la mayoría de los pares que incluyeron la semivarianza ($p > 0.05$); mientras que la mayor concordancia significativa se dio entre las detecciones del patrón agregado mediante el LRS y el índice de agregación (D) (Kappa = 0.83; $p < 0.05$), seguida de los métodos SADIE (I_a) y MAPComp (Kappa = 0.757; $p < 0.05$), la concordancia fue fuerte y moderada, respectivamente, y siguió lo esperado al tratarse de pares de métodos con enfoques similares. Por otro lado, los pares de métodos MAPComp con el índice de agregación (D) y la distribución β -binomial (θ) con el índice de agregación (D), presentaron concordancias bajas (Tabla 5^b).

El análisis de concordancia general de Kappa de Fleiss de los patrones detectados en las 53 fincas por los seis métodos, indicó una mayor confiabilidad total por todos los métodos en la detección del patrón agregado (Kappa = 0.480) y luego el aleatorio (Kappa = 0.400). En general, el valor de Kappa fue 0.408, estadísticamente distinto de cero ($p < 0.001$) y fue considerado como de baja a intermedia concordancia entre todos los métodos (Tabla 3^c). Esto también fue esperado debido a que los métodos presentan diferencias intrínsecas, especialmente cuando se comparan métodos que consideran la heterogeneidad espacial a nivel de unidad muestral o menor escala versus los que toman en cuenta mayores escalas.

La marchitez por *Fusarium* (MF) en plátanos y bananos se presentó como epidemias en fincas con patrones espaciales agregados o aleatorios para la enfermedad. Todos los métodos detectaron el mismo patrón agregado en 24 fincas (45.28 %) y el patrón aleatorio fue detectado por al menos un método en 29 fincas (54.72 %). Del primer grupo, 16 fincas

se presentaron como monocultivo, 12 fueron de la variedad Seda, 8 de Isla, las 3 fincas existentes de las variedades Manzano o Morado y 1 en mixtura de las variedades Inguiri y Manzano, de esta última, la variedad que presentó síntomas fue Manzano con todas sus plantas presentes solo en un área delimitada del campo. Además, 8 de los agricultores conocían la enfermedad y patógeno, 11 de los cuales percibieron plantas afectadas por la MF en sus fincas, 10 indicaron no manejar las plantas enfermas y 10 indicaron cortar y distribuir los restos de la planta enferma. Adicionalmente, 12 productores no tenían idea de la forma de diseminación del patógeno y solo 7 conocían al material de siembra como fuente de inóculo.

Tabla 5: Concordancia por Kappa de Cohen y Kappa de Fleiss y proporción de campos con la misma clasificación según los estadísticos espaciales

Estadístico espacial ^b	θ	LRS	I_a	MAPComp	<i>Semiv</i>
<i>D</i>	43/53 (0.564 ^{sig})	50/53 (0.863 ^{sig})	40/53 (0.47 ^{sig})	44/53 (0.59 ^{sig})	39/53 (0.185 ^{ns})
θ		40/53 (0.495 ^{sig})	32/53 (0.242 ^{sig})	35/53 (0.301 ^{sig})	35/53 (0.088 ^{ns})
LRS			38/53 (0.434 ^{sig})	43/53 (0.552 ^{sig})	40/53 (0.277 ^{sig})
I_a				47/53 (0.757 ^{sig})	32/53 (0.0809 ^{ns})
MAPComp					38/53 (0.166 ^{ns})
<i>Semiv</i>					
General ^c		0.408 ^{sig} ($p < 0.001$) 24/53			

Nota:

^a Se especifica el índice de agregación (*D*), la distribución β -binomial (θ), el *log-likelihood ratio statistic* para las distribuciones (LRS), el Análisis espacial por índices de distancia (SADIE) (I_a), el método MAPComparison y el análisis de la semivarianza (*Semiv*).

^a Los campos fueron clasificados como con patrones espaciales aleatorios o agregados, de acuerdo con los *p-value* obtenidos por los estadísticos espaciales ($p < 0.05$ o $p > 0.05$ para la distribución β -binomial) o los resultados de ajuste empírico al semivariograma por mínimos cuadrados y una relación $Co / Co + C$ menor a 50 %. Los valores del parámetro kappa que difirieron estadísticamente de cero (clasificación aleatoria) son indicados como *sig* en función del estadístico z ($p < 0.05$). La proporción del conjunto de datos que fueron clasificados con el mismo patrón espacial se muestran entre paréntesis para cada combinación de métodos.

^b Prueba de kappa de Cohen para concordancia entre pares de métodos.

^c Prueba de kappa de Fleiss para concordancia general para todos los métodos.

El análisis de los patrones espaciales que presentan los patógenos y/o sus hospedantes, así como las interacciones entre estos, como son las enfermedades y a diferentes escalas, puede ser de gran ayuda para comprender los procesos ecológicos que les subyacen. Los métodos basados en patrones puntuales y cuadrantes, como lo son el estudio del índice de dispersión ' D ' y ajuste a distribuciones estadísticas, detectaron el patrón espacial agregado en mayor número de fincas en comparación con los métodos basados en distancias y/o geoestadísticos, lo que es común en epidemias como la MF con bajas incidencias en niveles similares a las encontradas en este trabajo.

El cálculo y análisis de la semivarianza se basa en recuentos de pares de puntos de muestreo que presentan valores de recuento similares a una determinada distancia para comprobar la hipótesis de agrupación o dependencia espacial global y determinar algunas de sus características, pero no permite mapear de forma explícita la heterogeneidad. Los métodos SADIE y MAPComp se basan en la desviación local de la densidad espacial de las observaciones de una densidad esperada, el primero emplea distancias espaciales, mientras que el segundo, distancias formales (entre distribuciones o probabilidades de densidad), y las dos emplean permutaciones para computar distancias; esto hace posible el mapeo de los patrones espaciales, como agrupaciones de plantas enfermas en una determinada área (Lavigne et al., 2010; Winder et al., 2019). El método SADIE presenta ciertas limitaciones como efecto borde (Xu y Madden, 2003), mientras que el método MAPComp es más robusto para la detección de la heterogeneidad espacial, incluso en casos de localización de los focos en dominios cuadrados o alargados o cerca a los bordes, o con unidades muestrales de tamaño pequeño (Lavigne et al., 2010). El uso conjunto de diferentes enfoques, como lo realizado en este trabajo, permiten una comprensión más clara de lo ocurrido en las fincas analizadas.

4.5.7. Ley de la potencia binaria de Taylor (BPL)

La ley de la potencia binaria de Taylor (BPL) describió adecuadamente la relación entre el logaritmo de la varianza observada y la varianza teórica para una distribución binomial en los 53 campos evaluados en Perú ($R^2 = 0.9504$) (Figura 20a). Se estimaron los parámetros de la BPL: $\log_e(A_p) = 1.57018 (\pm 0.23491)$ y $b = 1.17676 (\pm 0.03724)$, los que fueron significativamente distintos a 0 y 1, respectivamente ($p < 0.001$). Debido a que $\log_e(A_p)$ fue superior a 0 y b superior a 1, la enfermedad presentó un patrón agregado de forma general y la agregación se relacionó directamente con la incidencia de la MF para todas las fincas.

El patrón espacial de la MF difirió entre variedades (Figura 20b). De forma general, la enfermedad presentó el patrón agregado en los campos sembrados con las variedades Isla ('Iholena', AAB) ($n = 21$ fincas) y Seda ('Gros Michel', AAA) ($n = 23$ fincas) con muy buena y buena descripciones por el modelo y con valores para R^2 de 0.9718 y 0.9298, respectivamente (Figura 20b). Los parámetros estimados difirieron entre sí y de los valores correspondientes a un patrón aleatorio ($p < 0.001$). El nivel de agregación fue mayor y estuvo más influenciado por la incidencia en los campos de la variedad Seda: $\log_e(A_p) = 1.85119 \pm 0.44992$; $b = 1.22214$, que en los de la variedad Isla: $\log_e(A_p) = 1.5404 \pm 0.2822$; $b = 1.1751 \pm 0.0447$; en ambos casos, las relaciones entre las variancias descritas presentaron menos diferencias entre sí con menores valores de incidencia de la MF, pero la agregación fue más contundente con valores más altos de esta.

La menor agregación en Isla, pese a que esta presentó mayor incidencia de la MF y que la BPL indicó que la agregación estuvo directamente relacionada con la incidencia, sugirió que existieron factores que propagaron el inóculo de Foc a mayores distancias, lo que se dio mayormente en esta variedad y en la región JUN. El modelo no explicó adecuadamente el patrón espacial en fincas con mezcla de variedades ($p > 0.001$).

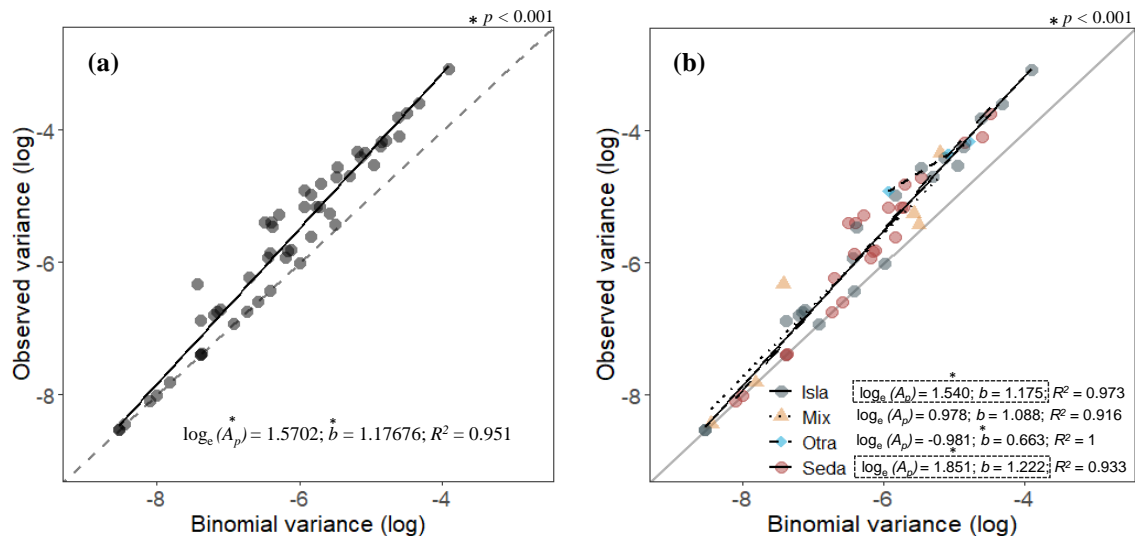


Figura 20: Relación entre el logaritmo de la variancia observada y de la variancia teórica para una distribución binomial para datos de incidencia de la MF en 53 fincas evaluadas en Perú (a) de forma general y (b) según variedad empleada

Nota: Se muestra la relación lineal (a) para las 53 fincas evaluadas para la incidencia (línea sólida); y (b) para la variedad Isla ($n = 21$ fincas), Seda ($n = 23$ fincas), 'Mixtura' ($n = 6$ fincas) y 'Otras' ($n = 3$ fincas). Se presentan la línea binomial en cada caso (línea central) y los parámetros de la ley de potencia binaria respectivos ($\log_e(A_p)$ y b).

Las fincas donde se emplearon variedades mixtas presentaron la menor incidencia media ($\bar{y}=1.19\%$) y, pese a que este grupo no fue muy bien explicado por la BPL, el efecto de la siembra de variedades mixtas entre genotipos resistentes o moderadamente resistentes junto a susceptibles en la reducción de las enfermedades ha sido muy estudiado para patógenos que son dispersados a través del viento e indicado como menor para los transmitidos a través el suelo, como Foc, estando eso relacionado con su capacidad de dispersión (Garret y Mundt, 2007). En Brasil se encontró que la mixtura de la variedad Manzano (Silk, AAB) con otras musáceas como con la variedad Ouro (denominada Bizcocho en Perú) (Sucrier, AA) influyó en una mayor supresividad del suelo y menor incidencia de la MF en la variedad Manzano (Deltour et al., 2017a). De igual forma, Karangwa et al. (2016), detectaron menores incidencias de la MF en campos sembrados con mixtura de variedades, en comparación con el sistema monocultivo de una sola variedad. Estas características pudieron afectar la biología de Foc y disminuir la dispersión del inóculo y afectar al patrón espacial de la MF.

La coincidencia de los resultados del presente trabajo con otros estudios en menores incidencias para la mixtura de variedades y la menor agregación indicó que existe un efecto de la mixtura varietal o que existen factores que pueden diseminar los propágulos del patógeno e impulsar el efecto favorable del sistema. En este estudio no se tomó en cuenta la densidad de la plantación, debido a que no hubo marcadas diferencias entre las distancias entre plantas en la mayoría de las fincas, con un rango de 3 a 3.5 metros entre plantas. Sin embargo, es un punto que se debería considerar en otras condiciones debido a las posibles interacciones que pueden existir entre las raíces de plátanos y bananos, las que pueden extenderse hasta 5 metros de longitud horizontal, pero frecuentemente hasta 2 metros (Robinson y Saúco, 2010). La composición bioquímica de los exudados radiculares depende en gran medida de la especie, variedad, edad, estatus fisiológico de la planta, entre otros, pueden modular el microbioma del suelo y su capacidad de supresión, lo que está en función de las plantas presentes circundantes a las musáceas, como es en el caso de una mixtura varietal (Deltour et al., 2017; Were et al., 2023). Adicionalmente, los agricultores realizaron el reemplazo de variedades susceptibles por otras resistentes, lo que afectó directamente al patrón espacial.

Con respecto a la susceptibilidad de las variedades, los resultados de la BPL otorgaron mayores pruebas para sugerir que la variedad Isla (Iholena, AAB) presenta mayor susceptibilidad frente a las cepas de Foc presente en las zonas evaluadas (probablemente

Foc R1), pues Foc podría diseminarse más y afectar plantas más distantes en fincas sembradas con variedades de alta susceptibilidad, como ocurrió en Brasil (Heck et al., 2021a). Sin embargo, existieron pocas fincas donde se empleó la variedad Manzano, que es catalogada por los agricultores como muy gravemente afectada por la MF.

En función del sistema de producción: monocultivo o asociado, en ambos casos el conjunto de datos se ajustó a la ley de la potencia binaria de Taylor, con parámetros $\log_e(A_p)$ y b mayores que 0 y 1, respectivamente ($p < 0.001$). Los campos sembrados en monocultivo ($n = 34$) presentaron menores agregación y tasa de cambio de esta en función de la incidencia: $\log_e(A_p) = 1.6043 \pm 0.3213$; $b = 1.1689 \pm 0.0502$; $R^2 = 0.944$; mientras que los campos asociados con otros cultivos presentaron mayores valores de estos parámetros y un mejor ajuste al modelo: $\log_e(A_p) = 1.6792 \pm 0.24728$; $b = 1.2196 \pm 0.04023$; $R^2 = 0.982$. El parámetro b fue significativamente superior para el sistema asociado que en monocultivo ($p < 0.001$), lo que indicó que la incidencia de la enfermedad afectó más al nivel de agregación en las fincas donde plátanos y/o bananos se asociaron con otros cultivos.

De forma general, la incidencia de la MF fue mayor en las fincas en sistemas asociados ($n = 19$), con valores entre 0.09 y 8.16 %, con promedio y mediana de 2.11 y 1.17 %, respectivamente. Los campos en monocultivo ($n = 34$) presentaron incidencias entre 0.09 y 10.81, con promedio y mediana de 1.71 y 0.76%, respectivamente. Estos resultados son contradictorios a los indicados por Román-Jerí (2012) en San Luis de Shuaro, quien resaltó la ausencia de la MF en las fincas con mixtura varietal y sistemas asociados. Las diferencias podrían explicarse debido a las características particulares de la región JUN, específicamente cuando se consideraron las fincas asociadas con frutales ($n = 5$), todas en esta región, y cuyos valores promedio y mediana fueron superiores: 4.7 y 5%, respectivamente. Sin embargo, las fincas asociadas con café (promedio de 1.06 y mediana de 0.9%) o cacao (promedio de 1.05 y mediana de 0.4%) presentaron menores incidencias que en monocultivo; asimismo, las fincas asociadas con cacao presentaron una mayor edad de plantación: en promedio 55.71 meses de edad, y se localizaron principalmente en AMA y CUS. Lo mencionado coincidió con lo indicado por Deltour et al. (2017).

La asociación de musáceas con café o frutales sigue una razón de sombra temporal, con la prioridad de los cultivos asociados y la despreocupación de los plátanos y/o bananos, desde selección de semilla hasta el control de plagas no comunes. Donde los cultivos no musáceos llegaron a producción o por el mismo manejo de estos, el mayor tránsito de

personas para las labores culturales tanto del cultivo asociado como de plátanos y bananos, pudo haber sido un factor de diseminación de los propágulos de Foc a través del suelo (Dita et al., 2018); además, el posible traslado de suelo infestado durante la siembra de los cultivos asociados pudo ser un factor que contribuyó en la diseminación de Foc, la intensidad y epidemiología de la MF (Moore et al., 1995).

El caso particular de Foc R4T, que ocasiona una enfermedad “policíclica”, sumamente explosiva y con una capacidad de dispersión muy elevada (Ploetz, 2015), como se mostró con el aumento rápido e inesperado de los focos de plantas afectadas en Piura y los más de 500 focos de la enfermedad en esta zona, hace que el sistema de mixtura varietal sea una estrategia para considerar en el manejo de la enfermedad, en especial para mitigar el efecto sobre variedades agrónomicamente superiores pero susceptibles (Garret y Mundt, 2007) o medianamente susceptibles como una potencial variedad del subgrupo Cavendish mejorada genéticamente para su resistencia frente a Foc R4T y su uso para el manejo integrado.

La inexistencia de diferencias en los síntomas producidos por las distintas razas de Foc es un factor que conlleva el gran riesgo de inviabilidad de la producción de plátanos y bananos en sistemas asociados donde el manejo sea muy intenso, de darse una mayor dispersión de Foc R4T a las regiones que comprendieron este estudio y afectar variedades comúnmente afectadas por cepas distintas a Foc R4T. Las fincas bajo este sistema podrían ser un riesgo y potencial fuente de inóculo para las fincas circundantes de la región debido al modo de producción y movimiento de personas de campo a campo para realizar labores culturales como cosecha, poda, fertilización, etc. Esto enfatiza la necesidad de estudios epidemiológicos comparativos *in situ* tomando en cuenta las características particulares de los sistemas y que prueben las medidas que se proponga para verificar su efecto en la diseminación a nivel de finca de las cepas de Foc presentes y la intensidad de la MF.

Las fincas clasificadas con menores o mayores daños ocasionado por *Cosmopolites sordidus* (CS), el picudo negro de plátanos y bananos, difirieron de forma general al patrón aleatorio en los dos parámetros de la ley de la potencia binaria y se consideraron con patrones agregados ($p < 0.001$); asimismo, estos parámetros difirieron entre sí para las dos categorías ($p < 0.001$) (Figura 21a). Hubo mayor agregación e influencia de la incidencia de la MF sobre esta en las fincas con menores daños por picudo negro ($\log_e(A) = 1.6674 \pm 0.17021$; $b = 1.1822 \pm 0.02716$; $R^2 = 0.985$) en comparación con las de mayores daños ($\log(A) = 1.4653 \pm 0.37776$; $b = 1.1742 \pm 0.05975$; $R^2 = 0.905$).

