

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS
LICENCIATURA EN AGRICULTURA ALTERNATIVA

**Evaluación de mezclas de fungicidas alternativos para el control de sigatoka negra
[*Pseudocercospora fijiensis* (M. Morelet) Deighton] en el cultivo de banano (*Musa spp.*) en
Costa Rica**

**Trabajo de graduación bajo la modalidad de proyecto de graduación sometido a consideración
del Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional para
optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía**

Bach. Emmanuel Morales Cordero

Heredia, Costa Rica

Mayo, 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS
LICENCIATURA EN AGRICULTURA ALTERNATIVA

**Evaluación de mezclas de fungicidas alternativos para el control de sigatoka negra
[*Pseudocercospora fijiensis* (M. Morelet) Deighton] en el cultivo de banano (*Musa spp.*) en
Costa Rica**

Por:

Bach. Emmanuel Morales Cordero

Tutor:

Lic. Luis Fernando Benavides López

Asesores:

M.Sc. José Alonso Calvo Araya

M.Sc. Juan F. Delgado Fernández

Heredia, Costa Rica

Mayo, 2023

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

M.Sc. Margaret Verónica Pinnock Branford
Representante del Decanato de Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

M.Sc. Andrés Alpízar Naranjo
Director Escuela de Ciencias Agrarias

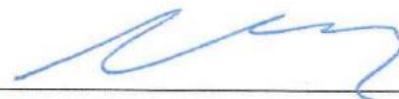


Lic. Luis Fernando Benavides López

Tutor

M.Sc. José Alonso Calvo Araya

Asesor



M.Sc. Juan F. Delgado Fernández

Asesor



Bach. Emmanuel Morales Cordero

Postulante

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi vida.

A mi papá y mamá, por creer en mí y alentarme por siempre e incondicionalmente. A mis hermanos, que son modelos de vida a seguir y siempre me han tendido la mano.

A Daniela CB, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento.

A la Familia Carbonell Brenes, por su gran ayuda y abrirme las puertas de su hogar.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de una forma especial al Ing. Juan F. Delgado que sin conocerme me abrió las puertas en su equipo de trabajo y confió en mí para la elaboración del proyecto de graduación. También, al Ing. Luis Fernando B. por ser un gran guía y enseñarme tanto, y además, a todo el equipo de investigación LIFE-RID sin lugar a dudas fue una experiencia muy enriquecedora.

Agradecer también a los profesores formadores de la ECA, de manera especial al M. Sc. José Alonso Calvo Araya por brindarme su ayuda y guía como lector de mi Trabajo Final de Graduación, así como también al M.Sc. Alejandro Vargas Martínez por su gran ayuda en la parte estadística del trabajo y observaciones para mejorar.

Finalmente, agradezco a cada una de las personas que de una u otra forma me apoyaron e impulsaron a que esto sea una realidad.

De la forma más sincera posible, muchas gracias.

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento y desempeño de mezclas de fungicidas con coadyuvantes, con la finalidad de generar nuevas estrategias alternativas para el control de sigatoka negra (*Pseudocercospora fijiensis*) en el cultivo de banano en Costa Rica. Las mezclas se sometieron a las pruebas individuales de estabilidad, tenacidad y Single Leaf. La prueba de estabilidad registró el comportamiento de diferentes mezclas en condición de reposo durante el periodo de 1 hora, además de características de pH, volumen, peso y densidad de las mismas, se llevó a cabo ajustando dosis comerciales de los productos usados a un volumen de 500 ml, respetando órdenes adecuados de agregación (emulsión en primer lugar), evaluando cada 5 min homogeneidad o separación, % de espuma y sedimentación, y tomando capturas fotográficas a los 0, 20, 40 y 60 minutos del periodo de evaluación. A través de esta primera prueba se logró evidenciar el potencial del coadyuvante con ingrediente activo (i.a.) Triglicéridos hidrogenados, ya que este logra estabilizar la mayoría de las mezclas evaluadas, así como mantener niveles óptimos de pH, mencionando que mezclas con componentes de origen orgánico presentaron inestabilidad. La prueba de tenacidad determinó el desempeño de mezclas inhibiendo la germinación de ascosporas de *P. fijiensis* después de eventos de alta precipitación, se ejecutó aplicando las mezclas en muestras de hoja 1 de la planta de banano y se sometió a simulación de lluvia, estas se inocularon con ascosporas y reposaron 3 días con condiciones idóneas para la germinación, y por medio de microscopio a las muestras se les determinó porcentajes de germinación afectados por la acción de las mezclas. Esta prueba mostró la importancia de los coadyuvantes cuando se presentan eventos de alta precipitación, debido a que ayuda a la adherencia de la mezcla dificultando que esta se lave producto de la lluvia, y además, evidenció la efectividad de las mezclas inhibiendo la germinación de ascosporas. Por último, la prueba de Single Leaf estudió el efecto de la aplicación de las mezclas en hojas candela de las plantas de banano inhibiendo el desarrollo de síntomas de sigatoka negra, esta prueba se dividió en 6 ensayos diferentes, teniendo cinco repeticiones cada mezcla y evaluando semanalmente 21 días después de la primer aplicación finalizando cuando el testigo absoluto evaluado tuvo afectación de la enfermedad en un 100 %, esta se realizó a través de la escala de Stover, para posteriormente realizar su respectivo análisis estadístico, donde se identificó que los tratamientos evaluados tuvieron un efecto protectante, ya que lograron retener (algunos con mejor desempeño) la evolución de síntomas de *P. fijiensis* en el tejido vegetativo.

Palabras clave: fungicidas, sigatoka negra, comportamiento, Single Leaf y eficacia.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the behavior and performance of mixtures of fungicides with adjuvants, in order to generate new alternative strategies for the control of black sigatoka (*Pseudocercospora fijiensis*) in banana cultivation in Costa Rica. The mixtures were subjected to individual tests for stability, toughness and Single Leaf. The stability test recorded the behavior of different mixtures in rest condition during the period of 1 hour, in addition to characteristics of pH, volume, weight and density of the same, it was carried out adjusting commercial doses of the products used at a volume of 500 ml, respecting appropriate orders of aggregation (emulsion in the first place), evaluating every 5 min homogeneity or separation, % foam and sedimentation, and taking photographic captures at 0, 20, 40 and 60 minutes of the evaluation period. Through this first test, it was possible to demonstrate the potential of the adjuvant with active ingredient (a.i.) hydrogenated triglycerides, since it manages to stabilize most of the evaluated mixtures, as well as maintain optimal pH levels, mentioning that mixtures with components of organic origin presented instability. The tenacity test determined the performance of mixtures inhibiting the germination of *P. fijiensis* ascospores after high rainfall events, it was carried out by applying the mixtures to leaf samples 1 of the banana plant and subjected to rainfall simulation, these were They were inoculated with ascospores and rested for 3 days with ideal conditions for germination, and through a microscope the germination percentages affected by the action of the mixtures were determined on the samples. This test showed the importance of adjuvants when high precipitation events occur, because it helps the mixture adhere, making it difficult for it to wash off as a result of rain, and also evidenced the effectiveness of the mixtures by inhibiting the germination of ascospores. . Lastly, the Single Leaf test studied the effect of the application of the mixtures on candela leaves of banana plants, inhibiting the development of black sigatoka symptoms. This test was divided into 6 different tests, having five repetitions for each mixture and evaluating weekly 21 days after the first application ending when the absolute control evaluated had 100 % disease involvement, this was done through the Stover scale, to later carry out its respective statistical analysis, where it was identified that the treatments evaluated they had a protective effect, since they managed to retain (some with better performance) the evolution of symptoms of *P. fijiensis* in the vegetative tissue.

Keywords: fungicides, black sigatoka, behavior, Single Leaf and efficacy.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1. El cultivo de banano	4
3.1.1. Taxonomía, condiciones climáticas idóneas y producción mundial	4
3.1.2. Importancia del cultivo de banano en Costa Rica	4
3.1.3. Principales enfermedades en el cultivo de banano	6
3.2. El patógeno <i>P. fijiensis</i>	6
3.2.1. Principales características morfológicas.....	6
3.2.2. Taxonomía de <i>P. fijiensis</i>	7
3.2.3. Importancia económica.....	8
3.2.4. Epidemiología de la enfermedad	8
3.2.5. Distribución geográfica y condiciones ambientales óptimas de la enfermedad.....	8
3.2.6. Ciclo de vida y sintomatología de la enfermedad sigatoka negra	9
3.3. Control de la enfermedad	11
3.4. Problemática entorno al uso de mancozeb.....	12
3.5. Estrategias desarrolladas para evaluar sigatoka negra en el cultivo de banano.....	13
4. METODOLOGÍA	14
4.1. Localización de zona de estudio	14
4.2. Fungicidas y coadyuvantes utilizados para la investigación	15

4.3. Prueba de estabilidad	16
4.3.1. Mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados	17
4.3.2. Análisis de la prueba.....	18
4.4. Prueba de Tenacidad	19
4.4.1. Mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluadas	20
4.4.2. Variables evaluadas	21
4.4.3. Análisis estadístico	21
4.5. Prueba de Single Leaf	22
4.5.1. Estructura del área experimental y su respectivo manejo.....	22
4.5.2. Desarrollo de la prueba.....	23
4.5.3. Mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados	24
4.5.4. Variables evaluadas	26
4.5.5. Análisis estadístico	27
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
5.1. Pruebas de estabilidad	29
5.2. Prueba de tenacidad	35
5.2.1. Evaluación visual de la cobertura de gota de las mezclas antes y después del evento de precipitación	35
5.2.2. Eficacia biológica de los diferentes tratamientos evaluados en la prueba de tenacidad.....	39
5.3. Prueba de Single Leaf	40
5.3.1. Eficacia temprana de mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluadas en los diferentes ensayos, a través de la prueba de Single Leaf	40
6. CONCLUSIONES	46
7. RECOMENDACIONES	47
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
9. ANEXOS	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inventario de productos agrícolas utilizados en las diferentes pruebas.....	16
Tabla 2. Mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluadas a través de la prueba de estabilidad...	18
Tabla 3. Escalas y valores para interpretación de observaciones.....	19
Tabla 4. Mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluados a través de la prueba de tenacidad.....	20
Tabla 5. Ensayo 1 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.....	24
Tabla 6. Ensayo 2 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.....	25
Tabla 7. Ensayo 3 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.....	25
Tabla 8. Ensayo 4 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.....	25
Tabla 9. Ensayo 5 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.....	26
Tabla 10. Ensayo 6 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.....	26
Tabla 11. Características físico-químicas de las mezclas estudiadas (Parte 1).....	29
Tabla 12. Características físico-químicas de las mezclas estudiadas (Parte 2).....	30
Tabla 13. Características físico-químicas de las mezclas estudiadas (Parte 3).....	31
Tabla 14. Resumen de evaluaciones a las mezclas de interés en periodo de reposo (Parte 1).....	32
Tabla 15. Resumen de evaluaciones a las mezclas de interés en periodo de reposo (Parte 2).....	33
Tabla 16. Efecto de los tratamientos evaluados sobre la germinación de ascosporas.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales destinos de las exportaciones bananeras en Costa Rica.....	5
Figura 2. Estructuras reproductivas de <i>P. fijiensis</i> . 1. Conidios y conidióforo. 2. Espermacias. 3 y 5. Ascosporas bicelulares sin germinar y germinadas, respectivamente. 4. Crecimiento de una hifa.....	7
Figura 3. Ciclo de vida de la enfermedad sigatoka negra en el cultivo de banano.....	9
Figura 4. Estadios de la enfermedad sigatoka negra en el cultivo de banano.....	10
Figura 5. Estación Experimental LIFE-RID.....	15
Figura 6. Diagrama de prueba de estabilidad.....	17
Figura 7. Diagrama de prueba de tenacidad.....	20
Figura 8. Parcelas experimentales de banano.....	22
Figura 9. 1. Cinta para identificar hojas aplicadas. 2 y 3. Cuadrículas dibujadas en área aplicada para evaluación. 4. Hoja candela.....	23
Figura 10. Diagrama de prueba de Single Leaf.....	24
Figura 11. Escala de afectación de sigatoka negra en hoja de banano.....	27
Figura 12. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 11. Ejemplo de mezcla homogénea en todo su periodo de evaluación.....	32
Figura 13. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 25. Ejemplo de separación en la mezcla.....	34
Figura 14. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 31. Ejemplo de visualización de espuma en periodo de evaluación a la mezcla.....	34
Figura 15. Cobertura de gota obtenida en la aplicación del tratamiento 1 y 2, antes y después del evento de precipitación. T1. (zinc 3 % + silicio 1.5 %) (0.36 L.ha ⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹) y T2. (agentes quelatantes 7 % + zinc 3.4 %) (0.4 L.ha ⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹).....	36
Figura 16. Cobertura de gota obtenida en la aplicación del tratamiento 3 y 4, antes y después del evento de precipitación. T3. (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹) y T4. (di-1-p-menteno 96 %) (0.5 L.ha ⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹).....	37

Figura 17. Cobertura de gota obtenida en la aplicación del tratamiento 5 y 6, antes y después del evento de precipitación. **T5.** (mancozeb 62 %) (2 L.ha⁻¹) y **T6.** Testigo absoluto.....38

Figura 18. Efecto de las mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluadas sobre la inhibición de germinación de ascosporas de *P. fijiensis*.....40

Figura 19. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 1.41

Figura 20. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 2.....42

Figura 21. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 3.....43

Figura 22. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 4.....44

Figura 23. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 5.....45

Figura 24. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 6.....46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ejemplo de protocolo para elaboración de mezclas.....	53
Anexo 2. Ascosporas germinadas (1) y no germinadas (2) vistas en el microscopio.....	54
Anexo 3. Resumen de resultados obtenidos en la prueba de tenacidad.....	54
Anexo 4. Resumen estadístico, ascosporas no germinadas.....	54
Anexo 5. Escala de grados de apertura de la hoja candela.....	56
Anexo 6. Resumen de resultados del ensayo 1 en la prueba de Single Leaf.....	56
Anexo 7. Resumen de resultados del ensayo 2 en la prueba de Single Leaf.....	57
Anexo 8. Resumen de resultados del ensayo 3 en la prueba de Single Leaf.....	57
Anexo 9. Resumen de resultados del ensayo 4 en la prueba de Single Leaf.....	58
Anexo 10. Resumen de resultados del ensayo 5 en la prueba de Single Leaf.....	58
Anexo 11. Resumen de resultados del ensayo 6 en la prueba de Single Leaf.....	59
Anexo 12. Curva de progreso de una enfermedad. a. monocíclica y b. policíclica.....	59
Anexo 13. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 1.....	60
Anexo 14. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 2.....	60
Anexo 15. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 3.....	60
Anexo 16. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 4.....	61
Anexo 17. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 5.....	61
Anexo 18. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 6.....	61
Anexo 19. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 7.....	62
Anexo 20. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 8.....	62
Anexo 21. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 9.....	62
Anexo 22. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 10.....	63

Anexo 23. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 12.....	63
Anexo 24. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 13.....	63
Anexo 25. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 14.....	64
Anexo 26. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 15.....	64
Anexo 27. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 16.....	64
Anexo 28. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 17.....	65
Anexo 29. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 18.....	65
Anexo 30. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 19.....	65
Anexo 31. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 20.....	66
Anexo 32. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 21.....	66
Anexo 33. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 22.....	66
Anexo 34. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 23.....	67
Anexo 35. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 24.....	67
Anexo 36. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 26.....	67
Anexo 37. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 27.....	68
Anexo 38. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 28.....	68
Anexo 39. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 29.....	68
Anexo 40. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 30.....	69
Anexo 41. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 32.....	69
Anexo 42. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 33.....	69
Anexo 43. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 34.....	70

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de banano (*Musa spp.*) pertenece a la familia Musaceae y es la principal variedad cultivada del género *Musa*. A nivel mundial, es de gran importancia debido al impacto económico que genera en su entorno, directa o indirectamente (MAG, 2017). Tiene como origen el continente asiático y es cultivado en las regiones tropicales y subtropicales del mundo, representando su fruto un producto clave como alimento básico y su actividad un motor generador de riqueza económica y empleo (Vizcaino y Betancourt, 2013).

A nivel mundial, este cultivo es considerado la principal fruta tropical en cuanto a volumen de producción, alcanzando un récord de 22,2 millones de toneladas métricas (TM) en el año 2020 (PROCOMER, 2021). Según la FAO (2020), se estima que para el año 2030 esta podría alcanzar los 138 millones de TM, llegando a representar aproximadamente el 53,0 % del total de la producción mundial de frutas tropicales; donde el continente asiático debería de mantener el mayor aporte (54,0 %), mientras que la región LAC (Ecuador, Brasil, Guatemala, Colombia, Costa Rica y México) podría alcanzar los 34 millones de toneladas. Asimismo, este tiene gran relevancia desde el aspecto nutricional debido a su contenido de hasta 23,0 % de potasio, que contribuye a disminuir la presión arterial y el riesgo de accidentes cerebrovasculares, 41,0 % de vitamina B6 que ayuda a disminuir la depresión y aporta vitaminas A, C y D (Blasco y Gómez, 2014).