La incidencia promedio en campos categorizados como con mayores daños por CS ($n = 15$) fue de 2.98 (mediana de 2.34) en un rango de 0.09 a 10.79 %; mientras que las fincas con menores daños ($n = 39$) presentaron la incidencia media de 1.45 (mediana de 0.86) en un rango entre 0.09 y 8.01 %. En la mayoría de las fincas estudiadas, si se realizó el manejo del picudo negro, este estuvo basado en la aplicación de insecticidas químicos y solo los propietarios de ocho (08) fincas indicaron realizar aplicaciones de productos biológicos como *Beauveria* spp. para controlar plagas. La mayor aplicación de productos químicos estuvo asociada con mayores daños en la región JUN y el uso de la variedad Isla.

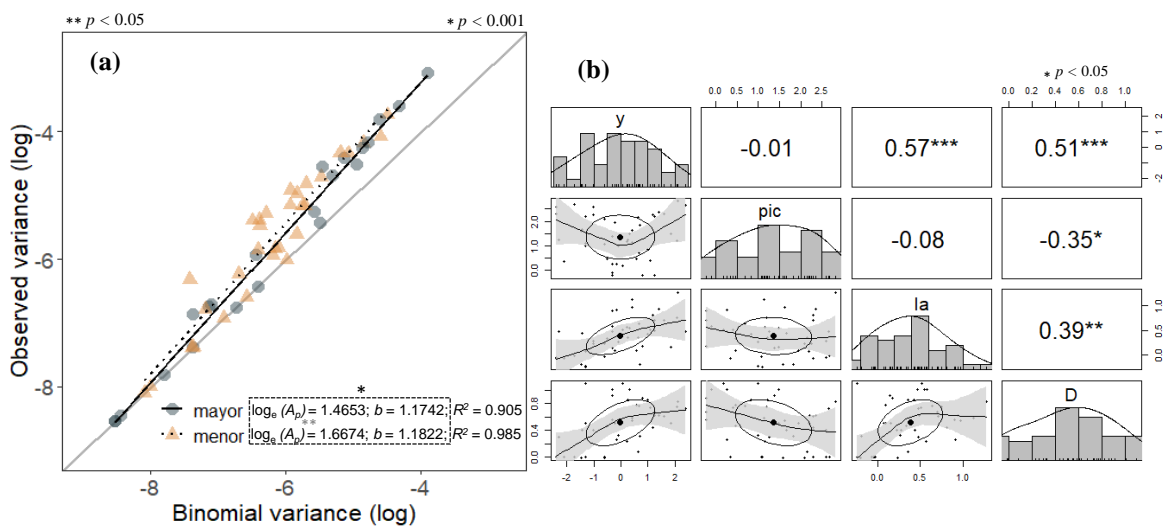


Figura 21: Relación entre el logaritmo de la varianza observada y el logaritmo de la varianza teórica para una distribución binomial de los datos de incidencia de la MF en 53 fincas evaluadas en Perú (a) según daños por *C. sordidus* y (b) asociaciones entre daños, incidencias y estadísticos espaciales

Nota: Se muestra la regresión lineal para todos los campos sembrados según daño por *C. sordidus*: menor daño ($n = 31$) y mayor daño ($n = 22$). Se presentan los parámetros de la ley de potencia binaria ($\log(A_p)$ y b). (b) Asociación entre el daño por CS, el índice de dispersión de Fisher (D) y el índice de agregación de SADIE (Ia), que representaron el nivel de agregación a menor y mayor escala, respectivamente.

Las fincas donde se empleó la variedad Isla presentaron mayores daños por CS y las de la variedad Seda fueron las menos afectadas. Las plantaciones de mayor edad presentaron menores daños por CS, lo que estuvo asociado con la edad de las fincas con uso de la variedad Isla. Esto concuerda con algunos reportes sobre la mayor susceptibilidad de la variedad Isla a esta plaga (Marín, 2001), siendo una de las que presentó mayor incidencia de la MF. Los agricultores consideraron a CS como la plaga más importante y nociva para las musáceas en el Perú. En este trabajo se estimó el daño ocasionado por CS a partir del número promedio de galerías por corno evaluadas en cada 10 plantas seleccionadas al azar

en toda la parcela como aproximación a la población y movimiento del picudo negro de plátanos y bananos en cada finca (Masanza et al., 2005; Dassou et al., 2015).

Como se observa en las Figuras 21a y 21b, el mayor daño por CS y posible mayor población o actividad de esta plaga, fueron factores que se relacionaron con la diseminación de Foc a mayores distancias. Existió asociación inversa significativa entre el daño por CS y el índice de dispersión (D) ($R = 0.35$; $p < 0.05$) (Figura 21b), es decir, las plantas afectadas por la MF estuvieron más dispersas en las fincas con mayor daño por CS.

El rol de CS como agente dispersor de Foc ha sido estudiado últimamente. Meldrum et al. (2013) detectaron propágulos de Foc en el exoesqueleto de CS. En Brasil, Heck et al. (2021b), en un estudio de epidemiología comparativa en condiciones de campo, demostraron la participación del picudo negro en la dispersión de Foc y su efecto sobre la dinámica espacial y temporal de la MF, pues la mayor tasa de desarrollo de la enfermedad y el nivel de agregación estuvieron directa e inversamente relacionados con la población de la plaga, respectivamente. Por su parte, Guillén-Sánchez et al. (2021) demostraron la viabilidad de los propágulos de Foc transportados en la parte corporal interna (sistema digestivo), externa (exoesqueleto) y excretas del insecto hasta por tres días.

Se ha demostrado que estos insectos se ven atraídos preferencialmente por plantas infectadas por Foc, en comparación con plantas sanas, posiblemente por algunos compuestos volátiles producidos en la interacción entre Foc y las musáceas y que participan en la interacción entre estas y la plaga, afectando el potencial rol del insecto en la epidemiología de la MF (Guillén-Sánchez et al., 2023). También se ha demostrado que este insecto es un agente dispersor de otros patógenos que ocasionan enfermedades en musáceas, como es el caso de *Xanthomonas* sp. en África (Were et al., 2015).

Menores daños ocasionados por CS a nivel de cormo, y probablemente menores poblaciones del insecto a nivel de predio, podrían estar relacionadas a una menor diseminación los propágulos de Foc por este insecto a mayores distancias, con efecto sobre la dinámica espacial limitado a las plantas más cercanas a una infectada, lo que se traduciría en mayor agregación a nivel de cuadrante con mayores valores de D ; luego, con mayor nivel de incidencia y el paso del tiempo, el foco podría tener mayor representatividad a nivel de finca y se daría una agregación apreciable en esta última escala. Esto último podría haber ocurrido en la mayoría de las fincas evaluadas, pero con claras excepciones, como se apreció en JUN. Por el contrario, y como se logró observar

con mayores daños y posiblemente mayores poblaciones y/o movilidad del insecto, habría mayor diseminación y la agregación a nivel de cuadrante sería menor, asimismo habría aleatorización de focos y menor agregación a nivel de finca. De esta forma, el patrón aleatorio estuvo relacionado con mayores daños por CS, como se puede apreciar en la Figura 22.

Los adultos de *C. sordidus* son de vida de libre (1 a 4 años) y su movimiento es de 35 metros cada 3 días o 60 metros en 5 meses. Este insecto tiene un hábito gregario y se mueve principalmente durante las noches, su oviposición (1 a 4 huevos por semana) se da principalmente en la superficie de los cormos y el daño que realizan sus larvas son galerías como lo apreciado en las plantas evaluadas. Su desarrollo biológico está relacionado con la temperatura y su movimiento con la humedad ambiental (higrotropismo), son mayormente atraídos por plantas en estrés, restos de cormos o residuos frescos de pseudotallos cortados, principalmente en plantaciones luego de floración. El movimiento de este insecto a largas distancias es por medio de material de siembra y desde fincas abandonadas o de mayor edad hacia nuevos campos (Jacobsen et al., 2018; Delaplace et al., 2023).

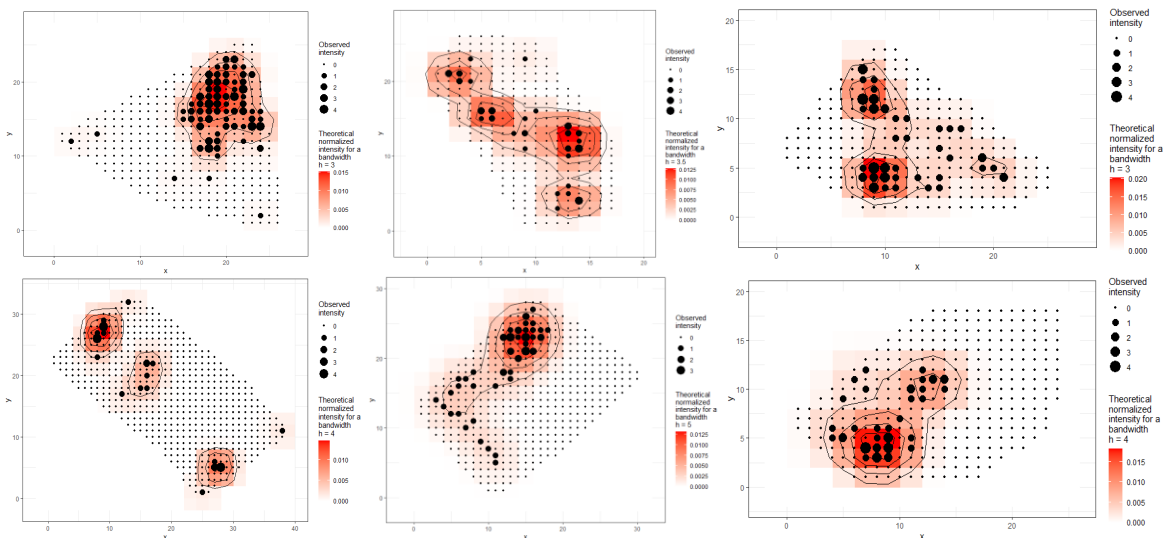


Figura 22: Distribución espacial de las unidades muestrales de tamaño efectivo en fincas con mayores daños por CS según MAPComp y visualización de nuevos focos a mayores escalas asociados con mayores daños y la variedad Isla

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que probablemente exista relación entre la población de *C. sordidus* y la dispersión de los propágulos de Foc, lo que hace necesario que las estrategias de manejo de la MF integren este punto, como en la situación actual de la mayoría de campos evaluados donde se hace necesaria una mayor intervención de los

agricultores con el uso material de propagación libre de CS, trampas con feromonas, captura manual, uso de controladores biológicos o productos que deben ser desarrollados para disminuir la población y/o movimiento de este insecto plaga, más aún para mitigar o reducir el efecto y diseminación a partir de una emergencia de Foc R4T en estas zonas.

Al analizar la intensidad de manejo del cultivo como menor, regular o mayor, de forma general hubo agregación en los tres grupos con los dos parámetros del modelo que difirieron de 0 y 1, respectivamente ($p < 0.001$) (Figura 23a). Hubo diferencias estadísticas entre los parámetros de la BPL del conjunto de fincas según las intensidades de manejo. El grupo de manejo de cultivo más intenso presentó estadísticamente menor agregación con los menores valores de los parámetros de agregación inicial e influencia de la incidencia de la MF sobre esta: $\log_e(A) = 1.1500 \pm 0.4334$; $b = 1.1173 \pm 0.06945$; $R^2 = 0.952$ ($p < 0.001$). Por otro lado, las fincas con manejo regular: $\log_e(A) = 1.7759 \pm 0.3513$; $b = 1.2070 \pm 0.0548$; $R^2 = 0.959$, solo presentaron diferencias estadísticas en el parámetro de agregación inicial (A_p) pero no en el parámetro b , al compararlas con las fincas con manejo menos intenso: $\log_e(A) = 1.9799 \pm 0.5493$; $b = 1.2378 \pm 0.0884$; $R^2 = 0.938$. Las fincas con manejo menos intenso presentaron mayores niveles de agregación y mayor efecto de la incidencia sobre esta (Figuras 23a).

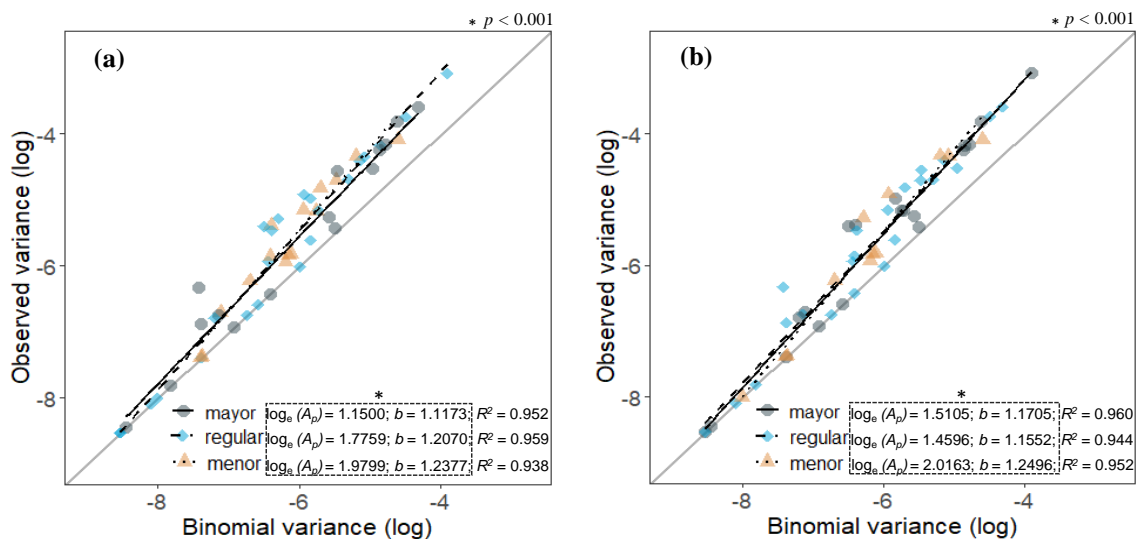


Figura 23: Relación entre el logaritmo de la varianza observada y el logaritmo de la varianza teórica para una distribución binomial de los datos de incidencia de la MF en 53 fincas evaluadas en Perú según (a) intensidad de manejo y (b) conocimientos sobre la MF

Nota: Se muestra la regresión lineal (a) para todos los campos según menor ($n = 15$), regular ($n = 23$) y mayor intensidad de manejo general del cultivo ($n = 15$) y (b) con menor ($n = 12$), regular ($n = 22$) y mayor conocimiento sobre la MF ($n = 19$). Se presentan los parámetros de la ley de potencia binaria ($\log(A_p)$ y b).

En la Figura 23b se comparan las categorías del nivel de conocimientos sobre la MF. Los conjuntos de datos clasificados como de menores ($\log_e(A_p) = 2.0163 \pm 0.5611$; $b = 1.2496 \pm 0.0887$; $R^2 = 0.952$), regulares ($\log_e(A_p) = 1.4596 \pm 0.4002$; $b = 1.1552 \pm 0.0630$; $R^2 = 0.944$) y mayores conocimientos ($\log_e(A_p) = 1.51054 \pm 0.36066$; $b = 1.17057 \pm 0.05767$; $R^2 = 0.960$) presentaron variaciones significativas en el nivel de agregación y, en cada caso, los dos parámetros de la BPL variaron de 0 y 1, respectivamente ($p < 0.001$). Las diferencias entre ambos parámetros de la BPL fueron significativas entre los grupos de mayor y menor conocimiento sobre la MF ($p < 0.001$), pero estas no fueron significativas entre los grupos de mayor y regular conocimiento. En las fincas con menores conocimientos de la MF, la incidencia de la enfermedad fue más agregada y el nivel de este patrón espacial fue más influenciado por la incidencia de la MF (Figura 23b).

La región en donde se tuvo más frecuentemente un manejo más intenso y existió mayor conocimiento sobre la MF fue JUN. Esto sugirió que en las zonas donde la enfermedad fue más conocida, probablemente por ocasionar mayores daños, donde hubo mayor acceso a capacitaciones y donde se dio mayor empleo de insumos, existieron factores que favorecieron la propagación de Foc, como fue el caso de la región JUN y las fincas donde se empleó la variedad Isla, siendo conocido que en esta región y variedad se busca mayor productividad con mayores intensidades de manejo y labores culturales.

Los resultados de menor agregación con manejo más intenso coincidieron con los indicados por Heck (2019) y las mayores incidencias con los de Oyesigye et al. (2021). Adicionalmente, Chittarath et al. (2022), en un estudio realizado en Laos y Vietnam, indicaron que la enfermedad y su distribución estuvo asociada con el desconocimiento de la MF por los agricultores y con la obtención de material de siembra de campos vecinos, esto fue contradictorio a lo que ocurrió en JUN, donde la enfermedad fue más conocida.

Según las temperaturas climáticas medias anuales, sean mayores o menores que 20°C, en ambos casos se rechazó la hipótesis nula de aleatoriedad para el conjunto de datos y se ajustaron a la ley de la potencia binaria de Taylor con parámetros distintos de cero y uno ($p < 0.001$) (Figura 24a). Las fincas localizadas en zonas con temperaturas mayores que 20°C presentaron mayor agregación e influencia de la incidencia con un mejor ajuste al modelo ($\log_e(A_p) = 1.9361 \pm 0.35458$; $b = 1.2103 \pm 0.0528$; $R^2 = 0.978$), al compararlas con las fincas donde hubo menores temperaturas ($\log_e(A_p) = 1.5273 \pm 0.35458$; $b = 1.1783 \pm$

0.0528; $R^2 = 0.938$). Los dos parámetros de la BPL difirieron estadísticamente entre categorías ($p < 0.001$) (Figura 24a).

Las fincas evaluadas estuvieron localizadas en altitudes entre 132 y 1505 msnm, con valores promedio y mediana de 841.425 y 895 msnm, respectivamente. Con respecto al efecto de la altitud media de las fincas sobre la agregación, sean mayores o menores a 900 msnm, esta tuvo influencia general en el nivel de agregación y sobre el efecto de la incidencia sobre esta, en ambos casos la ley de la potencia binaria de Taylor describió los datos de incidencia de la MF al obtenerse parámetros $\log_e(A_p)$ y b mayores que 0 y 1, respectivamente ($p < 0.001$) (Figura 24 b). Los campos localizados a altitudes menores que 900 msnm presentaron mayor agregación y efecto de la incidencia sobre el patrón espacial, con los parámetros: $\log_e(A_p) = 1.86462 \pm 0.30153$; $b = 1.20790 \pm 0.04656$; $R^2 = 0.964$; mientras que en las fincas localizadas a mayores altitudes, la agregación fue menor: $\log_e(A_p) = 1.35680 \pm 0.35180$; $b = 1.15805 \pm 0.05742$; $R^2 = 0.944$.