En Costa Rica, los esfuerzos por parte del sector bananero en cuanto a investigación e innovación han dado como resultado que en el país se produzca banano de excelente calidad, facilitando la colocación del producto en mercados internacionales exigentes como lo son diferentes países europeos (Reino Unido, Italia, España, Bélgica, Portugal, Turquía, entre otros) y Estados Unidos (CORBANA, 2018). Basado en lo anterior, la actividad bananera genera el 36,3 % de las exportaciones agrícolas a nivel nacional, teniendo una participación del 2,0 % del PIB nacional y generando una importante cantidad de empleo (6,5 %) y divisas (\$1.066,2 millones anuales) (PROCOMER, 2021).

Sin embargo, la producción de este cultivo según CORBANA (2011), se ve afectada por un gran número de agentes fitopatológicos, entre los que destaca la enfermedad conocida como sigatoka negra causada por el hongo *Pseudocercospora fijiensis* (M. Morelet) Deighton. Siendo esta la principal enfermedad en el cultivo de banano en Costa Rica (Crous, Groenewald, Slippers y Windfield, 2016), ocasionando una disminución de la capacidad fotosintética en la planta, logrando

afectar directamente el llenado de dedos del racimo, así como diversos procesos fisiológicos del fruto relacionados a la maduración (Martínez, Villalta, Soto, Murillo y Guzmán, 2011). Según Benavides (2019), esta afectación en ausencia de control podría llegar a significar pérdidas en el rendimiento de producción en plantaciones de hasta 50 % en la cosecha.

Según Viljoen *et al.* (2017), esta enfermedad se encuentra distribuida alrededor del mundo, mostrando un óptimo crecimiento en condiciones climáticas presentes en las regiones tropicales y subtropicales. Lo que convierte al país en un escenario idóneo para el desarrollo de esta fitopatología en las zonas bananeras y representando un gran desafío para los productores (Robinson y Galán, 2012), ya que sumado a la agresividad de la enfermedad, ésta también posee características como fácil reproducción, diseminación y carácter heterolítico, dando como resultado gran variabilidad genética del hongo y traducándose en un control fitosanitario más complejo por la necesidad de constantes aplicaciones evitando generar resistencia en la enfermedad (Guzmán, 2012).

Según Guzmán (2012), en plantaciones bananeras el control de *P. fijiensis* se ha realizado combinando prácticas culturales y el constante uso de productos químicos con acción fungicida. Por lo general, a través de los años el control de esta enfermedad se ha basado en el uso de fungicidas de amplio espectro con acción protectante y con ingredientes activos de acción multisitio como el mancozeb, combinado estratégicamente con aplicaciones periódicas y alternadas de fungicidas sitio-específicos (acción sistémica: triazoles, aminas, carboxamidas y estrobirulinas) (Benavides *et al.*, 2021).

Sin embargo, según Martínez *et al.* (2011), se ha presentado resistencia con grupos químicos (benzimidazoles, triazoles y estrobirulinas) debido a la fuerte presión de selección ejercida sobre las poblaciones del patógeno, y por el uso frecuente de los mismos en las aplicaciones. Además, ingredientes activos como el mancozeb, se encuentra en controversia ambiental, social y económica debido a su característica de fácil degradación a partículas tóxicas en condiciones específicas, alto costo de programas para control de la enfermedad y a su calificación como causante de problemas de salud (Paro *et al.*, 2012).

Por otro lado, en el año 2020 la Unión Europea (UE) optó por no renovar el uso de moléculas provenientes del mancozeb y clorotalonil en sus sistemas de producción agrícola, lo que podría ocasionar en un futuro cercano la reducción de los límites máximos de residuos (LMR) en productos agrícolas de exportación, solicitado por parte de entidades certificadoras, por lo que es conveniente

generar alternativas para la sustitución de las moléculas mencionadas en el control de esta relevante enfermedad (Benavides *et al.*, 2021).

En el contexto anterior, aparece como una alternativa viable la evaluación de fungicidas alternativos en el cultivo de banano como métodos para el control de sigatoka negra, procurando generar alternativas que disminuyan el uso del mancozeb y que encaminen a una sostenibilidad ambiental, social y económica en la producción bananera, para reducir o disminuir los problemas ocasionados por *P fijiensis* en las plantaciones.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto de mezclas de fungicidas alternativos al mancozeb, mediante las pruebas de estabilidad, tenacidad y SingleLeaf, como estrategia alternativa de control de sigatoka negra en el cultivo de banano.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar la compatibilidad físico-química de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes a través de la prueba de estabilidad, mediante la evaluación del comportamiento en el tiempo, pH, peso y densidad de la mezcla.
- Conocer la eficacia biológica de mezclas de fungicidas con coadyuvantes contra sigatoka negra por medio de la prueba de tenacidad, como formas de control en plantaciones con eventos de alta precipitación.
- Comprobar la eficacia temprana de mezclas de fungicidas alternativos sobre la evolución de síntomas de sigatoka negra utilizando la prueba de SingleLeaf, como opción de manejo de la enfermedad.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. El cultivo de banano

3.1.1. Taxonomía, condiciones climáticas idóneas y producción mundial

El banano es perteneciente al orden Zingiberales, familia Musaceae, de género *Musa* y es originario de la región del extremo Oriente desde India hasta Filipinas (Soto, 2014). Es producto de las especies silvestres *Musa acuminata* (genoma A) y *Musa balbisiana* (genoma B), las cuales dieron origen a la mayoría de los bananos comestibles (Robinson y De Villiers, 2007).

Según Soto (2014), el banano es una planta monocotiledónea, herbácea, poliploide y perenne, la cual tiene un desarrollo adecuado para la producción en las regiones tropicales donde predominan características agroclimáticas como precipitaciones promedio de 180 – 200 mm/mes, temperaturas entre los 22 y 28 °C y radiaciones cerca de 12 megajulios/ m². Está formada por tres partes principales: el cormo con los brotes laterales o hijos, el pseudotallo formado por las vainas foliares de las hojas que presentan una filotaxia en espiral y la inflorescencia que sale a través del centro del pseudotallo hasta la superficie (Manzo, Guzmán, Rodríguez, James y Orozco, 2005).

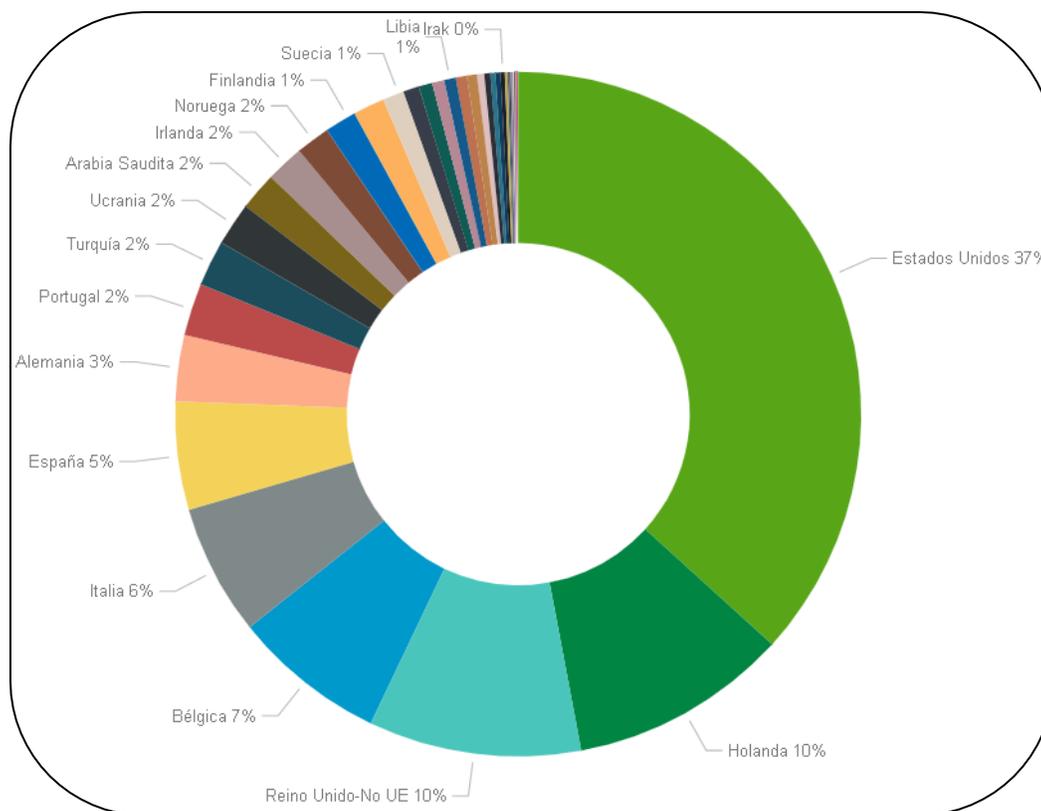
Según la FAO (2020), América Latina (Ecuador, Honduras y Costa Rica) y Asia (Filipinas) son las principales regiones productoras de banano, en las que predominan las condiciones tropicales o subtropicales. Según PROCOMER (2021), a nivel mundial se alcanzó un volumen de producción de 22.2 millones de TM en el año 2020, produciéndose un 54 % en el continente asiático y el porcentaje restante en la región de América Latina y el Caribe (LAC).