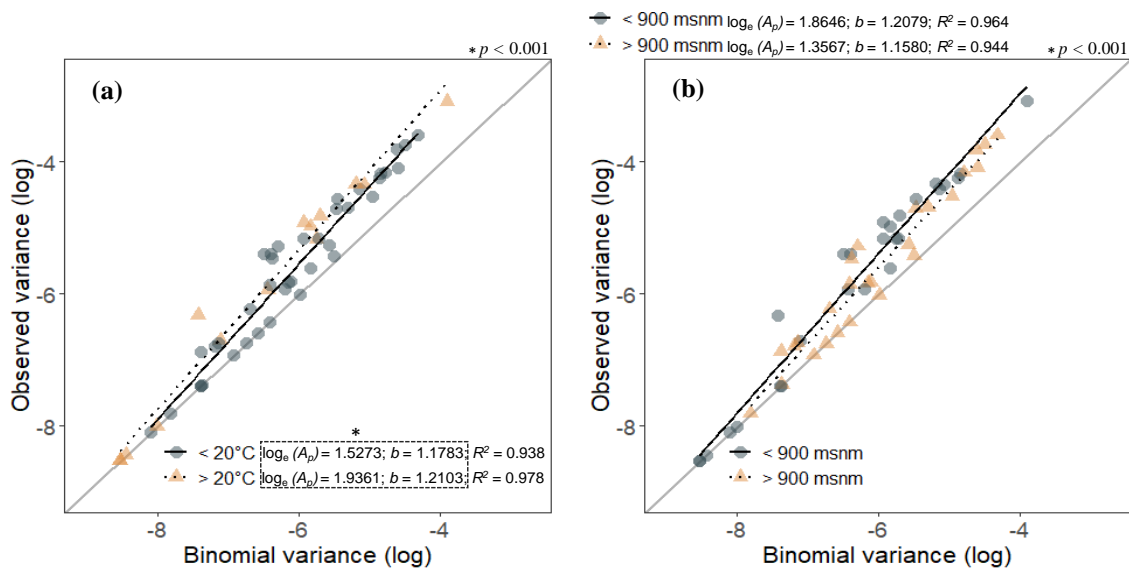


Figura 24: Relación entre el logaritmo de la varianza observada y el logaritmo de la varianza teórica para una distribución binomial de los datos de incidencia de la MF en 53 fincas evaluadas en Perú (a) según temperaturas y (b) altitudes climáticas medias

Nota: Se muestra la regresión lineal para todos los (a) campos localizados a temperaturas climáticas anuales medias menores que 20 °C ($n = 39$) y mayores que 20 °C ($n = 14$); y de los (b) campos ubicados en altitudes mayores que 900 msnm ($n = 27$) y menores que 900 msnm ($n = 26$). Se presentan los parámetros de la ley de potencia binaria ($\log(A_p)$ y b).

El ambiente (clima, tiempo atmosférico y propiedades del suelo) puede influir sobre la ocurrencia y dinámica de las enfermedades de plantas. El tiempo atmosférico afecta la biología del patógeno y su hospedante, modulando el desarrollo de la enfermedad en el

tiempo, por lo que los parámetros relacionados a esta característica no se tomaron en cuenta debido a la naturaleza de las evaluaciones y enfermedad. El clima es el promedio de mediciones del tiempo atmosférico durante grandes períodos de tiempo en un área geográfica apreciable y puede determinar la predominancia de patógenos y hospedantes en las regiones y, por lo tanto, la distribución espacial e intensidad de las enfermedades (Alves, 2022). Esto permite dilucidar o relacionar los efectos del ambiente (temperatura, humedad relativa, humedad de las hojas y las precipitaciones) sobre las enfermedades y la distribución de estas en el paisaje agrícola, así como el riesgo de ocurrencia de estas.

Alkhalifah et al. (2023), indicaron que a escala global los hongos pertenecientes a *Fusarium oxysporum* pueden presentar como factor limitante la temperatura anual media y un amplio rango óptimo de precipitación anual media, lo que hace relevante el estudio a escala de paisaje de las condiciones ambientales y su efecto sobre la MF. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que los efectos del cambio climático serían aumento de temperatura y alteraciones de las precipitaciones (Olivares et al., 2021).

Las diferencias en los patrones espaciales en función de temperaturas y lluvias climáticas siguen la tendencia de las características particulares de las localidades en donde se ubicaron las fincas. La mayoría de las fincas que presentaron mayores incidencias de la MF, patrones aleatorios y menor agregación se localizaron en JUN y fueron de la variedad Isla (Figuras 25 y 26), estas estuvieron localizadas en zonas con mayores precipitaciones y altitudes y por lo tanto menores temperaturas. Estos resultados fueron contradictorios con los indicados por Heck (2019) y Karangwa (2016), pero coincidieron con los de Oyesigye et al. (2021). No existió una relación directamente macada solo por el clima, sino que las características del cultivo, culturales y de manejo influyeron en la intensidad de la enfermedad y sus patrones espaciales. Las diferencias podrían deberse a la interacción entre el ambiente, variedad y prácticas de manejo, resaltando las condiciones ambientales en la mayoría de las fincas en JUN, con uso de la variedad Isla y mayores daños por CS, probablemente favorecido por el ambiente (lluvias y hospedante) y la dinámica de redes de semillas, lo que estaría relacionado a la mayor prevalencia de la MF en la región de JUN.

Las variables que influyen en las enfermedades y el resultado de esto sobre el rendimiento de los cultivos también pueden ser susceptibles a efectos de la heterogeneidad de los patrones climáticos en una región geográfica, como es demostrado en un reciente estudio en Colombia (Rodríguez-Yzquierdo et al., 2023). Debido a que los aumentos en la

frecuencia y la intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos pueden ayudar a propagar patógenos a nuevos lugares (Singh et al., 2023), como se ha observado su ocurrencia en Piura con Foc R4T con un incremento significativo del número de focos por efecto de lluvias e inundaciones ocasionadas por el ciclón Yaku el año 2023, por lo cual son necesarios estudios sobre el riesgo debido a las condiciones ambientales a nivel de paisaje en el Perú y tomando en cuenta las características de los sistemas de producción.

4.6. Determinación de los factores de manejo cultural que afectan la intensidad y distribución espacial de la MF

El manejo del cultivo y de la enfermedad afectan la dinámica de MF (Dita et al., 2018; Dita et al., 2020), por lo que se realizó el Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA) para el conjunto de datos sobre prácticas culturales, conocimiento del cultivo y enfermedad, que fueron categorizados y explicaron el 38.1 % de la variabilidad total, además, logró agrupar las fincas en tres conjuntos bien definidos según el nivel de manejo de cultivo como menor, regular y mayor intensidad (elipses de la Figura 25). La categoría de mayor intensidad de manejo estuvo asociada con la preferencia y frecuencia de aplicaciones de productos químicos.

Las características cualitativas seleccionadas se agruparon en dos dimensiones, una de las cuales explicó el 25.3% de las diferencias, donde las fincas con mayor intensidad de manejo estuvieron agrupadas en conjunto (Figura 25). El grupo de fincas con mayor intensidad de manejo estuvo negativamente correlacionado con la asociación de cultivos, el uso de la variedad Seda, las regiones CUS y AMA, el patrón agregado de la MF, la edad de plantación y temperaturas. Este grupo de fincas estuvo asociado con mayores daños por CS, el uso de la variedad Isla en JUN, el sistema de producción en monocultivo, el patrón aleatorio y/o menor agregación, mayores precipitaciones y mayores incidencias de la MF. Adicionalmente, las fincas en este grupo presentaron menor criterio de selección de material de siembra con obtención de hijuelos de zonas distantes y selección según el estatus visual externo de la planta madre, mayor manejo, destrucción y distribución de residuos de plantas afectadas por la MF, mayor conocimiento y percepción del riesgo sobre la MF, existencia de fincas abandonadas por la MF, reemplazo de variedades y mayor empleo y frecuencia de aplicación de herbicidas e insecticidas químicos, especialmente en la provincia de Chanchamayo.

Por otro lado, el grupo de fincas con manejo menos intenso estuvo asociado con los patrones espaciales agregados, el empleo de la variedad Seda, menores incidencias de la MF, nulo o bajo empleo de insumos químicos (especialmente herbicidas), menor conocimiento y percepción sobre la MF, falta de manejo de plantas con síntomas por la MF, las zonas CUS (La Convención) y AMA, selección de material de siembra en la propia finca y con mayores precipitaciones; asimismo, agrupó fincas con mayor edad de plantación y ubicadas en zonas con menores precipitaciones y menores daños por CS.

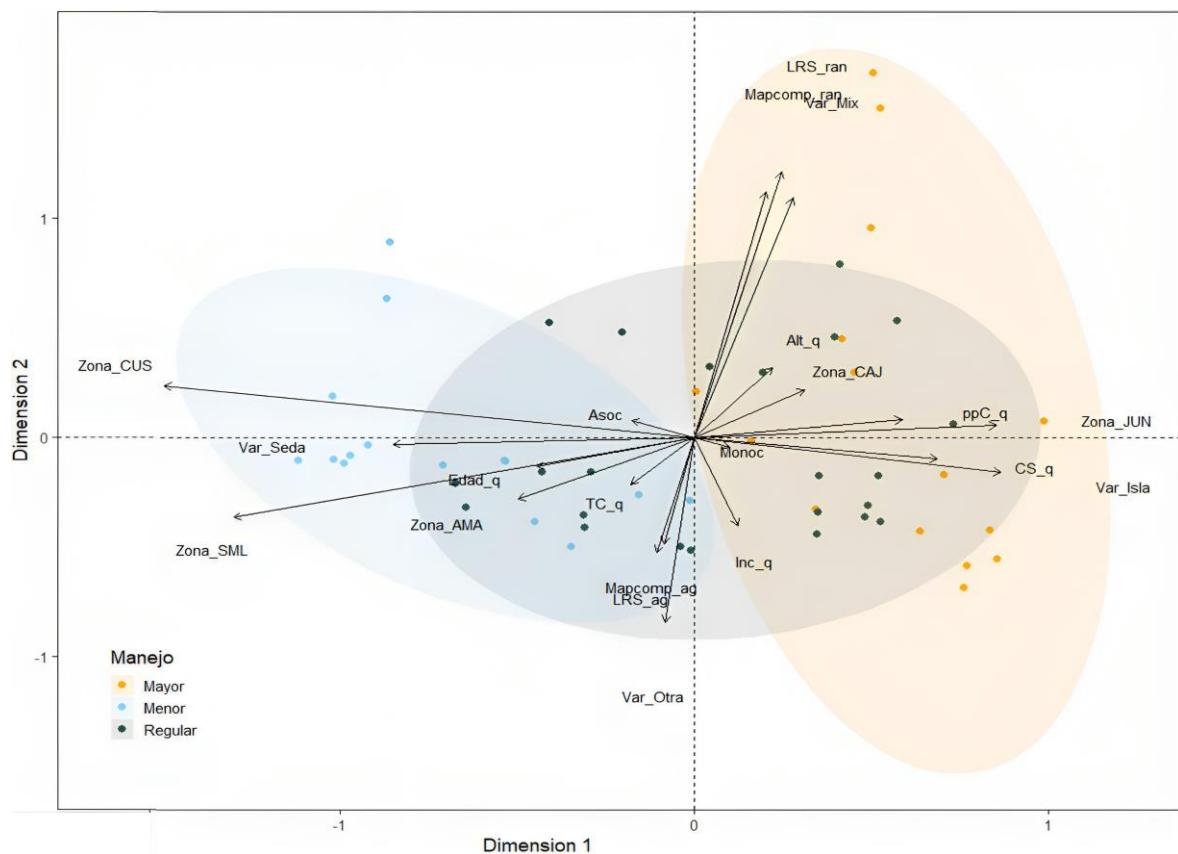


Figura 25: Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA) a partir de datos cualitativos de 53 fincas evaluadas para la incidencia de la Marchitez por Fusarium (MF) de plátanos y bananos en cinco zonas en Perú

Nota: Las coordenadas de los conjuntos de datos de los campos se identificaron por puntos individuales y se agruparon según la intensidad o nivel de manejo. Las variables complementarias de variedades, incidencia, patrón espacial obtenido por LRS y MAPComp, zona, sistema, edad de plantación, daño por CS, altitud y clima, se presentaron como información suplementaria. Las elipses representan la distribución t multivariada con un intervalo de confianza del 90 % para cada nivel de manejo. La variabilidad correspondiente a cada dirección fue representada en los ejes x e y como 25.3 y 12.8 %, respectivamente.

Los resultados obtenidos en este estudio y el efecto de la intensidad de manejo sobre la agregación e incidencia de la MF no concuerdan totalmente con los indicados en Brasil por Heck (2019), quien no encontró relación entre manejo y el patrón espacial, pero si con la

incidencia de la MF; esto último coincidió con los resultados actuales y los de Oyesigye et al. (2021) en una zona con alta prevalencia de la MF en África. Las diferencias en cuanto a la asociación de manejo y determinadas localidades y variedades fueron coincidentes a lo encontrado por Heck (2019). Las diferencias del efecto del manejo sobre los patrones espaciales probablemente fueron debidas a que en dicho estudio en Brasil la incidencia de la MF fue mucho mayor que la observada en este estudio, lo que pudo impedir variaciones de los patrones agregados consecuentes de las altas incidencias de la MF, indistintamente si el manejo haya sido intensivo o primitivo.

Haddad et al. (2018) compararon diferentes manejos del cultivo y obtuvieron menores incidencias de la MF con el “mejor” manejo, el que fue contrario al que se categorizó como manejo más intenso en el presente estudio, pues el primero empleó cobertura vegetal, insumos orgánicos y nula adición de insumos químicos. Las características más resaltantes del grupo de fincas con manejo más intenso fueron menor agregación y mayor incidencia de la MF asociadas con el mayor uso de herbicidas e insecticidas químicos, relacionándose a la abundante presencia de malezas y mayores daños por CS, por el uso más frecuente de la variedad más susceptible a esta plaga en la región JUN: Isla (Iholena) y las mayores precipitaciones.

Miembros de *Fusarium oxysporum* han sido detectados como endófitos en diferentes malezas (Ploetz, 2015; Deltour, 2017b) y algunos pueden ser patogénicos en musáceas (Henessy et al., 2005). Por su parte, Anderson y Aitken (2021) demostraron que el empleo de herbicidas (glifosfato, atrazina o paraquat) en plantas de banano infectadas por Foc R4ST aceleró la colonización saprofitica en tejidos senescentes y aumentó la producción de propágulos de Foc. Esto podría estar ocurriendo en las fincas con elevado uso de herbicidas e induciendo la proliferación de Foc, de estar infectando malezas de forma asintomática, y acelerar la propagación del patógeno con la consecuente aparición de focos de forma aleatoria y/o menor agregación de la MF; sin embargo, no existen reportes de las malezas asociadas a plátanos y bananos, ni su relación con Foc en el Perú.

La región JUN se presentó como una zona importante para la comprensión de la epidemiología de la MF. Las mayores prevalencia e incidencias de la MF en esta región y la preferencia en comprar material de siembra de zonas distantes, así como los factores que se asociaron a la enfermedad y menores agregaciones, hicieron de JUN una región con alto riesgo de diseminación de Foc R4T, en caso de darse una incursión futura en esta zona.

Con respecto al intercambio o adquisición de material de siembra, la diseminación de *Foc* se da principalmente a través de cormos infectados (Stover, 1962), por lo que una de las principales medidas de control es el establecimiento de nuevas plantaciones de banano y/o plátanos a partir de material de siembra libre del patógeno; sin embargo, en todo el mundo es prácticamente imposible evitar la llegada del patógeno a una plantación de musáceas (Jones, 2019), por lo que debería existir un sistema nacional o regional de producción de material de siembra libre de plagas y enfermedades en Junín y otras regiones de Perú. Además, no se conocen las preferencias y conexiones de redes de semillas en esta zona ni en otras del país, lo que ayudaría a comprender y vigilar la epidemiología de la MF a una escala regional, así como para difundir futuras tecnologías, teniendo en consideración que en la mayoría de las regiones del Perú ocurren sistemas informales de producción y transacción de material de siembra (Garret, 2021; Nduwimana et al., 2022).

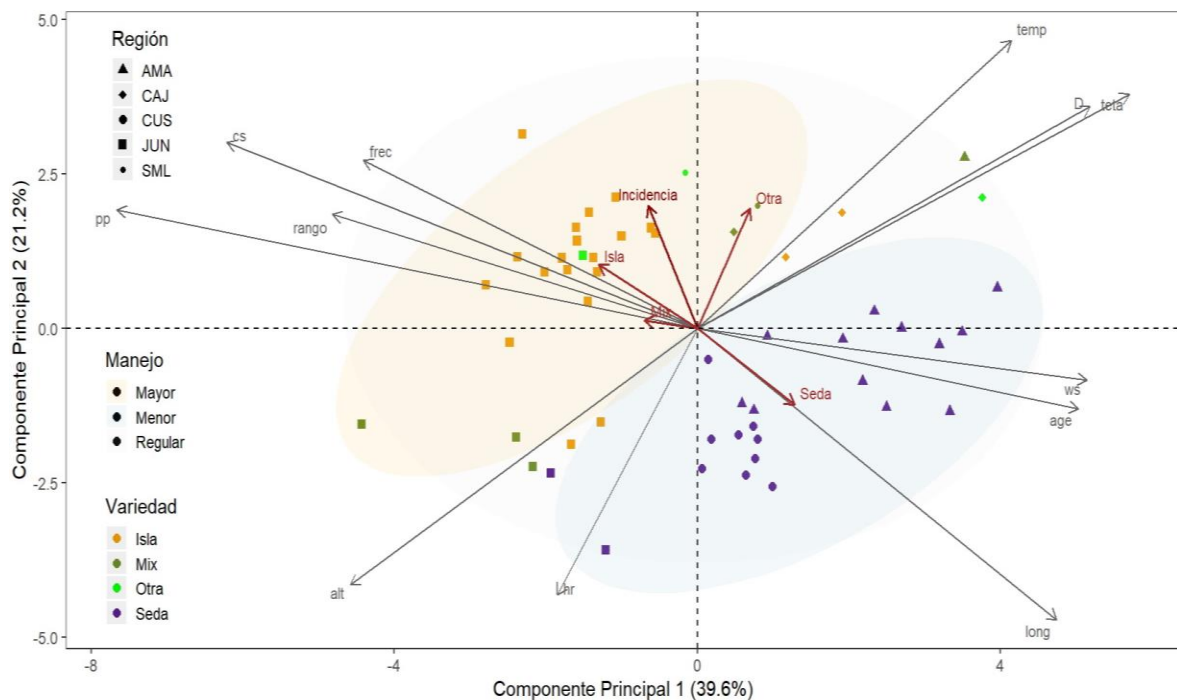


Figura 26: Análisis de Componentes Principales (PCA) a partir de datos cuantitativos de 53 fincas evaluadas para la incidencia de la Marchitez por *Fusarium* (MF) de plátanos y bananos en cinco zonas en Perú

Nota: Las coordenadas de los conjuntos de datos de los campos se identificaron por puntos individuales y se agruparon según la intensidad de manejo. Están representadas como líneas grises los factores con asociación significativa ($p < 0.001$); además, los cultivares e incidencia están representadas como líneas rojo oscuro. Las elipses representan la distribución t multivariada con un intervalo de confianza del 90 % para cada nivel de manejo. La variabilidad correspondiente a cada dirección fue representada en los ejes x e y, en total representan al 60.8 %.

El PCA de las variables de clima y características cuantitativas de las fincas, nivel de intensidad de manejo del cultivo e intensidad y nivel de agregación de la MF explicó el 60.8 % de la variabilidad total (Figura 26). El primer componente explicó el 39.6 % de la variabilidad total. Los factores que estuvieron incluidos y contribuyeron más a este componente fueron daños por CS, nivel de agregación a menor escala, velocidad del viento, edad del cultivo, rango práctico de la semivarianza, altitud, frecuencia de aplicación de productos químicos y precipitaciones. El segundo componente principal explicó el 21.2% de la variabilidad e incluyó factores de temperatura, intensidad de agregación, longevidad de plantación, altitud y humedad relativa.

La incidencia de la MF estuvo correlacionada con la altitud y precipitaciones, daños por CS, frecuencia de aplicación de herbicidas, pero negativamente correlacionada con la edad y longevidad máxima del cultivo; además, estas fincas con mayor incidencia estuvieron agrupadas en el grupo de manejo más intenso del cultivo. Comparando variedades, la incidencia estuvo asociada a la variedad Isla (Iholena, AAB). Hubo asociación entre las fincas localizadas en JUN, la variedad Isla, la incidencia de la MF, presencia de fincas abandonadas en la zona (mayormente en zonas de mayor altitud), no realización de manejo de plantas enfermas y donde los agricultores indicaron que la enfermedad que causa mayores daños es la MF, mayores daños por CS y mayor uso de herbicidas.

Las mayores intensidades de la MF y menores distancias entre fincas afectadas por la enfermedad se presentaron en la región JUN, donde no debería descartarse la diseminación de propágulos de Foc por el viento, al existir evidencia de producción de esporodoquios y esporulación de conidias a partir de hojas senescentes de plantas infectadas (Wairman y Aitken, 2018; Heck, 2019). La mayoría de las fincas en esta región estuvo localizada a más de 900 msnm, pero las fincas de mayores incidencias se presentaron en las menores altitudes, lo que estuvo asociado con los menores parámetros de agregación, como se esperaría para este tipo de diseminación aérea. Además, en dicha localidad fue común que los agricultores abandonen las fincas afectadas gravemente por la MF, las que pudieron ser fuente de inóculo para las fincas aledañas y localizadas a menores altitudes. Relacionado con esto, Mengesha et al. (2018) indicaron la asociación entre la mayor probabilidad de infección y la llegada de inóculo de Foc a partir de fincas con la enfermedad cercanas a otras en un área con alta prevalencia de la MF; esto coincidió con lo reportado por Karangwa et al. (2016) y podría asemejarse a la situación de la región JUN.

El hecho de que las fincas afectadas por la MF en la región JUN (Chanchamayo) se localizaran aproximadamente a 1 km de distancia aportó peso a la hipótesis de una probable dispersión a través del viento y/o material de siembra infectado. Adicionalmente, la preferencia de los agricultores por obtener material de siembra de zonas distantes a la provincia o región es un indicador de que en estas zonas existe una elevada presión de inóculo, lo que conllevó a que los productores escojan material de propagación de zonas distantes; sin embargo, esto pudo conllevar a un mayor riesgo de introducción de inóculo externo a través de esta vía, como se apreció con la mayor proporción de campos con patrón aleatorio a nivel de finca según SADIE (I_a). Esto último podría aportar en explicar por qué en JUN las epidemias en su fase inicial (bajas incidencias) presentaron plantas y focos dispersos en la extensión de las fincas en mayor proporción que otras regiones.

En la misma región JUN, adicionalmente a la potencial contribución de CS a la menor agregación a nivel de cuadrante y mayor expansión de la MF a ese nivel, las prácticas de manejo contribuyeron a la expansión de la MF a mayor escala (Dita et al., 2018; Heck et al., 2021b). Esto se pudo apreciar en el grupo de fincas con mayor intensidad de manejo del cultivo, que agrupó la mayor cantidad de campos cuyas incidencias se ajustaron al modelo esférico de la semivarianza y que presentaron mayores valores de rango práctico. Este nivel de manejo pudo haber contribuido al aumento de la intensidad y distribución espacial de la MF aumentando el tamaño de los focos a partir de un origen menor y al origen de nuevos focos. Lo indicado podría estar ocurriendo en las fincas en asociación con cultivos como frutales debido a la necesidad de tránsito de personas para realizar labores culturales de estos últimos, así como en fincas en monocultivo debido a la gran demanda de labores culturales en el cultivo de plátanos y bananos para lograr una mayor productividad, tal y como se sugiere en la región JUN. En favor a esta hipótesis, junto a la gran probabilidad de transmisión de Foc de planta a planta, se logró apreciar con el mapeo explícito por MAPComp y demás técnicas visuales, que la mayoría de los focos y expansión de estos como nuevos focos o posiciones de plantas con la enfermedad, siguieron una trayectoria en dirección a las líneas de plantío con una forma más o menos alargada.

El patrón predominante fue el agregado, pero existieron focos dispuestos de forma aleatoria, lo que pudo indicar que la principal fuente de inóculo primario fue el material de siembra infectado o sustrato infestado de los cultivos asociados, lo que representaría el principal riesgo de fuente de inóculo de Foc R4T a una región y de diseminación intrarregional. Esto coincidió con lo indicado por Moore et al. (1995), Plotez (2010) y

Román-Jerí (2012). El hecho de que las fincas afectadas por la MF en JUN tuvieran menores edades y mayores proporciones de fincas con patrones aleatorios según el I_a de SADIE, sumó evidencias a lo mencionado; por el contrario, en regiones donde existieron plantaciones con mayores edades y menores incidencias, el material de siembra fue seleccionado de fincas de la propiedad del productor en función de la producción de la planta madre y se presentaron las mayores agregaciones de la MF. Se enfatiza esta vía para ser tomada muy en cuenta en las estrategias de manejo de la enfermedad y para su análisis e implementación de tecnologías, resaltando el uso de camas térmicas para la producción artesanal de material de siembra proveniente plantas élite como alternativa al cultivo *in vitro* para un sistema de redes de semillas locales (Jones et al., 2019).

El hecho de que la MF tenga el patrón agregado en la mayoría de fincas, teniendo en cuenta que las fincas con estos patrones de distribución espacial son más fáciles de manejar que cuando la enfermedad está aleatorizada, resalta la importancia de la eliminación de las plantas sintomáticas lo más pronto posible para el manejo de la MF, así como de las plantas no sintomáticas circundantes, puesto que, mayormente la visualización de los síntomas es indicador de que el período de latencia de la enfermedad ha pasado y existe el riesgo de que los propágulos hayan sido dispersados, más aún de existir factores que sumen a esta dinámica espacial, tales como CS, lluvias, manejo y labores culturales intensos, hospedantes alternos, mal manejo de plantas enfermas, etc., los que deberían ser tomados en cuenta para disminuir su efecto sobre las epidemias ocasionadas por Foc.

Con respecto a las condiciones ambientales, la relación entre la epidemiología de la MF en condiciones de campo y la temperatura y precipitaciones no es muy clara; sin embargo, se conoce que Foc R4ST afecta variedades Cavendish solo en condiciones subtropicales y no en tropicales, como ocurren mayormente en Brasil luego de una temporada de frío y escasas precipitaciones (Dita et al., 2020); asimismo, Foc R1 puede tener mayor agresividad en algunas variedades en condiciones subtropicales y lo contrario en tropicales, como sucede con la variedad Lady Finger (Pome, AAB) (Dita et al., 2020). Esto indica que las condiciones ambientales tienen efecto sobre el desarrollo y patogénesis de Foc.

Adicionalmente, Moore (1995) indicó que bajas temperaturas afectan la susceptibilidad de la variedad Williams del subgrupo Cavendish debido a que reduce la asimilación de CO_2 y la eficiencia fotosintética, pero este efecto no se da en mutantes de Cavendish. Por otro lado, las condiciones ambientales también pudieron tener efectos sobre los posibles

antagonistas de Foc presentes en el suelo, así como el microbioma de los plátanos y bananos (Dita et al., 2020). Adicionalmente, los aislamientos obtenidos de cultivos axénicos en el presente trabajo mostraron diferentes preferencias de temperaturas para su desarrollo *in vitro* (no mostrado), siendo que los obtenidos de localidades con menores temperaturas se desarrollaron más rápido en condiciones menores que 25°C, a diferencia de los obtenidos de zonas más cálidas, que lo hicieron mejor a 28°C.

Los plátanos y bananos cultivados en regiones tropicales son afectados principalmente por el régimen hídrico (Olivares et al., 2021), siendo indicado lo óptimo las latitudes inferiores a 10°, altitudes cerca de 100 msnm, temperaturas mínimas medias de 19°C y precipitaciones mayores que 100 mm por mes (Robinson y Saúco, 2010). La irrigación en condiciones de secano, como ocurrió en las fincas evaluadas, hace que plátanos y bananos estén condicionados a sufrir un período de estrés hídrico. Por el contrario, en zonas con elevada precipitación, existe el riesgo de inundaciones o anegamiento del suelo y que podría haber sido agravado por una posible compactación de suelo, en especial en las fincas con manejo más intenso en JUN. Esto colaboraría en afectar la fisiología del hospedante en su respuesta frente a Foc y hacerlo más susceptible (Olivares et al., 2021).

Por otro lado, las condiciones de menores temperaturas en JUN no dejarían descartar de que las cepas que afectaron en esta y otras localidades se traten de Foc R4ST, la que se podría comportar como Foc R1 en condiciones tropicales (Dita et al., 2020). Adicionalmente, al igual que en este estudio, Mengesha et al. (2018) encontraron mayores intensidades de la MF asociadas a mayores precipitaciones; por su parte, Heck (2019) obtuvo mayor captura de esporas del patógeno con mayores precipitaciones. Asimismo, áreas con mayores precipitaciones junto a elevada probabilidad de anegamiento del suelo, inundaciones o desbordes de ríos, tienden a tener fincas con mayor intensidad de la MF (Dita et al., 2018), lo que probablemente sea común en la selva peruana.

4.7. Estimación de pérdidas relacionadas con la MF en plátanos y bananos

Se estimaron las pérdidas en rendimiento asociadas a la MF en las 53 fincas evaluadas, las que variaron entre 6.2 y 1134.44 kg x ha⁻¹ x año⁻¹, en promedio de 207.95 kg x ha⁻¹ x año⁻¹ y mediana de 103.99 kg x ha⁻¹ x año⁻¹. No existieron diferencias estadísticas entre regiones ni entre variedades ($p > 0.05$). Sin embargo, numéricamente SML presentó las mayores pérdidas de rendimiento, seguido de JUN; esto tuvo relación con la incidencia de la MF y el mayor rendimiento en Yurimaguas correspondiente a las dos fincas de la región. Las

máximas pérdidas económicas alcanzaron 1013.43 S/. x ha⁻¹ x año⁻¹, el promedio fue de 179.72 S/. x ha⁻¹ x año⁻¹ y la mediana de 73.04 S/. x ha⁻¹ x año⁻¹. No existieron diferencias estadísticas para las pérdidas económicas entre regiones ni variedades ($p > 0.05$).

Se visualizó una relación lineal positiva para las relaciones entre las incidencias de la MF y las pérdidas en rendimiento estimadas, así como entre las incidencias de la MF y las pérdidas económicas estimadas (Figura 27). En cada relación, el parámetro de intersección fue $\beta_0_{rdo} = 2.050$ (SE = 17.882) y $\beta_0_{ec} = -3.592$ (SE = 7.996), respectivamente; mientras que el parámetro de regresión lineal fue $\beta_1_{rdo} = 111.105$ (SE = 6.128) y $\beta_1_{ec} = 98.916$ (SE = 2.740), respectivamente. En ambos casos, los parámetros de intersección no fueron estadísticamente distintos de cero ($p > 0.05$); mientras que los parámetros de regresión si difirieron de cero ($p < 0.001$). Se calculó el intervalo del 95% de confianza (IC 95%) del parámetro β_1 para las pérdidas en rendimiento, el cual varió entre 98.801 y 123.408 Kg x ha⁻¹ x año⁻¹; mientras que para las pérdidas económicas la variación se dio entre 93.415 y 104.418 S/. x ha⁻¹ x año⁻¹.

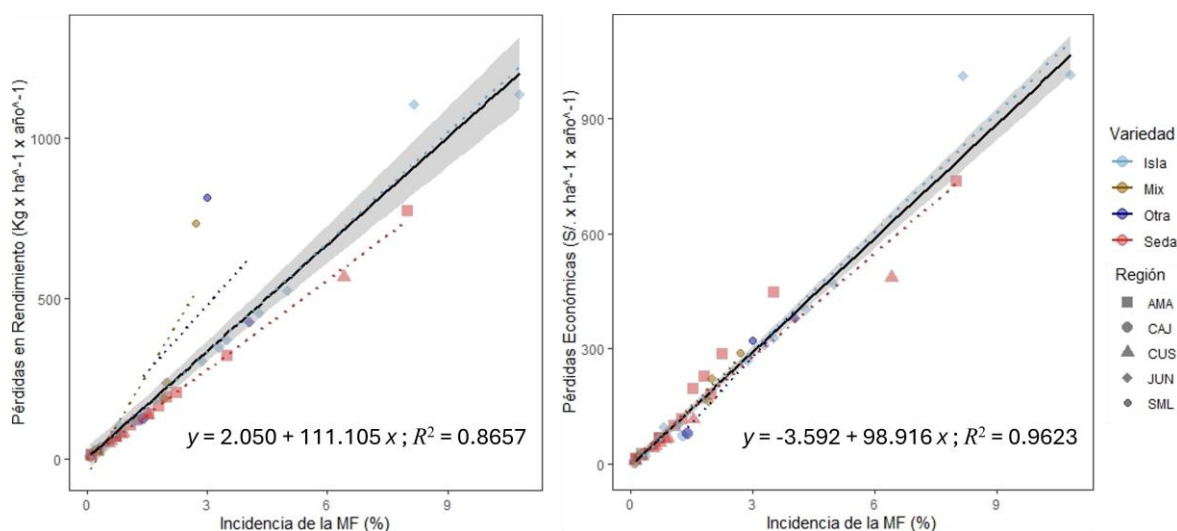


Figura 27: Regresión general (línea sólida continua) y regresión por variedades (líneas discontinuas) para la (a) relación entre la incidencia de la MF (%) y las pérdidas en rendimiento y (b) la incidencia de la MF (%) y las pérdidas económicas estimadas

Nota: Los intervalos de confianza (IC 95%) se presentan en ambas figuras como áreas sombreadas. Los puntos representan las 53 fincas evaluadas, los colores indican las diferentes variedades y las formas las distintas regiones en donde se localizó cada finca.

No existe información sobre la productividad real a nivel de variedades, ni sobre los precios reales en chacra de las diferentes variedades producidas en el Perú. En promedio, cada 1% de incidencia de la MF cuantificada resultó en pérdidas de producción estimadas en 111.1 Kg x ha⁻¹ x año⁻¹, esto fue menor que lo estimado por Heck et al. (2021a) en

Brasil con $184 \text{ Kg x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$, principalmente debido a las mayores incidencias y productividades. Adicionalmente, cada 1% de incidencia de la MF cuantificada resultó en pérdidas económicas estimadas en $98.916 \text{ S/. x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$. La incidencia media para todas las fincas evaluadas y afectadas por la MF resultó en 1.853%, lo que indicó pérdidas en producción estimadas en $205.70 \text{ Kg x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$ y pérdidas económicas estimadas en $183.29 \text{ S/. x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$, considerando todas las fincas.

Según la misma base de datos empleada, la productividad media en Sullana, Piura, donde se detectó Foc R4T por primera vez en el Perú (Acuña et al., 2022), fue de $37.81 \text{ Kg x ha}^{-1}$ y el precio medio fue de $0.973 \text{ S/. x ha}^{-1}$. No se encontraron datos sobre la incidencia de la MF causada por esta cepa debido a la erradicación; sin embargo, la incidencia en la finca afectada inicialmente fue del 30% (Acuña et al., 2022), lo que hace presumir que las pérdidas estimadas en producción y económicas asociadas con Foc R4T en las fincas de dicha localidad serían mucho mayores que las encontradas en el presente estudio, de seguir una similar relación lineal y sin contar las pérdidas indirectas. Adicionalmente, esta última y las cifras obtenidas en este estudio serían mucho menores que las pérdidas económicas estimadas para la MF causada por Foc R4T en Indonesia con 121 millones, Taiwán con 253 millones y Malasia con 14 millones de dólares de pérdidas anuales.

Lo indicado anteriormente refleja el impacto que podría tener Foc R4T en las pérdidas en producción y pérdidas económicas, de darse una expansión a la Selva y otras zonas del Perú. Suponiendo un caso hipotético del 15% de incidencia de la MF en las zonas evaluadas, esto causaría pérdidas en producción estimadas, con una confianza del 95%, entre 1482.015 y $1851.12 \text{ Kg x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$, asimismo, pérdidas económicas entre 1401.22 y $1566.27 \text{ S/. x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$. Teniendo en cuenta que la Selva peruana presenta el mayor área de producción de plátanos y bananos en el Perú, con 135 mil hectáreas, y que el consumo anual per cápita es mayor que en otras regiones del país, indicado por el INEI en hasta $104.3 \text{ Kg x persona}^{-1} \text{ x año}^{-1}$ y suponiendo que el 75 % de las fincas sean afectadas por la MF con la intensidad hipotetizada, se estimaría que, con el 95% de confianza, las pérdidas en producción serían entre 10003.60 y 12495.06 toneladas x año^{-1} y las pérdidas económicas entre 9458268.75 y $10572322.50 \text{ S/. x año}^{-1}$. Dichas cifras de pérdidas en producción podrían afectar directamente la seguridad alimentaria de hasta más de 119799 personas o del 3.26 % de la población de la selva peruana cada año.

El escenario actual frente a Foc R4T en las zonas evaluadas en la Selva peruana es que existe divergencia entre las regiones (sin presencia de esta raza) para los factores que favorecen la diseminación de Foc e intensidad de la MF, en la preferencia del uso de determinadas variedades susceptibles a Foc (indistintamente si corresponde a R1, R4T o R4ST), uso general de variedades (principalmente plátanos de cocción) resistentes a Foc R1 y las demás cepas predominantes en el país pero susceptibles a Foc R4T y que hacen que la intensidad de la enfermedad sea baja en el conjunto de regiones. Por lo tanto, es importante conocer la reacción de las variedades cultivadas en selva frente a Foc R4T, así como el efecto de las propiedades físicas y químicas de los suelos sobre las diferentes razas de Foc, para lo cual se deben realizar mayores estudios y empleando los enfoques y metodología de este trabajo.

Conocer las vías de introducción de Foc y los factores que favorecen su dispersión y contribuyen en la dinámica de la MF es crucial para implementar las estrategias de manejo efectivas contra la enfermedad y evitar pérdidas notables. El análisis de los resultados obtenidos ayudó a comprender mejor la heterogeneidad de los factores que influyen en la enfermedad para un adecuado diseño de estrategias a escala regional de las cepas de Foc presentes en el país, así como reducir el potencial impacto de Foc R4T. Los resultados obtenidos permiten direccionar estudios experimentales, así como iniciar el diseño de estrategias de manejo de la marchitez por *Fusarium* de plátanos y bananos en el Perú.