3.1.2. Importancia del cultivo de banano en Costa Rica

En Costa Rica, la industria bananera representa el 36,3 % de las exportaciones agrícolas, lo cual se traduce en un 2 % de participación en el PIB nacional, asimismo, alcanza una generación de empleo del 6,5 % y una generación en divisas de \$USD 1066,2 millones anuales, teniendo como principales mercados países de la Unión Europea (55,2 %) y Estados Unidos (37 %) (Figura 1) (PROCOMER, 2021).

Figura 1. Principales destinos de las exportaciones bananeras en Costa Rica.

Fuente: PROCOMER, 2021.



Según Benavides (2019), la actividad bananera tiene vital importancia para la industria agrícola representando las plantaciones de banano una extensión del 1 % del territorio nacional, siendo aproximadamente un área de 42.410 ha. Por otro lado, en el 2019 la industria bananera exportó 121 millones de cajas (18,14 Kg/caja), ubicando a Costa Rica entre los primeros tres países exportadores de banano en el mundo. Además, se estima que la actividad bananera contribuye a la población con 40.000 empleos directos y 100.000 indirectos, representando para la provincia de Limón el 76 % de la mano de obra local (CORBANA, 2020).

Además, en el país el subgrupo de banano más utilizado comercialmente es el *Cavendish*, específicamente el cultivar Grand Naine o Gran enano, el cual es utilizado mayormente por transnacionales para exportación debido a sus frutos de excelente calidad, por su parte, los otros cultivares como banano criollo (Gross Michel), dátil o guineo cuadrado son utilizados y mejorados en su mayoría por productores pequeños (Escobedo, 2013).

3.1.3. Principales enfermedades en el cultivo de banano

El cultivo de banano al igual que otros presenta gran susceptibilidad a diferentes fitopatógenos, los cuales pueden ocasionar daños irreversibles en las plantas, traducándose a problemas en la producción de fruta para exportación (Guzmán, 2006). Algunas de las enfermedades que pueden llegar a provocar la muerte de la planta son *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) que en el país se encuentran presentes las razas 1 y 2 y se establecieron estrictos protocolos para evitar la Raza 4 Tropical (Foc R4T) (SFE, 2022) y *Ralstonia solanacearum* raza 2 (Moko) (Montero, 2020); también, se logra ver afectación por el *Banana Bunchy Top Virus* (BBTV), sin embargo, la sigatoka negra, aunque no es capaz de causar muerte de la planta, logra alcanzar niveles de infestación altos, obteniendo como resultado un fuerte impacto en la producción y calidad de las frutas, esto le da un lugar sobresaliente en importancia de las enfermedades que afectan al cultivo (Murillo, 2015).

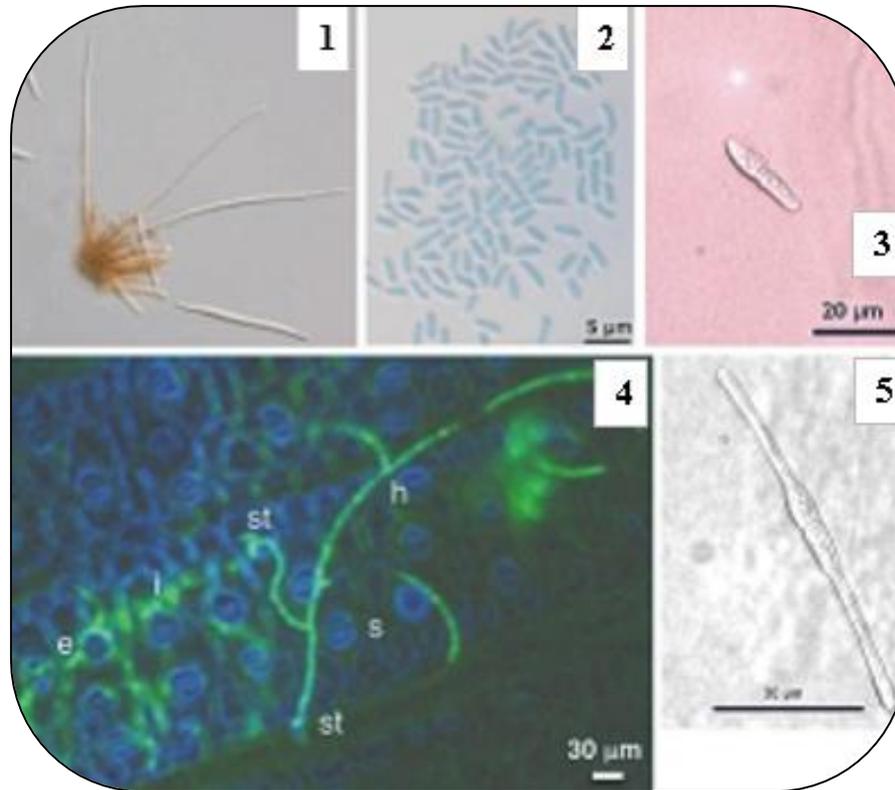
3.2. El patógeno *P. fijiensis*

3.2.1. Principales características morfológicas

Este hongo fitopatógeno forma células sexuales (Figura 2) llamadas ascosporas, las cuales son producidas en pseudotecios cuando ocurre la fertilización de las ascas por las espermacias. Las ascosporas son incoloras (hialinas), bicelulares, ligeramente constrictas en el septo y de forma fusiforme clavada; miden 11,5 a 20 μm de longitud y de 2,5 a 5,0 μm de ancho (Churchill, 2011). Por otro lado, los conidios son las células asexuales formadas sobre los conidióforos, son largos y presentan tres o más septos de color pálido y lisos, miden de 30 a 132 μm de longitud y de 2,5 a 5 μm en su parte más ancha (Churchill, 2011).

Figura 2. Estructuras reproductivas de *P. fijiensis*. 1. Conidios y conidióforo. 2. Espermacias. 3 y 5. Ascosporas bicelulares sin germinar y germinadas, respectivamente. 4. Crecimiento de una hifa.

Fuente: Churchill, 2011.



3.2.2. Taxonomía de *P. fijiensis*

De acuerdo con Queiroz *et al.* (2013), la clasificación taxonómica actual de *P. fijiensis* es la siguiente:

- Phylum: Ascomycota
- Clase: Dothideomycetes
- Orden: Mycosphaerellales
- Género: *Pseudocercospora*
- Especie: *fijiensis*

3.2.3. Importancia económica

Según Guzmán (2012), la afectación directa de la enfermedad es en el tejido foliar, reduciendo significativamente la actividad fotosintética de la planta, logrando alcanzar en ausencia de control afectaciones negativas de hasta un 50 % en el rendimiento por planta. Es decir, si el parámetro productivo de una hectárea de banano son 2.800-2.900 cajas, se obtendrán 1.400 cajas sin un manejo de la enfermedad, lo que representa pérdidas claras en el bolsillo del productor (Benavides, 2019).

3.2.4. Epidemiología de la enfermedad

En las plantaciones de banano la enfermedad requiere la presencia de sus dos estados (anamorfo y teleomorfo) para completar su ciclo de vida (Churchill, 2011). No obstante, es importante mencionar que las ascosporas son consideradas el principal agente de diseminación de la enfermedad a largas distancias entre plantaciones, ya que las concentraciones en el medio ambiente son de 10 a 100 veces mayor a los conidios, llevándose a cabo por medio de vientos de hasta 100 km (Viljoen *et al.*, 2017), y a su vez, los conidios son importantes debido a la diseminación local o de corta distancia en las plantaciones, mediante la lluvia y el viento en menor magnitud, colonizando la hoja en desarrollo (hoja candela) y hojas ya desplegadas, respectivamente (Alarcón y Jiménez, 2012).