V. CONCLUSIONES

- a. La prevalencia global de la MF en las zonas evaluadas en la Selva peruana fue de 28.04% y la región JUN presentó la mayor prevalencia con 55.56%, seguido de AMA con 35.14%, mientras que en MDD no se encontraron fincas afectadas por la MF. La incidencia global de la MF fue baja, varió entre 0.09 y 10.81 %, con el promedio de 1.853 % y mediana de 0.9 %. La región con mayor incidencia de la MF fue JUN con el promedio de 2.163 % y mediana de 0.81 %. La intensidad de la enfermedad estuvo fuertemente asociada con la región JUN.
- b. La variedad con mayor incidencia fue Isla (AAB, Iholena) con el promedio de 2.21 % y mediana de 0.81 %, seguida de Seda (AAA, Gros Michel) con el promedio de 1.57 y mediana de 0.86 %). La preferencia de las fincas localizadas en JUN en emplear la variedad Isla le atribuyó a esta región los mayores valores de intensidad de la MF.
- c. El patrón de distribución espacial predominante en las zonas evaluadas de la Selva peruana a pequeña escala y a nivel de finca fue el agregado. La agregación dependió directamente de la incidencia de la MF y estuvo afectada por la variedad. Las fincas donde se empleó la variedad Isla presentaron menores agregaciones de la incidencia de la MF. Las fincas con mayores daños por CS presentaron menores agregaciones de la incidencia de la MF. Las fincas con mayor intensidad de manejo del cultivo y mayores conocimientos sobre la MF presentaron menores agregaciones de la incidencia de la MF. Las fincas localizadas en zonas con mayores altitudes y menores temperaturas presentaron menores agregaciones de la incidencia de la MF.
- d. El manejo del cultivo afectó el nivel de agregación e incidencia de la MF. Fincas con manejo más intenso y mayor uso y frecuencia de aplicación de productos químicos presentaron menor agregación y mayor incidencia, esto se dio principalmente en JUN con el uso de la variedad Isla en fincas de menores edades y mayores daños con CS.

- e. Las pérdidas en rendimiento a nivel regional variaron entre 6.2 y 1134.44 kg x ha⁻¹ x año⁻¹, en promedio de 207.95 kg x ha⁻¹ x año⁻¹ y, en general, cada 1% de incidencia de la MF ocasionó pérdidas en rendimiento medias estimadas de 111.105 kg x ha⁻¹ x año⁻¹; mientras que 1% de incidencia de la MF ocasionó pérdidas económicas medias estimadas en S/. 98.916 x ha⁻¹ x año⁻¹. Considerando todas las fincas y en la incidencia media de 1.853%, las pérdidas en producción estimadas fueron de 205.70 Kg x ha⁻¹ x año⁻¹ y las pérdidas económicas estimadas de 183.29 S/. x ha⁻¹ x año⁻¹.

VI. RECOMENDACIONES

- a. Cuantificar la intensidad de la MF y realizar análisis espacio temporales en distintas localidades como Junín, Tingo María, Lima, Piura, Tumbes, etc., para mejorar la comprensión de la epidemiología de la MF y los factores asociados a la intensidad de la enfermedad y propagación de Foc.
- b. Realizar estudios de epidemiología comparativa evaluando estrategias de manejo frente a la MF en campo (variedades resistentes, controladores biológicos, rotación de cultivos, coberturas vegetales, suelos supresivos, frente a CS, nematodos, malezas, etc.) y evaluar el efecto de esto sobre la dinámica epidemiológica de la MF.
- c. Identificar las malezas asociadas a Foc en el Perú. Verificar el efecto del empleo de herbicidas sobre la dinámica de la MF y aumento de la propagación de Foc.
- d. Realizar un análisis de redes de los sistemas de semillas en localidades de interés y con alta vulnerabilidad frente a una emergencia de Foc R4T, por ejemplo, Junín. Extender este estudio a una escala mayor.
- e. Identificar las razas de las cepas aisladas a partir de xilema de plantas afectadas por la MF de las zonas evaluadas en la Selva peruana mediante detección de genes SIX a través de una prueba de amplificación isotérmica (LAMP) y realizar pruebas de patogenicidad con variedades diferenciales.
- f. Realizar pruebas de patogenicidad de las cepas aisladas en las variedades afectadas y en las del subgrupo Cavendish (AAA).
- g. Realizar mayores estudios en la variedad Isla (AAB, Iholena).
- h. Enriquecer colecciones de aislamientos peruanos de Foc y realizar estudios poblacionales del patógeno.
- i. Trabajar con el modelo Isla (Iholena, AAB) x Foc (de zonas con mayor intensidad y menor agregación y Foc R4T) para evaluar medidas de manejo y/o control.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkhalifah, D. H. M, Damra, E., Melhem, M. B. & Hozzein, W. N. (2023). Fungus under a Changing Climate: Modeling the Current and Future Global Distribution of *Fusarium oxysporum* Using Geographical Information System Data. *Microorganisms*; 11(2):468.
- Alves, K. (2022). Disentangling Environmental Effects on Plant Disease Epidemics at the Regional Scale. [PhD Thesis, Universidade Federal de Vicosa, Brazil. 84 p.]
- Anderson, J. & Aitken, E. (2021). Effect of in Planta Treatment of ‘Cavendish’ Banana with Herbicides and Fungicides on the Colonisation and Sporulation by *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* Subtropical Race 4. *Journal of Fungi* (7), 3: 184.
- Acuña, R., Rouard, M., Leiva, A. M., Marques, C., Olortegui, J., Ureta, C., Cabrera-Pintado, R. M., Rojas, J. C., Lopez-Alvarez, D., Cenci, A., Cuellar, W. J., & Dita, M. (2022). First Report of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 Causing Fusarium Wilt in Cavendish Bananas in Peru. *Plant Dis* (106), 8, 2268.
- Baddeley, A., Turner, R., Moller, J. & Hazelton, M. (2005). Residual analysis for spatial point processes (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*. 67:617–666.
- Bancroft, J. (1876). Report of the board appointed to enquire into the cause of disease affecting livestock and plants. *Votes and Proceedings 1877*. 3:1011–1038.
- Beckman, C. H. (1990). Host responses to infection. En: *Fusarium wilt of banana*. Ploetz, R. C. (Ed.) APS Press St Paul, pp 93-105.
- Bergamin-Filho, A., Hau, B., Amorim, L. & de Jesus Junior, W. C. (2004). En: Riveiro, F. X., de Jesus Junior, W. C., Zambolim, L. (Eds.). *Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas*. Editora Perffil. Belo Horizonte, MG. p.193-240

- Bergamin-Filho, A. & Hau, B. (2002). Análise Espacial de Epidemias. *Revisão Anual de Patologia de Plantas*. (10): 155-218.
- Bergamin-Filho, A., Hau, B., Amorim, L. & Ferraz, F. (2007). Análise Espacial e Temporal de Epidemias de Patógenos do Solo. En: Poltronieri, L; Verzignassi, J. (Eds.). *Fitossanidade na Amazônia: inovações tecnológicas*. Embrapa Amazônia Oriental. Belém, PA. p.17-36.
- Blomme, G., Ploetz, R., Jones, D., De Langhe, E., Price, N., Gold, C., Geering, A., Viljoen, A., Karamura, D., Pillay, M., Tinzaara, W., Teycheney, P. Y., Lepoint, P., Karamura, E. & Buddenhagen, I. (2013). A historical overview of the appearance and spread of *Musa* pests and pathogens on the African continent: highlighting the importance of clean *Musa* planting materials and quarantine measures. *Ann. Appl. Biol.* 162, 4:26.
- Buddenhagen, I. (2013). A historical overview of the appearance and spread of *Musa* pests and pathogens on the African continent: highlighting the importance of clean *Musa* planting materials and quarantine measures. *Ann. Appl. Biol.* 162(1):4-26
- CABI (Centre for Agriculture and Bioscience International). (2021). CABI: Invasive Species Compendium. *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Panama disease of banana). Consultado 15 agos. 2021. Disponible en <https://www.cabi.org/isc/datasheet/24621>
- Campbell, C. L. & Madden, L. V. (1990). *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. New York: Jhon Willey. 532 p.
- Campbell, C. L. & Benson, D. M. (1994). Spatial aspects of the development of root disease epidemics. En: Campbell, C. L. & Benson D. M. (Eds.). *Epidemiology and management of root diseases*. Heidelberg: Springer-Verlag, p.195-243
- Carlier, J., De Waele, D. & Escalant, J. V. (2002). *Global Evaluation of Musa Germplasm for Resistance to Fusarium Wilt, Mycosphaerella Leaf Spot Diseases and Nematodes*. INIBAP Technical Guidelines. 64 p.
- Chaves, N., Staver, C. & Dita, M. (2014). Potential of *Trichoderma asperellum* for biocontrol of *Fusarium* wilt in banana. *Acta Horticulturae*, (1114), 261–266.

- Chittarath, K., Nguyen, C. H., Bailey, W. C., Zheng, S., Mostert, D., Viljoen, A., Tazuba, A. F., Ocimati, W., Kearsley, E., Chi, T. Y., Hung, N. T., Dita, M., Shah, T., Karanja, M., Mahuku, G. & Blomme, G. (2022). Geographical Distribution and Genetic Diversity of the Banana Fusarium Wilt Fungus in Laos and Vietnam. *Journal of Fungi*, (8), 1: 46.
- Cordeiro, Z. J. M., Matos, A. P. & Kimati, H. (2005). Doenças da bananeira. En: Kimati, H., Amorim, L., Rezende, J. A. M., Bergamin-Filho, A. & Camargo, L. E. A. (Eds.). Manual de Fitopatologia. Volume 2. Doenças das plantas cultivadas.
- Czislowski, E., Fraser-Smith, S., Zander, M., O'Neill, W. T., Meldrum, R. A., Tran-Nguyen, L., Batley, J. & Aitken, E. (2018). Investigation of the diversity of effector genes in the banana pathogen, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, reveals evidence of horizontal gene transfer. *Molecular plant pathology*. 19(5), 1155–1171.
- Dantas, J. L. L., Shepherd, K., Silva, S. & Filho, W. S. (1999). Classificação botânica, origem, evolução e distribuição geográfica. En: Elio José Alves. (Org.). A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais. 2ed. Brasília: Embrapa-SPI / Embrapa-CNPMPF (1): 27-34
- Dassou, A. G., Carval, D., Dépigny, S., Fansi, G., & Tixier, P. (2015). Ant abundance and *Cosmopolites sordidus* damage in plantain fields as affected by intercropping. *Biological Control*, 81, 51–57.
- Datnoff, L. E., Elmer, W. H., Huber, D. M. (2007). Mineral nutrition and Plant Disease. St. Paul, Minnesota. APS Press. 278 p.
- Delaplace, A., Coulis, M., Chapillon, L., Cottin, G. & Tixier, P. (2023). Stop me if you can: quantification of the effect of interfaces between plots on the dispersal of *Cosmopolites sordidus*. *Pest Manag Sci*, 79: 5106-5115.
- Del Ponte, E. M. (2023). R for Plant Disease Epidemiology (R4PDE). Author.
- Deltour, P., França, S. C., Pereira, O. L., Cardoso, I., De Neve, S. & Debode, J. (2017^a). Disease suppressiveness to Fusarium wilt of banana in an agroforestry system: influence of soil characteristics and plant community. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 239, 173–181.

- Deltour, P. (2017b). Penetrating the network of *Fusarium oxysporum* populations, banana cultivars and graminoids: Towards holistic management of Fusarium wilt in banana. [PhD Thesis, Ghent University, Belgium.]
- De Beer, Z., Hernández, J. M., Sabadel, D. (2001). False Panama Disorder on Banana. International Network for the Improvement of Banana and Plantain (INIBAP)
- De Jesus Junior, W. C., Ribeiro, F. X., Bergamin-Filho, A. (2004). Quantificação de Danos e Perdas. En: Riveiro, F. X., de Jesus Junior, W. C., Zambolim, L. (Eds.). Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas. Editora Perffil. Belo Horizonte, MG. p.271-298
- Diggle, P. J. & Ribeiro, P. J. (2007). Model-based Geostatistics. Springer Series in Statistics. New York, NY. 232 p.
- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E. S. G. & Staver, C.P. (2018). Fusarium Wilt of Banana: Current Knowledge on Epidemiology and Research Needs Toward Sustainable Disease Management. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1468.
- Dita, M., Teixeira, L. A. J., O'Neill, W. T., Pattison, A. B., Weinert, M. P., Li, C. Y., Zheng, S. J., Staver, C., Thangavelu, R. & Viljoen, A. (2020). Current state of Fusarium wilt of banana in the subtropics. *Acta Horticulturae*, 1272 pp.
- Dita, M., Teixeira, L., Li, C., Zheng, S., O'Neill, W., Daniels, J., Pérez-Vicente, L., Carreel, F., Roussel, V., Carlier, J., Abadie, C., Carpentier, S. C., Iyyakutty, R., Kissel, E., van Wesemael, J., Chase, R., Tomekpe, K., Roux, N. (eds.). (2021). Practical guidelines for early screening and field evaluation of banana against Fusarium wilt, Pseudocercospora leaf spots and drought. Montpellier (France): Bioversity International. 83 p.
- Dong, X., Wang, M., Ling, N., Shen, Q. & Guo, S. (2016). Potential role of photosynthesis-related factors in banana metabolism and defense against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Environ. Exp. Bot.* 129, 4–12.
- Eder-Hermann, V. & Lecomte, C. (2019). Current Status of *Fusarium oxysporum* Formae Speciales and Races. *Phytopathology* (4) 109:512-530.
- French, E. R., Hebert, T. T. (1982). Métodos de Investigación Fitopatológica. IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). San José, Costa Rica. 290 p.

- Fuentes, D. (2014). Spatial Data Analysis of Fusarium Wilt Incidence in the District of San Luis de Shuaro, Peru. [Tesis MSc. Turrialba, Costa Rica. UNIGIS. p.72]
- García-Bastidas, F. A., Quintero-Vargas, F. C., Ayala-Vasquez, M., Schermer, T., Seidl, M. F., Santos-Paiva, M., Noguera, A. M., Aguilera-Galvez, C., Wittenberg, A., Hofstede, R., Sørensen, A. & Kema, G. H. F. (2019). First Report of Fusarium Wilt Tropical Race 4 in Cavendish Bananas Caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *Plant Disease* (104):3, 994-994.
- Garret, K. A. & Mundt, C. C. 1999. Epidemiology in mixed host populations. *Phytopathology*, 8(11), 984-990.
- Garrett, K. A. (2021). Impact network analysis and the *inara* package: Decision support for regional management interventions. *Methods in Ecology and Evolution*, 12, 1634–1647.
- Gigot, C., Turecheck, W. & McRoberts, N. (2017). Analysis of the Spatial Pattern of Strawberry Angular Leaf in California Nursery Production. *Phytopathology*, 107 (10): 1243-1255.
- Gigot, C. (2018). *Epiphy*: Analysis of plant disease epidemics.
- Gilligan, C. A. (1983). Modeling of soilborne pathogens. *Annual Review of Phytopathology*., (21):45-65.
- Gonçalves, V., Nietsche, S., Pereira, M. C. T., de Oliveira Júnior, M.X., Antunes Júnior, R.C., Ruggiero, C. (2008). Severity of banana leaf spot in an intercropping system in two cycles of banana Prata Anã. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.*, 8: 305-312.
- Gordon, T. R. (2017). *Fusarium oxysporum* and the Fusarium Wilt Syndrome. *Annu Rev Phytopathol*, 4(55):23-39.
- Gottwald, T. R., Sun, X., Riley, T., Graham, J. H., Ferrandino, F. & Taylor, E. L. (2002). Geo-Referenced Spatiotemporal Analysis of the Urban Citrus Canker Epidemic in Florida. *Phytopathology*, 92(4): 361-377
- Guillen-Sánchez, C., Tixier, P., Tapia Fernández, A., Conejo Barboza, A.M., Sandoval Fernández, J.A. & de Lapeyre de Bellaire, L. (2021). Can the banana weevil *Cosmopolites*

- sordidus* be a vector of *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* race 1? Unravelling the internal and external acquisition of effective inoculum. *Pest Manag Sci*, 77: 3002-3012.
- Guillén-Sánchez, C., de Lapeyre de Bellaire, L., Sandoval Fernández, J. A., & Tixier, P. (2023). Preference of *Cosmopolites sordidus* for fusarium wilt-diseased banana plants. *Journal of Applied Entomology*, 147, 140–146.
- Haddad, F., Rocha, L. S., Soares, A. C. F., Martins, I. P. S., Teixeira, L. A. J., Staver, C., & Dita, M. (2018). Management of Fusarium wilt of bananas in Minas Gerais, Brazil. *Acta Horticulturae*, 1, 137–146.
- Hau, B., Amorim, L. & Bergamin-Filho, A. (2011). Epidemiologia: Análise Espacial. En: Amorim, L., Rezende, J. A. M. & Bergamin Filho, A. (Eds.). Manual de Fitopatologia. Volume I. Princípios e Conceitos. Editora Agronômica Ceres. São Paulo, Brasil. p.667-695.
- Heck, D. W., Dita, M. A., Del Ponte, E. M., Mizubuti, E. S. G. (2016). Spatial pattern analysis of the incidence of Fusarium wilt of banana. Resúmen de anales de congreso. Workshop brasileiro de epidemiología de doenças de plantas.
- Heck, D. W. (2019). Factors Affecting the Spatio-Temporal Dynamics of Fusarium Wilt of Bananas in Brazil. [PhD Thesis, Universidade Federal de Vicosa, Brazil. 109 p.]
- Heck, D. W., Dita, M. A., Del Ponte, E. M. & Mizubuti, E. S. G. (2021a). Incidence, Spatial Pattern and Temporal Progress of Fusarium Wilt of Bananas. *J. Fungi*, (7), 8:646.
- Heck, D., Alves, G., & Mizubuti, ES. 2021b. Weevil borers affect the spatiotemporal dynamics of banana fusarium wilt *Journal of Fungi*, 7(5).
- Heck, D. W., Kikkert, J. R., Hanson, L. & Pethybridge, S. J. (2021c). Development of a sequential sampling plan using spatial attributes of *Cercospora* leaf spot epidemics of table beet in New York. *Plant Dis.* 105:253-2465
- Heck, D. W.; Sharma, P.; Kikkert, J. R. & Pethybridge, S. J. (2023). *Plant Disease*, 107:6, 1714-1720

- Hennessy, C., Walduck, G., Daly, A. & Padovan, A. (2005). Weed hosts of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in northern Australia. *Australasian Plant Pathology*, 34: 115–117.
- Herrera, R. M., Hernández, Y., Magdama, F., Mostert, D., Bothma, S., Salgado, E. M. P., Terán, D., González, E., Angulo, R., Angel, L., Rodríguez, Y., Ortega, R., Viljoen, A., & Marys, E. E. (2023). First Report of Fusarium Wilt of Cavendish Bananas Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 in Venezuela. *Plant. Dis.*, 103:3297.
- Huarhua, M. H. (2018). Razas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* aisladas de tomate (*Solanum lycopersicum*) proveniente de costa central del Perú. [Tesis Mg. Sc. UNALM (Universidad Nacional Agraria La Molina). Lima, Perú. 82 p.]
- Hughes, G., McRoberts, N., Madden, L. V. & Gottwald, T. R. (1997). Relationships between disease incidence at two levels in a spatial hierarchy. *Phytopathology* (87): 542-550
- Husson, F., Josse, J., Le, S., & Mazet, J. (2018). FactoMineR: Multivariate exploratory data analysis and data mining. CRAN.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). (2021). Bananas: A Key Crop for Food Security that is Under Threat. Consultado 01 oct. 2021. En: <https://www.iica.int/en/press/news/bananas-key-crop-food-security-under-threat>
- INIA (Instituto Nacional de Innovación Agraria, Perú). (2020). Sistematización de la experiencia de los subproyectos del cultivo de banano financiados por el Programa Nacional de Innovación Agraria. Lima, Perú. 74 p.
- Jacobsen, K., Omondi, B. A., Almekinders, C., Alvarez, E., Blomme, G., Dita, M., Iskara-Caruana, M. L., Ocimati, W., Tinzaara, W., Kumar, P. L. & Staver, C. (2019). Seed degeneration of banana planting materials: strategies for improved farmer access to healthy seed. *Plant Pathol*, 68: 207-228.
- Jones, D. R. (Editor). (2019). Handbook of diseases of banana, Abacá and Enset. CAB International. 616 pag.

- Karangwa, P., Blomme, G., Beed, F., Niyongere, C. & Viljoen, A. (2016). The distribution and incidence of banana Fusarium wilt in subsistence farming systems in east and central Africa. *Crop Protection*, 84 (2016) 132-140.
- Krauss, U., Figueroa, R., Johanson, A., Arevalo, E., Anquiz, R., Cabezas, O. & Garcia, L. (1999). *Musa* clones in Peru: classification, uses, production potential and constraints. *Infomusa*, 8(2):19-26.
- Lavigne, C., Ricci, B., Franck, P., & Senoussi, R. (2010). Spatial analyses of ecological count data: A density map comparison approach. *Basic Appl. Ecol.* 11:734-742.
- Leslie, J. F. & Summerell, B.A. (2006). The *Fusarium* Laboratory Manual. Blackwell Publishing. 388 pag.
- Li, B., Madden, L. V. & Xu, X. (2012). Spatial analysis by distance indices: An alternative local clustering index for studying spatial patterns. *Methods Ecol. Evol.*, 3:368–377.
- Liu, L., Liang, C. C., Zeng, D., Yang, L. Y., Qin, H. Y. & Wang, G. F. (2015). Spatial distribution pattern for the Fusarium wilt disease in banana field and the *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in different parts of banana plants. *Acta Ecol. Sin.*, 35:4742–4753.
- Madden, L.V., Hughes, G. (1995). Plant Disease Incidence: Distributions, Heterogeneity, and Temporal Analysis. *Annu. Rev. Phytopathology*, (33), 529-564. En: <https://doi.org/10.1146/annurev.py.33.090195.002525>
- Madden, L.V., Hughes, G., van den Bosch, F. (2007). The Study of Plant Disease Epidemics. American Phytopathological Society Press, St. Paul, MN.
- Madden, L. V., Hughes, G., Moraes, W. B., Xu, X. M. & Turechek, W. W. (2018). Twenty-Five Years of the Binary Power Law for Characterizing Heterogeneity of Disease Incidence. *Phytopathology*, 108(6):656-680.
- Marín, J. E. (2001). El gorgojo negro del plátano (*Cosmopolites sordidus* Germar). Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA). Lima, Perú 17 págs.

- Marín, J. E. (2010). Mal de Panamá o marchitez por *Fusarium* de bananos y plátanos y la amenaza de dispersión de la Raza 4 Tropical de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* a América y Perú. Resúmenes del XXI Congreso de Fitopatología, Tarapoto, 05 al 10 de noviembre de 2010. *Fitopatología* 45(1): 12-13 (Resumen).
- Marín, J. E. & Dita, M. (2020). Procedimientos para el Diagnóstico y Evaluación de Enfermedades de Musáceas (plátanos y bananos) en Campo. Lima, Perú, MIDAGRI, SENASA, Alianza Bioersity Internation-CIAT.
- Martínez de la Parte, E. (2023). *Fusarium* wilt of banana in Cuba: Pathogen diversity and implications of a wider host range. [PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands. 164 p.]
- Martínez de la Parte, E., Pérez-Vicente, L., García-Bastidas, F., Bermúdez-Caraballoso, I., Schnabel, S., Meijer, H. & Kema, G. (2024). The Vulnerability of Cuban Banana Production to *Fusarium* Wilt Caused by Tropical Race 4. *Phytopathology*, 114:1, 111-118
- Maryani, N., Lombard, L., Poerba, Y. S., Subandiyah, S., Crous, P. W. & Kema, H. G. J. (2019). Phylogeny and genetic diversity of the banana *Fusarium* wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* in the Indonesian centre of origin. *Stud. Mycol*, 92: 155-194. En: <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2018.06.003>
- Masanza, M., Gold, C. S., van Huis, A., Ragama, P. E., & Okech, S. H. O. (2005). Effect of crop sanitation on banana weevil *Cosmopolites sordidus* (Germar) (Coleoptera: Curculionidae) populations and crop damage in farmers fields in Uganda. *Crop Protection*, 24(3), 275–283.
- McQuaid, C. F.; Gilligan, C.A. & Van den Bosch, F. (2017). Considering Behavior to ensure the success of a Disease Control Strategy. *R. Soc. Open Sci.* 4, 170721. En: doi: [10.1098/rsos.170721](https://doi.org/10.1098/rsos.170721)
- Meldrum, R. A.; Daly, A. M., Tran-Nguyen, L. T. & Aitken, E. A. (2013). Are banana weevil borers a vector in spreading *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* tropical race 4 in banana plantations. *Australasian Plant Pathology*, 42:543–9.

- Mengesha, G. G., Yetayew, H. T., & Sako, A. K. (2018). Spatial distribution and association of banana (*Musa* spp.) Fusarium wilt (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) epidemics with biophysical factors in southwestern Ethiopia. *Arch. Phytopathology Plant Protect.* 1-26.
- Moore, N., Bentley, S., Pegg, K. & Jones, D. (1995). Marchitamiento del banano ocasionado por Fusarium. Hoja divulgativa 5. Red Internacional para el Mejoramiento del Plátano y Banano, FRA.
- Moore, N. Y., Pegg, K.G., Bentley, S. & Smith, L. J. (2001). Fusarium wilt of banana. Global problems and perspectives. Pags.: 11-31. In: Molina, A., Masdek, N. and Liew, K.W., Eds. Banana Fusarial Wilt. Proceedings of the International Workshop on the banana fusarial disease held at Genting Highlands Resort, Malaysia, 18-20 october 1999.
- Mosquera, L., Álvarez, D., Ritter, T., Mockshell, J., Rojas, J. & Dita, M. (2023). Banana value chain profile for Peru: A top organic producing country is threatened by Fusarium TR4. Brief. Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Cali, Colombia. 10 p.
- Mur, L. A. J., Simpson, C., Kumari, A., Gupta, A. K. & Gupta, K. J. (2016). Moving nitrogen to the center of plant defense against pathogens. *Ann. Bot.* 119, 703–719.
- Nduwimana, I., Sylla, S., Xing, Y., Simbare, A., Niyongere, C., Garrett, K. A., & Bonaventure-Omondi, A. (2022). Banana seed exchange networks in Burundi – Linking formal and informal systems. *Outlook on Agriculture*, 51(3), 334-348
- Nutter, F. W., Esker, P. D. & Netto, R. A. C. (2006). Disease Assessment Concepts and the Advancements Made in Improving the Accuracy and Precision of Plant Disease Data. *Eur J Plant Pathol*, 115, 95–103. En: <https://doi.org/10.1007/s10658-005-1230-z>
- Olivares, B. O., Rey, J. C., Lobo, D., Navas-Cortés, J. A., Gómez, J. A. & Landa, B.B. (2021). Fusarium Wilt of Bananas: A Review of Agro-Environmental Factors in the Venezuelan Production System Affecting Its Development. *Agronomy*, 11(5):986.
- Oyesigye, E., Tinzaara, W., Karamura, G. & Cosma, W. (2021). Distribution and farmers' knowledge on Fusarium wilt (Race 1) in cropping systems of Uganda. *African Journal of Plant Science*, 15(11) p. 277-287

- Pérez-Vicente, L., Dita, M. A. & Martínez, E. (2014). Technical Manual Prevention and diagnostic of *Fusarium* Wilt (Panama disease) of banana caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* Tropical Race 4 (TR4). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Prepared for the Regional Workshop on the Diagnosis of Fusarium Wilt (Panama disease) caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* Tropical Race 4: Mitigating the Threat and Preventing its Spread in the Caribbean.
- Pegg, K. G., Coates, L. M., O'Neill, W. T. & Turner, D. W. (2019). The Epidemiology of Fusarium Wilt of Banana. *Front. Plant Sci.* 10:1395.
- Perry, J. N. (1996). Simulating spatial patterns of counts in agriculture and ecology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 15(2), 93–109.
- Perry, J. N., Winder, L., Holland, J. M. & Allston, R. D. (1999). Red-blue plots for detecting clusters in count data. *Ecol. Lett.* (2):106-113
- Pinchinat, A., Figueroa, R. & Ramirez, L. (1986). Seminario Taller sobre producción de plátano en la Selva Peruana. INIPA, IICA. *Series de ponencias, resultados y recomendaciones de eventos técnicos Nro. A3/PE-86-001*. Lima. Perú. 148p
- Ploetz, R. C., Zentmyer, G. A., Nishijima, W. T., Rohrbach, K. G. & Ohr, H. D. (1994). Compendium of tropical fruit diseases. <https://doi.org/10.1017/S0021859600070520>.
- Ploetz, R. C. & Pegg, K. G. (2000). *Fusarium* wilt. Pags. 143-159. In: Jones, D. Disease of banana, abaca and enset. CABI Publishing. Wallingford, U.K.
- Ploetz, R. C. (2006). Fusarium wilt of banana is caused by several pathogens referred to as *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense*. *Phytopathology*, 96, 653–6.
- Ploetz, R. C. (2015). Management of Fusarium wilt of banana: A review with special reference to tropical race 4. *Crop Prot.*, 73: 7-15.
- Ploetz, R. C. (2015). Fusarium wilt of banana. *Phytopathology*, 105, 1512–1521. doi: 10.1094/PHYTO-04-15-0101-RVW
- Redagrícola. (2020). INIA incorpora variedades de banana orgánico con resistencia al Fusarium raza 4 tropical. (Readricola.com). Perú. Oct.

- Rekah, Y., Shtienberg, D., & Katan, J. (2000). Disease development following infection of tomato and basil foliage by airborne conidia of the soilborne pathogens *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* and *F. oxysporum* f. sp. *basilici*. *Phytopathology*, 90:1322–1329.
- Resolución Jefatural N° 0175-2019-MINAGRI-SENASA de 2019. Declaran alerta fitosanitaria en todo el territorio nacional para la plaga *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical. (El Peruano). Perú. 3 dic.
- Resolución Jefatural N° 0048-2021-MIDAGRI-SENASA de 2021. Declaran emergencia fitosanitaria en todo el territorio nacional ante la presencia de la plaga *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical. (El Peruano). Perú. 11 abr.
- Riveiro do Vale, F. X., de Jesus Junior, W. C., Ricardo, J. & Alves, C. (2004). Quantificação de doenças e do crescimento do hospedeiro. En: Riveiro, F. X., de Jesus Junior, W. C., Zambolim, L. (Eds.). *Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas*. Editora Perffil. Belo Horizonte, MG. p.89-123.
- Robinson, J. C. & Saúco, G. V. (2010). *Bananas and plantains*. 2 ed. CAB International. Wallingfor, U.K. 311 p.
- Rocha, A., Ferreira, M., Rocha, L., Oliveira, S., Amorim, E. O., Mizubuti, E. G. S. & Haddad, F. (2020). Interaction between *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and *Radopholus similis* can lead to changes in the resistance of banana cultivars to Fusarium wilt. *Eur J Plant Pathol*, 158, 403–417. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-02081-y>
- Rodríguez-Yzquierdo, G., Olivares, B. O., Silva-Escobar, O., González-Ulloa, A., Soto-Suarez, M. & Betancourt-Vásquez, M. (2023). Mapping of the Susceptibility of Colombian Musaceae Lands to a Deadly Disease: *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4. *Horticulturae*; 9(7):757.
- Rojas, J. C., Arévalo, C., Marín, J. & Dita, M. (2022). *Sistemas de producción de musáceas en Perú*. Bioersivity International. Roma, Italia. 22 p.
- Román-Jerí, C. H. (2012). Consideraciones epidemiológicas para el manejo de la marchitez por Fusarium (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) del banano en la región central de Perú. [Tesis MSc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. p.190]

- Romero, D. (2020). Resistencia de tres clones de plátano variedad isla (*Musa x paradisiaca* L.) A *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* en Chanchamayo. [Tesis Ing. Agr. UNCP (Universidad Nacional del Centro del Perú)]
- Santos, J. E. A., Silva, D. E. M., Vieira, R. F., Carvalho, A. M., Schurt, D.A., Lima, M. A., Gasparotto, L., Lima, C. S., & Silva, C. F. B. (2022). First report of *Fusarium kalimantanense* causing Fusarium wilt on banana tree in Brazil. *Plant disease*, 107:207.
- Savary, S., Madden, L. V., Zadoks, J. C., & Klein-Gebbinck, H. W. (1995). Use of Categorical Information and Correspondence Analysis in Plant Disease Epidemiology. *Advances in Botanical Research*, 213–240
- SENASA (Servicio Nacional de Sanidad Agraria). (2019). Fusarium Raza 4: Minagri declara alerta fitosanitaria nacional. SENASA contigo. Lima, Perú. 6 de diciembre del 2019. <http://www.senasa.gob.pe/senasacontigo/declaran-alerta-fitosanitaria-por-fusarium-raza-4/>
- Scheerer, L., Pemsil, D. E., Dita, M., Perez-Vicente, L. & Staver, C. (2018). A quantified approach to projecting losses caused by Fusarium wilt tropical race 4. *Acta Hortic.* 1196, 211–218.
- Shen, Z., Zhong, S. & Wang, Y. (2013). Induced soil microbial suppression of banana Fusarium wilt disease using compost and bio fertilizers to improve yield and quality. *European Journal of Soil Biology*; 57:1–8.
- Singh, B. K., Delgado-Baquerizo, M., Egidio, E., Guirado, E., Leach, J. E., Liu, H. & Trivedi, P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nat Rev Microbiol*, 21, 640–656.
- Sparks, A. H., Esker, P. D., Antony, G., Campbell, L., Frank, E. E., Huebel, L., Rouse, M. N., Van Allen, B. & Garrett, K. A. (2008). Ecology and epidemiology in R: Spatial analysis. The Plant Health Instructor. En: doi:10.1094/PHI-A-2008-0129-03
- Szyniszewska, A. M., Busungu, C., Boni, S. B., Shirima, R., Bouwmeester, G., & Legg, J. P. (2017). Spatial Analysis of Temporal Changes in the Pandemic of Severe Cassava Mosaic Disease in Northwestern Tanzania. *Phytopathology*, 107:10, 1229-1242

- Stover, R. H. (1962). Fusarial wilt (Panama Disease) of bananas and other *Musa* species. In: Stover, R. H. (ed.). *Phytopathol. Pap.* Kew, England: Commonw. Mycol. Inst. 117p.
- Teng, P. S. (1985). Construction of predictive models. II. Forecasting crop losses. En: Gilligan, CA. (Ed.) *Advances in Plant Pathology*. Londres: Academic Press. v.3
- Texeira, L., Heck, D., Nomura, E., Vieira, H. & Dita, M. (2021). Soil attributes, plant nutrition, and Fusarium wilt of banana in Sao Paulo, Brazil. *Trop. plant. path.* (46), 443-454. En: <https://doi.org/10.1007/s40858-021-00428-2>
- Thangavelu, R., Loganathan, M., Arthee, R., Prabakaran, M. & Uma, S. (2020). Fusarium Wilt: a threat to banana cultivation and its management. CABI International 2020. doi: 10.1079/PAVSNNR202015004
- Torres-Bedoya, E., Bebbler, D. & Studholme, D. J. (2021). Taxonomic revision of the banana Fusarium wilt TR4 pathogen is premature. *Phytopathology*, 111:2141-2145.
- Turechek, W. W. & McRoberts, N. (2013). Considerations of Scale in the Analysis of Spatial Pattern of Plant Disease Epidemics. *Annu. Rev. Phytopathol.* (51), 1: 453-472. En: <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-081211-173017>
- Wardlaw, C. W. (1972). *Banana disease including plantain and abaca*. Second edition. Longman. London. 878 p.
- Were, E., Nakato, G. V., Ocimati, W., Ramathani, I., Olal, S., & Beed, F. (2015). The banana weevil, *Cosmopolites sordidus* (Germar), is a potential vector of *Xanthomonas campestris* pv. *musacearum* in bananas. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 37, 427–434.
- Warman, N. M. & Aitken, E. A. B. (2018). The Movement of *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* (Sub-Tropical Race 4) in Susceptible Cultivars of Banana. *Front. Plant Sci.*, 9:1748.
- Were, E., Viljoen, A. & Rasche, F. (2023). Back to the roots: Understanding banana below-ground interactions is crucial for effective management of Fusarium wilt. *Plant Pathology*, 72, 19–38.