Las hojas afectadas por este patógeno muestran una pérdida significativa en la biomasa y en la concentración de clorofila desde que inician los primeros síntomas de la infección, interfiriendo sobre procesos esenciales como la fotosíntesis y la transpiración, además de afectar otros procesos como la actividad estomática y disminución en las concentraciones de almidón y azúcares en el tejido foliar. Todas estas afectaciones provocan daños irreparables en la hoja, lo que impide el funcionamiento y desarrollo normal de la planta, provocando la disminución del rendimiento (Bornacelly y Bolaños, 2003).

3.2.5. Distribución geográfica y condiciones ambientales óptimas de la enfermedad

La sigatoka negra es causada por el fitopatógeno *P. fijiensis*, se encuentra ampliamente distribuida en todo el mundo y es considerada la mayor problemática fitosanitaria del cultivo de banano (Agrios, 2005). Los primeros reportes de la enfermedad provienen de las Islas Fiji (costa sudeste de Viti Levu) en el 1963, sin embargo, fue hasta en el año 1972 que se descubrió la enfermedad en América Latina, presentándose en Honduras el primer registro de la enfermedad y consecuentemente el inicio de su diseminación por toda América; reportándose en Costa Rica por primera vez en el 1979 la presencia de este fitopatógeno (Alarcón y Jiménez, 2012).

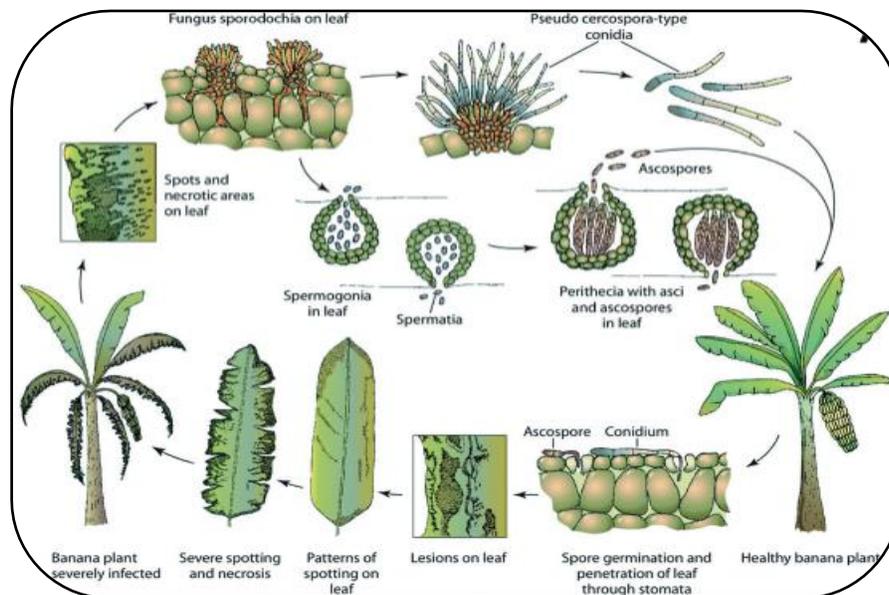
Este fitopatógeno requiere de condiciones climáticas óptimas para su desarrollo, de altas precipitaciones (1.400 mm anuales), temperaturas que oscilen entre los 23 y 28 °C y humedad relativa mayor a 80 % (Soto 2014). Por lo que Robinson y Galán (2012), afirman que las zonas bananeras de Costa Rica presentan condiciones idóneas para un comportamiento agresivo de la sigatoka negra en las plantaciones y la misma puede presentar alteraciones como consecuencia de las variaciones climáticas que se presentan en las zonas de producción.

3.2.6. Ciclo de vida y sintomatología de la enfermedad sigatoka negra

Según Churchill (2011), citado por Benavidez (2019), el ciclo de la enfermedad (Figura 3) causada por *P. fijiensis* consta de cuatro etapas distintas: germinación de la espora, penetración del hospedero, desarrollo de síntomas y la producción de esporas. Además, la infección es ramificada porque ocurre tanto con esporas sexuales como asexuales y estas no se presentan de forma alternada (Agrios, 2005).

Figura 3. Ciclo de vida de la enfermedad sigatoka negra en el cultivo de banano.

Fuente: Churchill, 2011.



Las esporas (ascosporas o conidios) de sigatoka negra requieren de la absorción de agua para iniciar el proceso de germinación al momento de llegar a colonizar la superficie de las hojas (infección de importancia ocurre en la hoja candela, mientras realiza su apertura) (Marín, Romero, Guzmán y

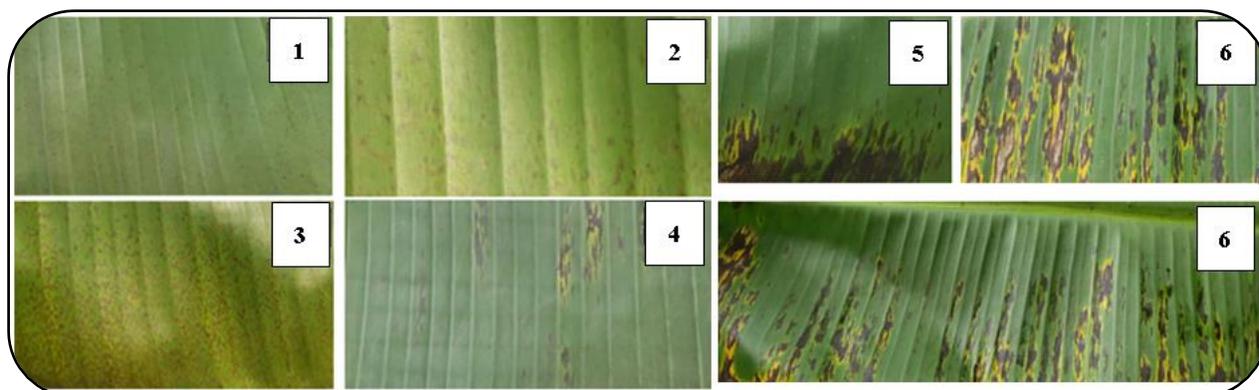
Sutton, 2003), e ingresar por la vía estomática por medio de sus tubos germinativos. Estas partículas reproductivas de la enfermedad tienen una mayor probabilidad de alcanzar y penetrar el envés (epidermis abaxial) de la hoja vía estomática, debido a estar las estomas en mayor densidad en el envés de la lámina foliar comparado con el haz (epidermis adaxial) en las musáceas (Asmar *et al.*, 2013).

Según Álvarez, Pantoja, Gañan y Ceballos (2013), la etapa de germinación y penetración de las esporas en el hospedero tiene una duración de 2 a 4 días. Los síntomas iniciales (estadio 1 y 2) son visibles a partir de la hoja 3 entre los 10 y 30 días posterior a la infección, mientras que en los estadios tempranos de la enfermedad (estadio 2 a 5) ocurre la producción y liberación de los conidios (28 días postinfección). Los síntomas de evolución de la enfermedad son más severos (estadios 5 y 6) a 49 días post-infección, durante este momento ocurre la liberación de las ascosporas, sin embargo, tanto conidios como ascosporas son infectivas produciendo el mismo tipo de mancha y el posterior desarrollo de la enfermedad (Viljoen *et al.*, 2017).

Los primeros síntomas de la enfermedad aparecen en el envés de las hojas, en especial en el margen derecho distal de la misma. Se presenta como manchas longitudinales de color marrón oscuro; de 1 mm a 2 mm de largo, y aumentan de tamaño hasta formar lesiones necróticas con halos amarillos y con centro de color gris claro (Figura 4). Estas lesiones pueden llegar a destruir grandes áreas del tejido foliar (Mourichon, Carlier y Fouré, 1997). Álvarez *et al.* (2013), mencionan que la evolución de la enfermedad normalmente ocurre a través de etapas, donde se reconocen seis estados o etapas según la escala de Fouré (1985), los cuales se clasifican como: una etapa de puntos, dos etapas de raya, y tres etapas de mancha (Soto, 2014).

Figura 4. Estadios de la enfermedad sigatoka negra en el cultivo de banano.

Fuente: Fort *et al.*, 2022.



3.3. Control de la enfermedad

El control de sigatoka negra en plantaciones bananeras es de suma importancia debido a que según Scot (2008), en el momento de cosecha se relaciona un mayor número de hojas funcionales (hojas con menos de 30% de la superficie necrosada) con la eficacia en el control de la enfermedad y por consiguiente de la exportabilidad de la fruta cosechada (Ganry, Fouré, Lapayre y Lescot, 2012). Actualmente, el manejo de la sigatoka negra se lleva a cabo de manera que se integran prácticas culturales dirigidas a desfavorecer las condiciones para el desarrollo de las infecciones y el control químico, basado en la aplicación periódica de fungicidas protectantes y sistémicos (Ganry *et al.*, 2012).