- Winder, L., Alexander, C., Griffiths, G., Holland, J., Woolley, C. & Perry, J. (2019). Twenty years and counting with SADIE: Spatial Analysis by Distance Indices software and review of its adoption and use. *Rethinking Ecology*, 4: 1–16.
- Van Bruggen, A. H., Sharma, K., Kaku, E., Karfopoulos, S., Zelenev, V. V. & Blok, W. J. (2015). Soil health indicators and Fusarium wilt suppression in organically and conventionally managed greenhouse soils. *Applied Soil Ecology*, 86:192–201.
- Xu, X., & Madden, L. (2005). Interrelationships among SADIE indices for characterizing spatial patterns of organisms. *Phytopathology*, 95(8),874–883.
- Zhan, N., Kuang, M., Li, C., Liu, S., Deng, G., Viljoen, A., Yi, G., & Sheng, O. (2022a). First Report of Fusarium Wilt of Iholena Banana (*Musa* spp.) Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 in China. *Plant disease*, 10.1094/PDIS-11-21-2621-PDN. Advance online publication. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-21-2621-PDN>
- Zhan, N., Kuang, M., He, W., Deng, G., Liu, S., Li, C., Roux, N., Dita, M., Yi, G. & Sheng, O. (2022b). Evaluation of Resistance of Banana Genotypes with AAB Genome to Fusarium Wilt Tropical Race 4 in China. *Journal of Fungi*; 8(12):1274. <https://doi.org/10.3390/jof8121274>
- Zhang, H., Mallik, A. & Zeng, R. S. (2013). Control of panama disease of banana by rotating and intercropping with chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler): role of plant volatiles. *J. Chem. Ecol.* 39, 243–252. doi: 10.1007/s10886-013-0243-x

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Encuesta empleada en las entrevistas a productores

STC - Evaluación de Plagas de Plátano – Perú

Esta encuesta es parte de las actividades del proyecto "Fortaleciendo conocimientos, capacidad de diagnóstico y buenas prácticas frente a la amenaza de Fusarium y otros problemas fitosanitarios para las familias productoras de plátanos del Perú" con la finalidad de caracterizar los sistemas de producción de musáceas en Perú. *Obligatorio

Nombre del encuestador *

¿A qué institución pertenece? *

Seleccione en que zona se está realizando la evaluación de plagas y colecta de muestras *

- | | | |
|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Aguaytía | <input type="checkbox"/> Morropón | <input type="checkbox"/> Sullana |
| <input type="checkbox"/> Alto Mayo | <input type="checkbox"/> Olmos | <input type="checkbox"/> Tarapoto |
| <input type="checkbox"/> Aucayacu | <input type="checkbox"/> Pasco | <input type="checkbox"/> Tingo María |
| <input type="checkbox"/> Bagua | <input type="checkbox"/> Piura | <input type="checkbox"/> Tocache |
| <input type="checkbox"/> Chanchamayo | <input type="checkbox"/> Picota | <input type="checkbox"/> Tumbes |
| <input type="checkbox"/> Chepén | <input type="checkbox"/> Pucallpa | <input type="checkbox"/> Yurimaguas |
| <input type="checkbox"/> El Dorado | <input type="checkbox"/> Puerto Maldonado | <input type="checkbox"/> Zarumilla |
| <input type="checkbox"/> Iquitos | <input type="checkbox"/> Puerto Bermúdez | <input type="checkbox"/> VRAE |
| <input type="checkbox"/> Jaén | <input type="checkbox"/> Quillabamba | <input type="checkbox"/> Otro _____ |
| <input type="checkbox"/> La Libertad | <input type="checkbox"/> San Ignacio | |
| <input type="checkbox"/> Mala | <input type="checkbox"/> Satipo | |

2da sección: Datos del productor y de las parcelas, chacras, fincas evaluadas

1. Nombre del productor y/o de la Finca*

2. ¿Cuál es la localización de la parcela o finca del entrevistado (Coordenadas GPS) ? *

3. ¿Qué variedades de plátanos y/o bananos cultiva en su parcela? Seleccione*

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Bellaco, Hartón o plátano macho (AAB) | <input type="checkbox"/> IC2 (AAAA) |
| <input type="checkbox"/> Bellaco Plantano o Dominico Hartón (ABB) | <input type="checkbox"/> Isla, Isla Maleño, Isla tallo verde (AAB) |
| <input type="checkbox"/> Dominico o Inguiri (AAB) | <input type="checkbox"/> Manzano (AAB) |
| <input type="checkbox"/> Bizcochito, Moquicho o Bocadillo (AA) | <input type="checkbox"/> Palillo, Guayabo, o Capirona (AAB) |
| <input type="checkbox"/> Cavendish Gran enano (AAA) | <input type="checkbox"/> Pelipita o colombiano (ABB) |
| <input type="checkbox"/> Cavendish Lacatan o Montecristo (AAA) | <input type="checkbox"/> Prata (AAB) |
| <input type="checkbox"/> Cavendish Valery (AAA) | <input type="checkbox"/> Sapo o Sapino (ABB) |
| <input type="checkbox"/> Cavendish William (AAA) | <input type="checkbox"/> Seda, Guayaquil o Gros Michel (AAA) |
| <input type="checkbox"/> FHIA 23 (AAAB) | <input type="checkbox"/> Otro _____ |
| <input type="checkbox"/> Guineo Rojo - Morado (AAA) | |

4. ¿Cuántas hectáreas destinada al cultivo de plátanos y/o bananos? *

5. El cultivo de plátano y/o banano está asociado a: *

- Café Arboles Otros _____
 Cacao Monocultivo

6. ¿Cuál es la edad de la parcela de plátano y/o banano? *

- Menor a 3 años 5 - 10 años Más de 15 años
 3 - 5 años 10-15 años No sabe

7. ¿Cuánto tiempo dura su parcela de plátano o banano? *

- 1 - 2 años 5 - 10 años Otro _____
 3 - 5 años Más de 10 años

8. Si elimina la plantación, mencione las causas por las cuales la elimina (Ejemplo, Picudo, *Fusarium*, etc.).
Escriba N.A en caso de no eliminarla*

3ra sección: Manejo agronómico y fitosanitario del cultivo

9. ¿Qué tipo de manejo tiene en la parcela? *

- Orgánico (Tiene certificación orgánica)
 Convencional (No tiene certificación orgánica y realiza aplicaciones de agroquímicos)
 En transición (En proceso para obtener la certificación orgánica)

10. ¿Qué tipo de material de propagación o semilla utiliza? *

- Cormos o hijuelos
 Vitroplantas
 Plantines producidos en cámara térmica o camas de aserrín
 Otro

11. ¿Cómo obtiene su material de siembra? *

- Compra en viveros Selecciona en su parcela Otro _____
 Lo adquiere de fincas vecinas Trueque

12. ¿Cuál es el criterio principal que utiliza para seleccionar el material de siembra? *

- Seleccione hijuelos que están con buen tamaño de cualquier planta
 Seleccione hijuelos con buen tamaño de plantas que están sanas y bien conformadas
 Seleccione hijuelos provenientes de plantas con buen tamaño de racimo
 Compró hijuelos o cormos limpios
 Compró hijuelos o cormos sin limpiar
 No sigo ningún criterio específico

13. ¿Qué tratamiento realiza al material de Siembra?

- Inmersión en agua caliente.
 Aplicación de plaguicidas (insecticida, fungicida, nematicida)
 Limpieza de cormos en la parcela donde obtengo la semilla

- Limpieza de hijuelos en la parcela donde se va a realizar la siembra
- Retiro los hijuelos de mi parcela a un local específico para realizar la limpieza
- Ningún tratamiento
- Otro

14. ¿Qué productos aplica para el control de malezas, plagas y enfermedades? *

- | | | |
|--|---|--|
| <input type="checkbox"/> Ninguno | <input type="checkbox"/> Fungicidas químicos | <input type="checkbox"/> Caldos minerales (bordelés, sulfocálcico) |
| <input type="checkbox"/> Herbicidas | <input type="checkbox"/> Productos orgánicos o biológicos | <input type="checkbox"/> Otros _____ |
| <input type="checkbox"/> Insecticidas químicos | | |

15. ¿Con qué frecuencia aplica los productos para el control de malezas, plagas y enfermedades? *

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Nunca | <input type="checkbox"/> 3 - 5 veces al año |
| <input type="checkbox"/> 1 - 3 veces al año | <input type="checkbox"/> Más de 5 veces al año |

16. ¿Qué plagas están presentes en tu finca o parcela? *

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Arañita roja | <input type="checkbox"/> Trips de la mancha roja |
| <input type="checkbox"/> Gusano peludo | <input type="checkbox"/> Cochinillas Harinosas |
| <input type="checkbox"/> Gusano tornillo | <input type="checkbox"/> Queresas |
| <input type="checkbox"/> Picudo negro | <input type="checkbox"/> Otro _____ |
| <input type="checkbox"/> Picudo rayado | |

17. ¿Cuál es la plaga más importante en tu finca o parcela? *

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Arañita roja | <input type="checkbox"/> Trips de la mancha roja |
| <input type="checkbox"/> Gusano peludo | <input type="checkbox"/> Cochinillas Harinosas |
| <input type="checkbox"/> Gusano tornillo | <input type="checkbox"/> Queresas |
| <input type="checkbox"/> Picudo negro | <input type="checkbox"/> Otro _____ |
| <input type="checkbox"/> Picudo rayado | |

18. ¿Qué enfermedades están presentes en tu finca o parcela? *

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Sigatoka | <input type="checkbox"/> Marchitez por Fusarium (Mal de Panamá) |
| <input type="checkbox"/> Moko o marchitez bacteriana | <input type="checkbox"/> Pudrición blanda bacteriana |
| <input type="checkbox"/> Elefantiasis | <input type="checkbox"/> Otro _____ |
| <input type="checkbox"/> Virus | |

19. ¿Cuál es la enfermedad más importante en tu finca o parcela? *

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Sigatoka | <input type="checkbox"/> Marchitez por Fusarium (Mal de Panamá) |
| <input type="checkbox"/> Moko o marchitez bacteriana | <input type="checkbox"/> Pudrición blanda bacteriana |
| <input type="checkbox"/> Elefantiasis | <input type="checkbox"/> Otro _____ |
| <input type="checkbox"/> Virus | |

20. ¿Ha escuchado Ud. acerca del hongo Fusarium del plátano o también llamado Mal de Panamá? *

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> Sí | <input type="checkbox"/> No |
|-----------------------------|-----------------------------|

21. ¿Tiene plantas de plátano y/o banano afectadas por Fusarium en su finca o parcela?

- | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Sí | <input type="checkbox"/> No | <input type="checkbox"/> No sabe |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|

22. ¿Hace cuánto tiempo tiene conocimiento de la presencia de Fusarium (Mal de Panamá) en tu finca o parcela?

- Desde que empezó a producir 6 – 10 años No sabe
 1 – 5 años 11 – a más años

23. ¿Hay áreas abandonadas por causa de Fusarium (Mal de Panamá) ?

- Sí No No sabe

24. ¿Cuál es su percepción actual del avance de Fusarium (Mal de Panamá)?

- Está disminuyendo Está incrementando
 Se mantiene igual No sabe

25. ¿Qué hace con las plantas enfermas por Fusarium (Mal de Panamá)?

- Aísla el área Lo mismo que con las otras plantas, corta y distribuye los restos en el suelo
 Aplica cal Otro _____
 Aplica herbicida
 Aplica materia orgánica

26. ¿Tiene información de cómo se disemina Fusarium (Mal de Panamá)?

- Agua Viento
 Animales Zapatos
 Herramientas (machetes, cuchillos) No sabe
 Material de siembra Otro _____
 Vehículos

27. ¿Qué prácticas usas para manejar plagas y enfermedades?

- Implemento medidas de bioseguridad al ingreso del predio
 Aplico materia orgánica al suelo
 Uso semilla de calidad
 Hago tratamiento a la semilla
 Instalo coberturas vegetales
 Realizo labores culturales oportunas
 Evaluó o monitoreo la presencia de plagas en forma frecuente
 Coloco trampas para insectos
 Aplico plaguicidas orgánicos
 Aplico plaguicidas químicos
 Elimino plantas enfermas
 Desinfecto herramientas
 Fertilizo el cultivo
 Otro _____

Anexo 2: Base de datos de fincas con incidencia de la MF (Resultados)

field	LRS	nbin	Dind	Mapcomp	la	Inc_q	D_q	TC_q	la_q	CS_q	ppC_q
1	ran	ran	ran	ran	ran	0.09	1.001	21.91	1.2099	5.9	1061.8
2	ag	ag	ag	ag	ag	1.3	2.364	21.91	1.4321	3.4	721.7
3	ag	ag	ag	ag	ran	0.36	1.497	21.91	1.2577	9.5	721.7
4	ag	ag	ag	ag	ag	1.4	2.751	21.91	1.7306	4.4	721.7
5	ag	ag	ag	ag	ag	0.72	2.751	19.62	1.7874	0.9	630
6	ag	ag	ag	ag	ag	0.72	2.751	19.62	1.5986	1.3	630
7	ag	ag	ag	ag	ag	1.98	2.157	19.62	1.8972	2	630
8	ag	ag	ag	ag	ag	8.01	2.13	19.62	2.1191	3.3	630
9	ran	ag	ag	ag	ag	1.27	1.262	19.62	1.7589	3.2	630
10	ran	ran	ran	ran	ran	0.12	1.001	17.02	0.8391	0.2	630
11	ag	ag	ag	ran	ran	0.27	3.007	21.91	0.792	2.7	630
12	ag	ag	ag	ag	ran	2.25	2.424	21.91	1.1863	0.8	630
13	ran	ran	ran	ran	ran	0.12	1.001	21.91	0.9325	1.4	630
14	ag	ag	ag	ag	ran	1.8	2.19	19.62	1.102	1.6	630
15	ag	ag	ag	ag	ag	1.53	1.801	21.91	3.059	3.1	630
16	ag	ag	ag	ag	ag	3.51	1.966	19.62	2.0125	0.8	630
17	ag	ag	ag	ag	ag	1.08	3	19.62	1.6782	1.2	630
18	ag	ag	ag	ag	ag	8.16	2.285	20.03	3.5615	16.8	2013
19	ran	ran	ran	ran	ran	0.09	1.001	20.03	0.956	13.5	2013
20	ran	ran	ran	ran	ran	0.09	1.001	20.03	0.9325	9.9	2013
21	ag	ag	ag	ag	ran	0.81	1.656	20.03	1.0982	7	2013
22	ag	ag	ran	ran	ran	0.27	0.9958	19.15	0.7673	10.5	1803.75
23	ag	ag	ag	ran	ran	0.72	2.498	19.15	1.1504	4	1803.75
24	ag	ag	ag	ag	ag	0.36	1.497	19.15	1.3224	13.5	1803.75
25	ag	ag	ag	ran	ran	0.27	1.666	19.15	1.0778	8.9	1803.75
26	ag	ag	ag	ag	ran	4.32	2.226	19.15	1.1348	10.1	1803.75
27	ag	ag	ag	ag	ag	1.8	2.482	19.15	1.8409	18.9	1803.75
28	ag	ag	ag	ag	ag	10.81	2.065	19.15	1.6178	14.1	1803.75
29	ag	ag	ag	ag	ag	4.05	1.865	19.15	2.5615	10.6	1803.75
30	ran	ran	ran	ag	ran	0.72	0.9833	19.15	1.2027	7.6	1803.75
31	ag	ag	ag	ag	ag	2.88	2.092	19.15	1.4958	10.7	1803.75
32	ag	ag	ag	ag	ag	3.51	1.861	19.15	1.6345	9.1	1803.75
33	ag	ag	ag	ag	ag	5	1.842	19.15	2.0315	9.9	1803.75
34	ag	ag	ag	ag	ag	3.3	1.55	19.15	2.2416	9.8	1803.75
35	ran	ran	ran	ran	ran	1.17	0.9723	19.15	0.9816	2.5	1803.75
36	ran	ran	ran	ran	ran	0.23	0.9912	19.15	0.8239	4.9	1803.75
37	ag	ag	ag	ag	ag	0.24	1.497	11.24	1.5541	5.3	1803.75
38	ran	ag	ag	ran	ran	2	1.376	11.24	0.8317	6.2	1803.75
39	ran	ran	ran	ran	ran	0.18	0.9984	11.24	0.9788	14.6	1803.75
40	ran	ran	ran	ag	ag	0.63	0.9863	11.24	1.4124	2.8	1803.75
41	ran	ran	ran	ag	ag	0.54	0.9888	11.24	1.2667	8	1803.75
42	ran	ag	ran	ag	ag	1.92	1.081	11.24	1.4213	8.6	1803.75
43	ag	ag	ag	ag	ag	0.72	1.741	13.52	2.4596	0.8	972.6
44	ag	ag	ag	ag	ag	0.6	1.591	18.58	1.3941	1.6	972.6
45	ag	ag	ag	ran	ran	6.4	1.669	18.58	1.17	4.4	972.6
46	ag	ag	ag	ag	ag	0.1	1.344	18.58	1.6107	3.5	972.6
47	ag	ag	ag	ag	ag	0.9	1.382	18.58	1.3087	2.7	972.6
48	ran	ran	ran	ran	ran	0.54	0.9958	18.58	0.9667	2.9	972.6
49	ag	ag	ag	ag	ag	0.86	1.296	18.58	2.478	1.3	972.6
50	ag	ag	ag	ag	ag	1.53	1.737	18.58	2.6254	5.1	972.6
51	ran	ran	ran	ran	ran	0.27	0.9958	18.58	0.7873	3	972.6
52	ag	ag	ag	ag	ag	2.7	2.37	26.17	1.5301	2.3	2155.1
53	ag	ag	ag	ag	ag	3	2.085	26.17	1.6678	1.5	2155.1

field	Edad_q	Alt_q	HR_q	RangoSp	Inc_	Sist	Zona	Var	Alt	pp	Temp
1	36	627	68.98	NA	<1%	Monoc	CAJ	Mix	<900msnm	<1100mm	>20°C
2	12	501	68.98	8.52	1_3%	Monoc	CAJ	Isla	<900msnm	<1100mm	>20°C
3	24	439	68.98	NA	<1%	Monoc	CAJ	Isla	<900msnm	<1100mm	>20°C
4	96	510	68.98	8.22	1_3%	Monoc	CAJ	Otra	<900msnm	<1100mm	>20°C
5	24	920	76.22	25.5	<1%	Monoc	AMA	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
6	30	867	76.22	12.12	<1%	Monoc	AMA	Seda	<900msnm	<1100mm	<20°C
7	72	969	76.22	27.42	1_3%	Asoc	AMA	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
8	24	908	76.22	45.78	>5%	Monoc	AMA	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
9	18	895	76.22	22.2	1_3%	Monoc	AMA	Seda	<900msnm	<1100mm	<20°C
10	9	783	73.89	NA	<1%	Monoc	AMA	Seda	<900msnm	<1100mm	<20°C
11	36	550	68.98	7.56	<1%	Monoc	AMA	Mix	<900msnm	<1100mm	>20°C
12	30	749	68.98	10.284	1_3%	Monoc	AMA	Seda	<900msnm	<1100mm	>20°C
13	35	820	68.98	7.2	<1%	Monoc	AMA	Seda	<900msnm	<1100mm	>20°C
14	84	750	76.22	NA	1_3%	Asoc	AMA	Seda	<900msnm	<1100mm	<20°C
15	48	717	68.98	NA	1_3%	Asoc	AMA	Seda	<900msnm	<1100mm	>20°C
16	72	856	76.22	10.5	3_5%	Monoc	AMA	Seda	<900msnm	<1100mm	<20°C
17	24	580	76.22	9.78	1_3%	Monoc	AMA	Seda	<900msnm	<1100mm	<20°C
18	24	890	72.23	71.04	>5%	Asoc	JUN	Isla	<900msnm	>1100mm	>20°C
19	18	840	72.23	NA	<1%	Asoc	JUN	Isla	<900msnm	>1100mm	>20°C
20	24	684	72.23	NA	<1%	Monoc	JUN	Isla	<900msnm	>1100mm	>20°C
21	24	727	72.23	NA	<1%	Monoc	JUN	Isla	<900msnm	>1100mm	>20°C
22	24	621	73.57	NA	<1%	Asoc	JUN	Isla	<900msnm	>1100mm	<20°C
23	12	1015	73.57	NA	<1%	Monoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
24	36	1044	73.57	10.86	<1%	Monoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
25	24	1033	73.57	NA	<1%	Monoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
26	18	954	73.57	11.958	3_5%	Monoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
27	30	880	73.57	21.48	1_3%	Monoc	JUN	Isla	<900msnm	>1100mm	<20°C
28	20	972	73.57	19.02	>5%	Monoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
29	24	1057	73.57	19.62	3_5%	Asoc	JUN	Otra	>900msnm	>1100mm	<20°C
30	7	1039	73.57	NA	<1%	Monoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
31	24	563	73.57	14.94	1_3%	Asoc	JUN	Isla	<900msnm	>1100mm	<20°C
32	18	607	73.57	35.34	3_5%	Monoc	JUN	Isla	<900msnm	>1100mm	<20°C
33	15	1025	73.57	20.64	3_5%	Asoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
34	18	1082	73.57	NA	3_5%	Asoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
35	18	1460	73.57	10.98	1_3%	Asoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
36	12	1280	73.57	NA	<1%	Monoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
37	30	1334	78.28	14.46	<1%	Monoc	JUN	Isla	>900msnm	>1100mm	<20°C
38	20	1430	78.28	14.04	1_3%	Monoc	JUN	Mix	>900msnm	>1100mm	<20°C
39	18	1505	78.28	63.72	<1%	Asoc	JUN	Mix	>900msnm	>1100mm	<20°C
40	24	1336	78.28	10.62	<1%	Asoc	JUN	Seda	>900msnm	>1100mm	<20°C
41	24	1070	78.28	NA	<1%	Asoc	JUN	Seda	>900msnm	>1100mm	<20°C
42	12	1150	78.28	NA	1_3%	Monoc	JUN	Mix	>900msnm	>1100mm	<20°C
43	24	1018	79.63	7.92	<1%	Monoc	CUS	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
44	30	1007	77.28	NA	<1%	Monoc	CUS	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
45	48	1008	77.28	7.14	>5%	Asoc	CUS	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
46	30	986	77.28	NA	<1%	Asoc	CUS	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
47	60	1009	77.28	12.9	<1%	Asoc	CUS	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
48	30	969	77.28	9.672	<1%	Monoc	CUS	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
49	36	741	77.28	NA	<1%	Asoc	CUS	Seda	>900msnm	<1100mm	<20°C
50	30	770	77.28	20.7	1_3%	Monoc	CUS	Seda	<900msnm	<1100mm	<20°C
51	72	887	77.28	NA	<1%	Asoc	CUS	Seda	<900msnm	<1100mm	<20°C
52	20	132	79.08	21.6	1_3%	Monoc	SML	Mix	<900msnm	>1100mm	>20°C
53	18	151	79.08	NA	3_5%	Monoc	SML	Otra	<900msnm	>1100mm	>20°C

field	Manejo	CritSMS	ConocMFM	CSDaño	Edadc	EnfImp	Enf_Imp	Raz_elim	OrigenMS
1	mmay	cMS_may	cMFM_may	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	su_parc
2	mreg	cMS_reg	cMFM_may	<Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	su_parc
3	mmen	cMS_reg	cMFM_may	>Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	comp_f_vec
4	mreg	cMS_men	cMFM_men	<Daño	>24m	MFM	MFM	NOe	su_parc
5	mreg	cMS_reg	cMFM_men	<Daño	<24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	comp_f_vec
6	mmen	cMS_may	cMFM_may	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	NOe	su_parc
7	mmen	cMS_may	cMFM_reg	<Daño	>24m	MFM	MFM	NOe	su_parc
8	mreg	cMS_men	cMFM_reg	<Daño	<24m	MFM	MFM	bajaprode	comp_f_vec
9	mreg	cMS_men	cMFM_reg	<Daño	<24m	MFM	MFM	bajaprode	comp_f_vec
10	mreg	cMS_reg	cMFM_reg	<Daño	<24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	comp_f_vec
11	mmay	cMS_may	cMFM_reg	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	su_parc
12	mmen	cMS_reg	cMFM_reg	<Daño	>24m	MFM	MFM	MFMe	comp_f_vec
13	mreg	cMS_reg	cMFM_men	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	comp_f_vec
14	mmen	cMS_men	cMFM_reg	<Daño	>24m	Otra	PB	NOe	su_parc
15	mmen	cMS_reg	cMFM_may	<Daño	>24m	MFM	MFM	NOe	comp_f_vec
16	mreg	cMS_reg	cMFM_may	<Daño	>24m	MFM	MFM	NOe	su_parc
17	mreg	cMS_reg	cMFM_may	<Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	comp_f_vec
18	mreg	cMS_reg	cMFM_may	>Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	su_parc
19	mreg	cMS_may	cMFM_may	>Daño	<24m	Otra	Sigatoka	NOe	su_parc
20	mreg	cMS_reg	cMFM_reg	>Daño	<24m	Otra	Sigatoka	OtroSe	comp_f_vec
21	mreg	cMS_reg	cMFM_reg	<Daño	<24m	Otra	Sigatoka	NOe	su_parc
22	mreg	cMS_may	cMFM_may	>Daño	<24m	Otra	Sigatoka	OtroSe	su_parc
23	mreg	cMS_may	cMFM_reg	<Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	su_parc
24	mmay	cMS_reg	cMFM_reg	>Daño	>24m	MFM	MFM	NOe	comp_f_vec
25	mmay	cMS_reg	cMFM_reg	<Daño	<24m	MFM	MFM	OtroSe	su_parc
26	mmay	cMS_reg	cMFM_may	>Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	comp_f_vec
27	mmay	cMS_reg	cMFM_reg	>Daño	>24m	MFM	MFM	MFMe	su_parc
28	mmay	cMS_may	cMFM_reg	>Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	su_parc
29	mmay	cMS_reg	cMFM_may	>Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	su_parc
30	mmay	cMS_reg	cMFM_reg	<Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	comp_f_vec
31	mreg	cMS_reg	cMFM_reg	>Daño	<24m	MFM	MFM	OtroSe	comp_f_vec
32	mmay	cMS_reg	cMFM_may	<Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	comp_f_vec
33	mreg	cMS_reg	cMFM_reg	>Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	su_parc
34	mmay	cMS_men	cMFM_reg	>Daño	<24m	MFM	MFM	Otroe	su_parc
35	mreg	cMS_reg	cMFM_reg	<Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	comp_vcm
36	mmay	cMS_reg	cMFM_may	<Daño	<24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	su_parc
37	mreg	cMS_reg	cMFM_may	<Daño	>24m	MFM	MFM	MFMe	comp_f_vec
38	mmay	cMS_reg	cMFM_may	<Daño	<24m	Otra	Sigatoka	OtroSe	comp_f_vec
39	mmay	cMS_men	cMFM_reg	>Daño	<24m	Otra	Sigatoka	OtroSe	su_parc
40	mreg	cMS_may	cMFM_may	<Daño	<24m	Otra	Elefantias	MFMe	comp_vcm
41	mreg	cMS_may	cMFM_reg	<Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	su_parc
42	mmay	cMS_may	cMFM_may	<Daño	<24m	MFM	MFM	MFMe	comp_vcm
43	mmen	cMS_reg	cMFM_reg	<Daño	<24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	comp_f_vec
44	mmen	cMS_reg	cMFM_men	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	comp_f_vec
45	mmen	cMS_men	cMFM_men	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	su_parc
46	mmen	cMS_reg	cMFM_men	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	su_parc
47	mmen	cMS_men	cMFM_men	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	su_parc
48	mmen	cMS_reg	cMFM_men	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	NOe	su_parc
49	mmen	cMS_reg	cMFM_men	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	bajaprode	su_parc
50	mreg	cMS_reg	cMFM_may	<Daño	>24m	Otra	PB	bajaprode	su_parc
51	mmen	cMS_men	cMFM_men	<Daño	>24m	Otra	Sigatoka	NOe	su_parc
52	mmen	cMS_men	cMFM_men	<Daño	<24m	Otra	No sabe	Otrae	su_parc
53	mreg	cMS_men	cMFM_men	<Daño	<24m	Otra	Sigatoka	Otrae	comp_f_vec

field	Crit_Sel_MS	Trat_MS	Lugar_limMS	Herbicida	Insecticida	Fungicida	Frec_apH_q	Frec_apH
1	t_rac_pm	Plag_q	otro_sitio	herb_q	Insect_org	no_fung	5	3_5
2	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
3	t_hij_san	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
4	t_hij_san	no_plag	otro_sitio	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
5	t_rac_pm	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
6	t_rac_pm	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
7	t_rac_pm	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
8	t_rac_pm	no_plag	in_situ	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
9	t_rac_pm	no_plag	in_situ	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
10	t_rac_pm	Plag_q	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
11	t_rac_pm	Plag_q	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
12	t_hij_san	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
13	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
14	t_hij_san	no_plag	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
15	t_hij_san	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
16	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	5	3_5
17	t_hij_san	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
18	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
19	t_hij_san	Plag_q	in_situ	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
20	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
21	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
22	t_rac_pm	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	fung_q	3	1_3
23	t_rac_pm	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
24	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	fung_q	3	1_3
25	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
26	t_hij_san	Plag_q	in_situ	no_herb_q	no_insect	fung_org	3	1_3
27	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
28	t_rac_pm	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	fung_q	3	3_5
29	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	fung_q	5	3_5
30	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	fung_q	5	3_5
31	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
32	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
33	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
34	t_hij_san	no_plag	nn	no_herb_q	Insect_org	no_fung	5	3_5
35	t_hij_san	no_plag	otro_sitio	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
36	t_hij_san	ceniza_plag	nn	no_herb_q	Insect_org	fung_org	5	3_5
37	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
38	comp_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
39	t_hij_cp	no_plag	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
40	t_hij_san	agua_c	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
41	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
42	t_hij_san	Plag_q	nn	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3
43	t_hij_san	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
44	t_hij_san	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
45	t_hij_san	no_plag	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
46	t_hij_san	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
47	t_hij_san	no_plag	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
48	t_hij_san	ceniza_plag	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
49	t_hij_san	Plag_q	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
50	t_hij_san	Plag_q	nn	no_herb_q	Insect_q	no_fung	3	1_3
51	t_hij_san	no_plag	nn	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
52	t_rac_pm	no_plag	in_situ	no_herb_q	no_insect	no_fung	0	Nunca
53	t_hij_san	no_plag	en_parcs	herb_q	no_insect	no_fung	3	1_3

field	Manejo_S_F	Manejo_S_F.1	Eva_plagas_enf	Acción_pl_enf	Desinf_herr	Conoc_MFM
1	fert	fert	si_eva	e_cal_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
2	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
3	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
4	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	no_conoc_mfm
5	cob_veg	cob_veg	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	no_conoc_mfm
6	nn_s	nn_s	si_eva	e_cen_hcl_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
7	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
8	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
9	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
10	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
11	nn_s	nn_s	no_eva	e_quema_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
12	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
13	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	no_conoc_mfm
14	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
15	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	si_conoc_mfm
16	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
17	nn_s	nn_s	no_eva	aplica_herbicida	nn_des_h	si_conoc_mfm
18	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
19	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
20	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
21	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
22	nn_s	nn_s	no_eva	e_herbicida_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
23	fert	fert	no_eva	Nada	nn_des_h	si_conoc_mfm
24	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	si_conoc_mfm
25	nn_s	nn_s	no_eva	aplica_herbicida	nn_des_h	si_conoc_mfm
26	fert	fert	no_eva	aplica_herbicida	nn_des_h	si_conoc_mfm
27	fert	fert	no_eva	e_corta_quema	nn_des_h	si_conoc_mfm
28	fert_MO	MO	no_eva	e_herbicida_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
29	fert	fert	no_eva	e_herbicida_quema	nn_des_h	si_conoc_mfm
30	fert	fert	no_eva	e_herbicida_quema	nn_des_h	si_conoc_mfm
31	cob_veg	cob_veg	no_eva	Nada	nn_des_h	si_conoc_mfm
32	fert	fer	no_eva	quema	nn_des_h	si_conoc_mfm
33	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
34	nn_s	nn_s	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
35	fer_MO	MO	si_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
36	MO	MO	si_eva	e_dist_urea_cubre_insitu	si_des_herr	si_conoc_mfm
37	fert	fert	no_eva	e_dist_insitu	si_des_herr	si_conoc_mfm
38	fert_MO	MO	no_eva	Nada	si_des_herr	si_conoc_mfm
39	fert	fert	si_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
40	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	si_conoc_mfm
41	MO	MO	no_eva	e_dist_insitu	nn_des_h	si_conoc_mfm
42	fert_cob_veg	cob_veg	si_eva	e_dist_insitu	si_des_herr	si_conoc_mfm
43	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	si_conoc_mfm
44	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	no_conoc_mfm
45	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	no_conoc_mfm
46	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	no_conoc_mfm
47	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	no_conoc_mfm
48	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	no_conoc_mfm
49	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	no_conoc_mfm
50	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	si_conoc_mfm
51	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	no_conoc_mfm
52	fert	fert	no_eva	Nada	nn_des_h	no_conoc_mfm
53	nn_s	nn_s	no_eva	Nada	nn_des_h	no_conoc_mfm

field	conoc_dis_mfm	con_dis_mfm_1	Long_max	Long_max.1	Fincas_ab_MFM
1	ms_z_vehi_herr_v_dis	s_dis	5	3_5	no_mfm_ab
2	ms_agua_z_vehi_herr_dis	s_dis	5	3_5	si_mfm_ab
3	ms_agua_z_vehi_herr_dis	herr_dis	5	3_5	ns_mfm_ab
4	no_con_dis	herr_dis	5	3_5	ns_mfm_ab
5	no_con_dis	herr_dis	10	5_10	no_mfm_ab
6	ms_dis	herr_dis	10	5_10	no_mfm_ab
7	no_con_dis	herr_dis	10	5_10	ns_mfm_ab
8	herr_z_dis	herr_dis	10	5_10	no_mfm_ab
9	herr_z_dis	herr_dis	10	5_10	no_mfm_ab
10	herr_dis	herr_dis	10	5_10	no_mfm_ab
11	no_con_dis	ms_dis	5	3_5	no_mfm_ab
12	no_con_dis	ms_dis	14	>10	no_mfm_ab
13	no_con_dis	herr_dis	10	5_10	no_mfm_ab
14	herr_dis	herr_dis	10	5_10	no_mfm_ab
15	ms_herr_dis	ms_s_dis	10	5_10	no_mfm_ab
16	ms_dis	ms_s_dis	10	5_10	no_mfm_ab
17	ms_dis	ms_dis	10	5_10	no_mfm_ab
18	herr_ms_dis	ms_dis	5	3_5	no_mfm_ab
19	herr_ms_dis	ms_dis	5	3_5	no_mfm_ab
20	no_con_dis	ms_dis	5	3_5	no_mfm_ab
21	no_con_dis	ms_dis	5	3_5	no_mfm_ab
22	ms_suelo_dis	ms_dis	2	1_2	si_mfm_ab
23	no_con_dis	ms_dis	2	1_2	ns_mfm_ab
24	no_con_dis	ms_dis	5	3_5	no_mfm_ab
25	herr_dis	ms_dis	2	1_2	si_mfm_ab
26	ms_dis	ms_s_dis	2	1_2	si_mfm_ab
27	no_con_dis	ms_s_dis	5	3_5	si_mfm_ab
28	herr_dis	ms_s_dis	2	1_2	si_mfm_ab
29	ms_ctco_dis	ms_s_dis	5	3_5	si_mfm_ab
30	herr_dis	ms_s_dis	2	1_2	si_mfm_ab
31	herr_dis	ms_s_dis	5	3_5	si_mfm_ab
32	ms_herr_dis	nc_dis	2	1_2	si_mfm_ab
33	no_con_dis	nc_dis	5	3_5	si_mfm_ab
34	herr_dis	nc_dis	5	3_5	ns_mfm_ab
35	agua_z_vehi_herr_dis	nc_dis	5	3_5	no_mfm_ab
36	ms_z_a_dis	nc_dis	5	3_5	si_mfm_ab
37	ms_dis	nc_dis	5	3_5	no_mfm_ab
38	ms_z_a_dis	nc_dis	2	1_2	ns_mfm_ab
39	herr_dis	nc_dis	5	3_5	si_mfm_ab
40	ms_z_herr_dis	nc_dis	14	>10	no_mfm_ab
41	z_herr_dis	nc_dis	10	5_10	no_mfm_ab
42	ms_z_a_herr_dis	nc_dis	10	5_10	si_mfm_ab
43	a_v_dis	nc_dis	10	5_10	ns_mfm_ab
44	no_con_dis	nc_dis	10	5_10	ns_mfm_ab
45	no_con_dis	nc_dis	10	5_10	ns_mfm_ab
46	no_con_dis	nc_dis	10	5_10	ns_mfm_ab
47	no_con_dis	nc_dis	10	5_10	ns_mfm_ab
48	no_con_dis	nc_dis	10	5_10	ns_mfm_ab
49	no_con_dis	nc_dis	10	5_10	ns_mfm_ab
50	ms_herr_dis	nc_dis	10	5_10	no_mfm_ab
51	no_con_dis	nc_dis	10	5_10	ns_mfm_ab
52	no_con_dis	nc_dis	5	3_5	ns_mfm_ab
53	no_con_dis	s_dis	2	1_2	ns_mfm_ab

field	Prov	Distrito	Género	TipoMS	Inc_c	Asoc
1	JAÉN	CHIRI	M	Corm_hij	<1%	Mon
2	JAÉN	STA_ROSA	M	Corm_hij	1_4%	Mon
3	JAÉN	STA_ROSA	M	Corm_hij	<1%	Mon
4	JAÉN	STA_ROSA	M	Corm_hij	1_4%	Mon
5	UTCUB	CAJARU	M	Corm_hij	<1%	Mon
6	UTCUB	CAJARU	M	Corm_hij	<1%	Mon
7	UTCUB	CAJARU	M	Corm_hij	1_4%	Cacao
8	UTCUB	CAJARU	F	Corm_hij	>4%	Mon
9	UTCUB	CAJARU	F	Corm_hij	1_4%	Mon
10	UTCUB	CAJARU	M	Corm_hij	<1%	Mon
11	BAGUA	ARAMAG	M	Corm_hij	<1%	Mon
12	BAGUA	L_PECA	M	Corm_hij	1_4%	Mon
13	BAGUA	L_PECA	M	Corm_hij	<1%	Mon
14	BAGUA	L_PECA	M	Corm_hij	1_4%	Cacao
15	BAGUA	L_PECA	M	Corm_hij	1_4%	Cacao
16	BAGUA	L_PECA	M	Corm_hij	1_4%	Mon
17	UTCUB	CAJARU	M	Corm_hij	1_4%	Mon
18	SATIPO	PANGO	M	Corm_hij	>4%	Frut
19	SATIPO	PANGO	M	Corm_hij	<1%	Cacao
20	SATIPO	MAZAM	M	Corm_hij	<1%	Mon
21	SATIPO	MAZAM	M	Corm_hij	<1%	Mon
22	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	<1%	Café
23	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	<1%	Mon
24	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	<1%	Mon
25	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	<1%	Mon
26	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	>4%	Mon
27	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	1_4%	Mon
28	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	>4%	Mon
29	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	>4%	Café
30	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	<1%	Mon
31	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	1_4%	Frijol
32	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	1_4%	Mon
33	CHANCH	PERENÉ	M	Corm_hij	>4%	Frut
34	CHANCH	PERENÉ	F	Corm_hij	1_4%	Frut
35	CHANCH	SLSH	M	cam_term	1_4%	Café
36	CHANCH	SLSH	M	Corm_hij	<1%	Mon
37	CHANCH	CHAN	F	Corm_hij	<1%	Mon
38	CHANCH	CHAN	F	Corm_hij	1_4%	Mon
39	CHANCH	CHAN	M	Corm_hij	<1%	Café
40	CHANCH	VITOC	M	cam_term	<1%	Frut
41	CHANCH	VITOC	M	cam_term	<1%	Café_Frut
42	CHANCH	VITOC	M	Corm_hij	1_4%	Mon
43	L_CONV	ECHAR	M	Corm_hij	<1%	Mon
44	L_CONV	ECHAR	F	Corm_hij	<1%	Mon
45	L_CONV	ECHAR	M	Corm_hij	>4%	Papaya
46	L_CONV	ECHAR	M	Corm_hij	<1%	Café_Cacao
47	L_CONV	ECHAR	M	Corm_hij	<1%	Cacao
48	L_CONV	ECHAR	M	Corm_hij	<1%	Mon
49	L_CONV	ECHAR	M	Corm_hij	<1%	Cacao
50	L_CONV	ECHAR	M	Corm_hij	1_4%	Mon
51	L_CONV	ECHAR	F	Corm_hij	<1%	Cacao
52	A_AMZ_SML	YURIM	M	Corm_hij	1_4%	Mon
53	A_AMZ_SML	YURIM	M	Corm_hij	1_4%	Mon