El combate cultural consiste en la implementación o ejecución de una serie de prácticas que logran disminuir el avance de *P. fijiensis* mediante la modificación del ambiente donde se desarrolla, con el objetivo de evitar la reproducción, diseminación e infección de tejido sano de las hojas por parte de las estructuras reproductivas (ascosporas y conidios) del patógeno. En otras palabras, se busca reducir la fuente de inóculo y realizar una modificación del microclima que favorece el crecimiento del hongo (Orozco *et al.*, 2013).

Dentro de las principales prácticas que se llevan a cabo en este sentido se encuentran la construcción de drenajes, el control de malezas, el control de la densidad de las plantas, así como una nutrición balanceada (Guzmán, Orozco y Pérez, 2013). Dentro de las prácticas más frecuentes y de mayor importancia están la deshoja sanitaria detallada como el despunte y cirugía, que a intervalos de controles semanales (frecuentes) logra reducir la agresividad de la enfermedad (Martínez *et al.*, 2011).

En cuanto al combate químico, Guzmán *et al.* (2013), mencionan que el uso de fungicidas en las plantaciones bananeras resulta indispensable y ha sido la principal herramienta de combate contra la sigatoka negra para alcanzar una productividad rentable mediante un manejo eficiente, ya que las prácticas culturales por sí solas no muestran el control necesario. Estos fungicidas son agrupados en tres categorías de acuerdo con su forma de acción: fungicidas protectantes o multisitio, fungicidas de acción sistémica local y fungicidas sistémicos, ya sea monositio o bisitio, según el punto de inhibición en las enzimas objetivo (Gómez, 2013).

Los fungicidas protectores se depositan sobre la superficie de las hojas creando una película sobre la cutícula, para así inhabilitar la germinación y penetración de las esporas vía estomática. Su modo de acción es multisitio, generando un bajo o nulo riesgo de resistencia por parte del patógeno,

entre estos se incluyen fungicidas como el mancozeb y el clorotalonil (Orozco *et al.*, 2013), sin embargo, su efecto es únicamente preventivo (Ganry *et al.*, 2012).

Asimismo, los fungicidas de acción sistémica tienen la capacidad de penetrar los tejidos y reducir el crecimiento del patógeno cuando se encuentra dentro de la hoja, teniendo en términos simples un “efecto curativo” al llegar a inhibir específicamente uno o más sitios de enzimas clave en el metabolismo del patógeno. Se incluyen los fungicidas de grupos de los benzimidazoles, triazoles, estrobirulinas, aminas y anilopirimidinas (Churchill, 2011). Es importante mencionar que actualmente *P. fijiensis* ha desarrollado resistencia a los tres primeros fungicidas sistémicos ya mencionados y una de las estrategias recomendables con el uso de nuevas moléculas para el control de la enfermedad es la rotación de estas en los programas de aplicación (Martínez *et al.*, 2011).

Por otra parte, es importante mencionar que desde años anteriores se ha indagado en el uso de productos naturales con el fin de controlar este relevante fitopatógeno, donde se han utilizado sustancias biológicamente activas de origen marino, microbios del tracto de insectos, exudados de raíz y principalmente compuestos provenientes de plantas. Sin embargo, este tipo de control fue dejado a un lado, donde los últimos años ha tomado relevancia debido al interés en la búsqueda de nuevos compuestos bioactivos (Osorio, 2006).

3.4. Problemática entorno al uso de mancozeb

El mancozeb, es un fungicida protector perteneciente al grupo químico de los ditiocarbamatos y actualmente, es uno de los biocidas más utilizados en el cultivo de banano por los productores costarricenses debido al buen control preventivo de sigatoka negra. Este fungicida actúa como biosida al inhibir la germinación de esporas del hongo, afectando el metabolismo lípido, respiratorio y la producción de Adenosín Trifosfato (ATP) (Zamora *et al.*, 2019). No obstante, es rápidamente degradado bajo condiciones de alta humedad y temperatura, tanto en el suelo como en el agua, al metabolito llamado tiourea de etileno. Hoy en día este metabolito tiene significancia ambiental, ya que se ha reportado como un mutágeno, teratógeno, carcinógeno y como un compuesto antitiroideo (Paro *et al.*, 2012).

Por este motivo y su extendido uso en la agricultura, se han realizado diversos estudios sobre los efectos de este en las personas y el medio ambiente, entre los que se menciona el riesgo de crecimiento de tumores en distintos órganos, efectos disruptivos en el sistema endocrino y acumulación de metales en las células humanas, entre otros (Hoffman, Trombetta, y Hardej, 2015).

A nivel nacional, diferentes estudios han revelado distintas repercusiones que tiene el uso de este ingrediente activo (i.a.) en el tema de salud humana. Según Corrales *et al.* (2021), la exposición de mujeres en el periodo de embarazo a este fungicida puede llegar a afectar negativamente la función de la tiroides, alcanzando inhibir procesos vitales en el desarrollo fetal como el desarrollo durante los primeros años de vida, además, basándose en estudios se pudo concluir que esta exposición de mujeres en gestación tiene relación con problemas respiratorios en infantes (Mora *et al.*, 2020). Asimismo, la degradación de este i.a. en diferentes componentes como el manganeso ha evidenciado contaminación de fuentes de agua, teniendo esto gran relevancia ya que alcanza a impactar la calidad de vida de personas habitantes de zonas bananeras (Van Wendel *et al.*, 2016).

Por otro lado, es importante contemplar el considerable recurso económico necesario para financiar los programas fitosanitarios contra sigatoka negra en el cultivo de banano. Benavides *et al.* (2021), mencionan que representan un costo anual de \$ 1 100 a \$ 1 400 por hectárea en consumo solamente de fungicidas. Estos costos se derivan de los programas de la aplicación frecuente (ciclos cada 4-7 días) de fungicidas protectores multisitio, con mancozeb y clorotalonil como ingredientes activos, los cuales construyen la base de estos programas, representando un 80 % de la carga química (kg ia/ha) por hectárea. El 20 % restante proviene de la integración estratégica de fungicidas sitio-específicos (acción sistemática: triazoles, aminas, carboxamidas y estrobirulinas) con una frecuencia normalmente de 6 semanas entre ciclos (Benavides *et al.*, 2021).

Por último, dentro esta problemática alrededor del mancozeb, también se debe considerar el manejo de los mismos agroquímicos, propenso a errores, en ocasiones se realizan aplicaciones innecesarias, se da la utilización de sobredosis, aplicaciones en condiciones climáticas inadecuadas, desecho inadecuado de envases y sobrantes de plaguicidas, entre otras malas prácticas agrícolas (MAG, 1991).

3.5. Estrategias desarrolladas para evaluar sigatoka negra en el cultivo de banano

Como se mencionó anteriormente, *P. fijiensis* posee la característica de causar infecciones en las hojas de banano por medio de las ascosporas y conidios. Esto implica que pueden encontrarse síntomas por la acción de ambas estructuras reproductivas del patógeno en una misma hoja de la planta (Guzmán, 2006), lo anterior, combinado con la variabilidad climática presente en las zonas bananeras tiende a provocar diferenciaciones en la agresividad de la enfermedad durante el transcurso de los años, es por tal razón, que estrategias de evaluación para la toma de decisiones adquieren gran importancia al momento de su combate con el uso de fungicidas.

Las metodologías eficientes desarrolladas para la evaluación de *P. fijiensis* en las plantaciones bananeras se dividen en: métodos de cuantificación de la enfermedad, el cual se realiza mediante el conteo de hojas afectadas con los diferentes estadios de la enfermedad, cuantificación del tiempo de evolución entre estadios, así como la distribución de los diferentes síntomas en cada hoja. Y por otro lado, están los métodos de predicción de infección basados en la integración de variables climáticas, cantidad de inóculo y niveles de infección reales (Benavides, 2019).

El método propuesto por Stover modificado Gauhl y Pasberg (1994), se basa en la determinación de la Severidad de la Enfermedad (SE), evaluando el área foliar necrosada de cada hoja de la planta por medio de una escala de daño o severidad y calculando un índice general de las plantas jóvenes infectadas por el patógeno.

También, son muy utilizados otros indicadores o parámetros de la enfermedad en las hojas de las plantas como la Hoja más Joven Manchada (HMJM) y la Hoja más Joven con Estrías (HMJE), los cuales se basan en la ubicación del daño en la primera hoja totalmente abierta contada de arriba hacia abajo, la cual debe presentar diez o más lesiones de estrías o manchas (Ganry *et al.*, 2012).

Por otro lado, es importante mencionar los métodos del Preaviso Climático, basado en la alerta de parámetros climáticos como el viento, humedad y temperatura, y el método del Sistema de Preaviso Biológico, el cual está diseñado para el análisis de variables o descriptores biológicos y climáticos (Ganry *et al.*, 2012).

Investigaciones anteriores reflejan que estas estrategias presentan variabilidad semana tras semana al realizarse las evaluaciones, por lo que se pudo evidenciar su estrecha relación con las condiciones climáticas, lo cual facilita y ayuda a la programación de las aplicaciones en el combate contra sigatoka negra, para obtener un uso eficiente de los fungicidas y por ende un ahorro en la cantidad destinada de fungicida por hectárea al año (Lapayre, Fouré, Abadie y Carlier, 2010).

4. METODOLOGÍA

4.1. Localización de zona de estudio

Esta investigación se llevó a cabo en la Estación Experimental LIFE-RID de la Corporación química AMVAC-AGRICenter, ubicada en Muelle perteneciente al distrito de Florencia en el cantón

de San Carlos de la provincia de Alajuela, Costa Rica (Figura 5). Específicamente se ubica entre las coordenadas geográficas 10°28'27,24'' latitud norte y 84°27'27,17'' longitud oeste, además, está a 70 msnm, presentando suelos del orden ultisoles. También, según la estación meteorológica (AmbientWeather) en esta zona se presenta un promedio de temperatura anual de 28 °C y un promedio de precipitación de 3500 mm anuales.

Figura 5. Estación Experimental LIFE-RID.

Fuente: Departamento LIFE-RID, 2022.



4.2. Fungicidas y coadyuvantes utilizados para la investigación

A través de las pruebas de estabilidad, tenacidad y Single Leaf, se evaluaron mezclas de productos alternativos al mancozeb, lo que permitió generar diferentes opciones de control contra sigatoka negra en plantaciones bananeras. Se debe mencionar que cada prueba desarrollada es independiente de las otras, no obstante, mezclas sometidas a las tres pruebas permitieron un mejor análisis de su desempeño. A continuación, se presenta el inventario de ingredientes activos utilizados en las diferentes pruebas (Tabla 1), los cuales se clasificaron como bioestimulantes, coadyuvantes y fungicidas.

Tabla 1. Inventario de productos agrícolas utilizados en las diferentes pruebas.

Clasificación	Ingrediente activo	Dosis recomendada (L.ha ⁻¹)
Bioestimulante	extracto botánico (100 %)	1-2
	ácido salicílico (10 %) + nitrógeno (5 %)	1
	extracto de algas (20 %)	0.5-1
	extracto de algas (25 %)	0.5-1
	extracto de tomillo (100 %)	0.3-0.75
Coadyuvante	aceites parafínicos (98 %)	2-3
	triglicéridos hidrogenados (12 %)	0.5-1
	polímeros de polivinilo (2 %)	0.020
	ácidos oligorgánicos + ácidos carboxílicos	0.010
	pinoleno (96 %)	0.5
	alcohol graso etoxilado (80 %)	1% Vol. Aceite
	zinc (3 %) + silicio (1.5 %)	0.36
	agentes quelatantes (7 %) + zinc (3.4 %)	0.4
	di-1-p-menteno (96 %)	0.5
	citratos reguladores de pH (44.5 %)	1 g/L
Fungicida	azufre (50 %) + cobre (7.46 %)	1.5
	mancozeb (62 %)	1.7
	<i>Melaleuca alternifolia</i> (22.25 %)	0.4
	azufre (80 %)	3 kg.ha ⁻¹
	manganeso (14.5 %) + zinc (19.7 %)	1.5
	cobre (45 %)	0.6
	cobre (6.5 %)	0.8
	fosfito de potasio (544 g/kg)	1.5 kg.ha ⁻¹
	azufre (70 %)	0.7-1
	mancozeb (60 %)	1.5-2.25
azufre (70.70 %) + zinc (15.20 %)	1-2 kg.ha ⁻¹	

Fuente: Elaboración propia, 2022.

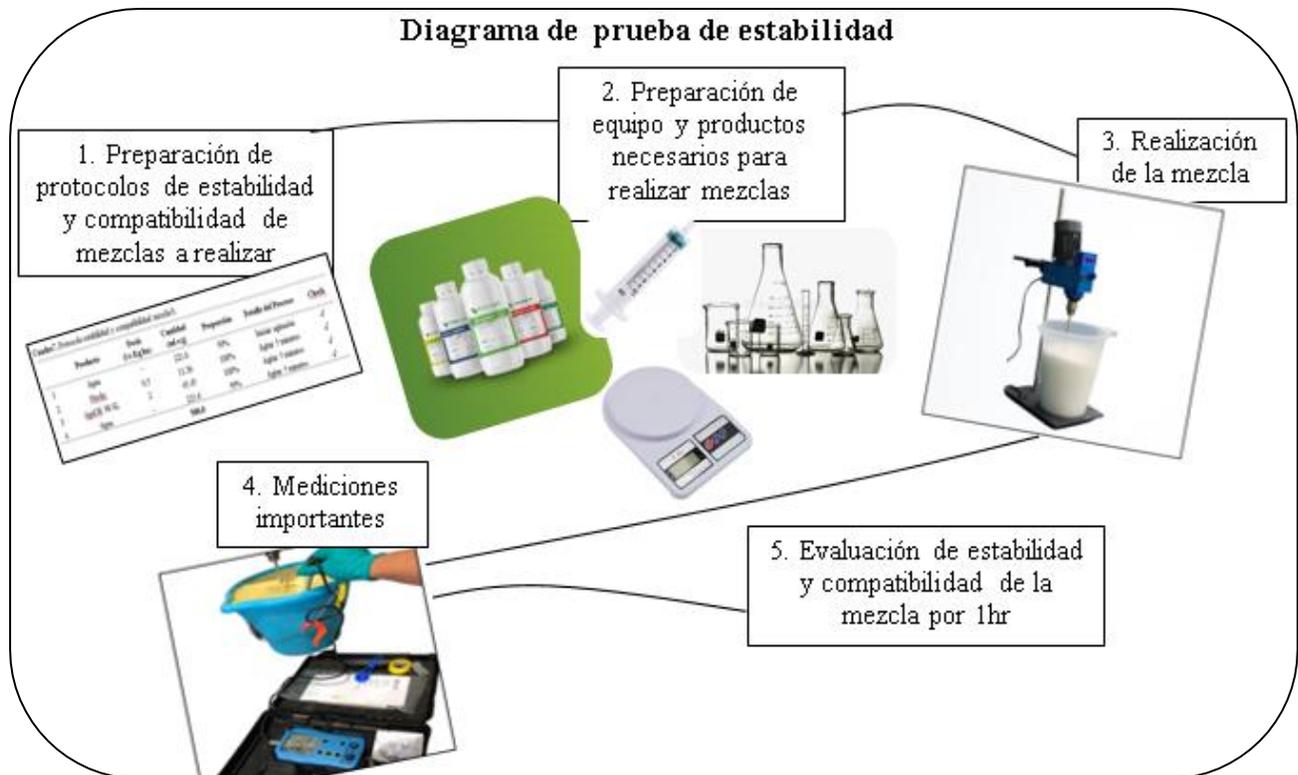
4.3. Prueba de estabilidad

Esta prueba consistió en evaluar el comportamiento de la mezcla deseada en determinados tiempos, durante un periodo de una hora después de realizada la misma y en condiciones de reposo, registrando en esta hora variables como homogeneidad, separación, sedimentación y espuma cada 5 min, además se tomó capturas fotográficas a los 0, 20, 40 y 60 min, a su vez, se determinaron sus principales características físico-químicas al momento de finalizar la mezcla, tales como pH, peso, volumen y densidad (Benavides *et al.*, 2021).

Llevar a cabo esta prueba, requirió de la preparación de los protocolos de estabilidad, en donde se ajustaron las dosis comerciales de los productos a un volumen de 500 mL y se establecieron órdenes de agregación de los componentes involucrados en la mezcla (siempre se realizó emulsión en primer lugar). En el momento en que se realizó la mezcla deseada, cada componente involucrado se agitó 5 min entre componente agregado, a 1.000 rpm y finalizada la misma se registraron las variables mencionadas, donde posteriormente se vertió la mezcla en una probeta de 500 mL para su respectiva evaluación del comportamiento en el periodo de reposo (Benavides *et al.*, 2021).

Figura 6. Diagrama de prueba de estabilidad.

Fuente: Elaboración propia, 2022.



4.3.1. Mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados

A continuación, se presentan las mezclas de fungicidas alternativos con diferentes coadyuvantes que fueron evaluados a través de la prueba de estabilidad (Tabla 2).

Tabla 2. Mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluadas a través de la prueba de estabilidad.

Mezcla	Descripción de la mezcla
M1	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M2	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M3	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M4	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (1 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M5	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (3 L.ha ⁻¹) + (alcohol graso etoxilado 80 %) (1 %)
M6	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (pinoleno 96 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M7	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹)
M8	(mancozeb 62 %) (1.7 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M9	(aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M10	(cobre 45 %) (0.6 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M11	(cobre 6.5 %) (0.8 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M12	(fosfito de potasio 544 g/Kg) (1.5 Kg.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M13	(manganeso 14.5 % + zinc 19.7 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M14	(agentes quelatantes 7 % + zinc 3.4 %) (0.4 L.ha ⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)
M15	(di-1-p-menteno 96 %) (0.5 L.ha ⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)
M16	(extracto de tomillo 100 %) (0.3 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (L.ha ⁻¹)
M17	(extracto de tomillo 100 %) (0.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M18	(extracto de tomillo 100 %) (0.75 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M19	(<i>Melaleuca alternifolia</i> 22.25 %) (0.4 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M20	(Extracto botánico 100 %)(1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M21	(mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M22	(aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M23	(azufre 70 %) (0.7 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M24	(azufre 70 %) (1 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M25	(azufre 70.70 % + zinc 15.20 %) (1 Kg.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M26	(azufre 70.70 % + zinc 15.20 %) (2 Kg.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M27	(azufre 80 %) (3 Kg.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M28	(azufre 80 %) (3 Kg.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (alcohol graso etoxilado 80 %) (1 %)
M29	(azufre 80 %) (3 Kg.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
M30	(extracto botánico 100 %) (1 L.ha ⁻¹)
M31	(extracto botánico 100 %) (2 L.ha ⁻¹)
M32	(extracto botánico 100 %) (1 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M33	(extracto botánico 100 %) (2 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
M34	(<i>Melaleuca alternifolia</i> 22.25%) (0.4 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98%) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.3.2. Análisis de la prueba

Las mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluadas a través de la prueba de estabilidad se interpretaron por medio de las siguientes escalas (Tabla 3).

Tabla 3. Escalas y valores para interpretación de observaciones.

Escala para espuma		Escala para estabilidad	
Categoría	Porcentaje del volumen de la mezcla	Categoría	Tiempo (minutos) sin separación
Poca espuma	<=10	Muy inestable	<=5
Moderada espuma	>10-20	Inestable	>5-20
Mucha espuma	>20	Moderadamente estable	>20-40
		Estable	>40-60
		Muy estable	>60

Fuente: Departamento LIFE-RID, 2022.

4.4. Prueba de Tenacidad

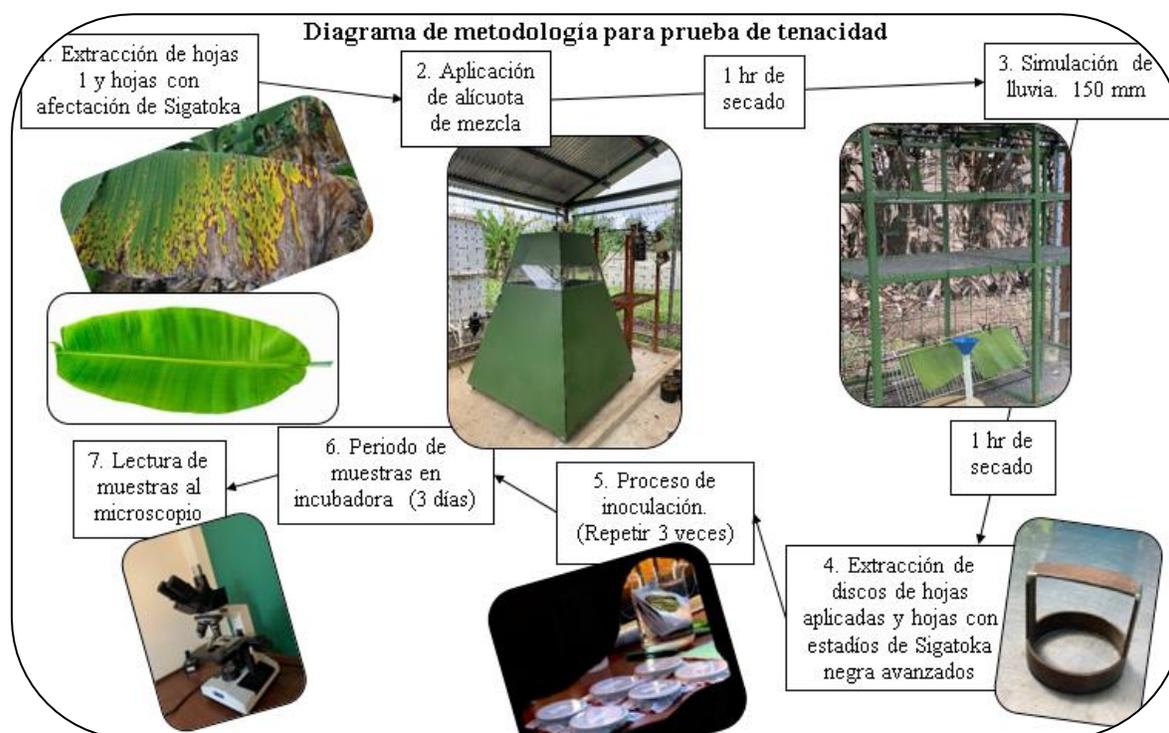
Esta prueba permitió determinar el desempeño de las mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes planteadas, en términos de su eficacia biológica (% inhibición de germinación de ascosporas) después de eventos de alta precipitación. Para llevarla a cabo, se tomó una alícuota de 1,5 ml de la mezcla deseada y se aplicó en porciones de hoja 1 de la planta de banano previamente extraída (hoja más joven completamente abierta), por medio de una cámara de aplicaciones que asemeja la cobertura de gota que se obtiene en aplicaciones realizadas por avión en plantaciones comerciales. Después de la aplicación, la porción de hoja 1 aplicada se dejó secar naturalmente por un periodo de 1 hora y luego se registró por medio de capturas fotográficas la cobertura de gota obtenida en un área específica, posteriormente se sometió a simulación de lluvia de 150 mm y se dejó en secado natural nuevamente por 1 hora, finalizando esta primera fase de la prueba con el registro de la cobertura de gota de la aplicación en el área determinada (Benavides *et al.*, 2021).

Finalizado el proceso anterior, se llevó a cabo la inoculación de ascosporas de *P. fijiensis*. Primeramente, se extrajeron discos (6 cm de diámetro) de las porciones de hoja 1 que fueron aplicadas, se colocaron en la base de cajas Petri con papel absorbente humedecido y se realizó la inoculación. Esta consistió en extraer discos de hojas de banano (previamente extraídas) con lesiones de sigatoka negra en sus estadios avanzados (5-6) y se fijaron individualmente en trozos de papel bond dejando expuesto el haz de la hoja, los cuales se humedecieron por un periodo de 15 minutos, para posteriormente con la ayuda de la tapa de la caja Petri suspenderlos sobre los discos que se colocaron en la base de la caja Petri, por un tiempo de 1 hora. Este proceso se realizó 3 veces consecutivas, con fuente de inóculo nuevo y con 3 repeticiones por tratamiento, donde finalmente se dejaron las muestras

alrededor de 3 días en incubadora y con condiciones (25 – 28 °C, 80 % humedad relativa) para favorecer la germinación de ascosporas inoculadas, finalizando con la lectura de las muestras en el microscopio.

Figura 7. Diagrama de prueba de tenacidad.

Fuente: Elaboración propia, 2022.



4.4.1. Mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluadas

A través de la prueba de tenacidad, se evaluaron las siguientes mezclas de fungicidas con coadyuvantes (Tabla 4).

Tabla 4. Mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluados a través de la prueba de tenacidad.

Tratamiento	Descripción de la mezcla
T1*	(zinc 3 % + silicio 1.5 %) (0.36 L.ha ⁻¹)
T2*	(agentes quelatantes 7 % + zinc 3.4 %) (0.4 L.ha ⁻¹)
T3*	(triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T4*	(di-1-p-menteno 96 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T5	(mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)
T6	Testigo absoluto

* = fungicida en mezcla con mancozeb 62 % a 2 L.ha⁻¹

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.4.2. VARIABLES EVALUADAS

Se evaluaron por medio del microscopio con el poder 10X y en un área de 4 cm² superpuesta a la visión del microscopio las ascosporas germinadas y las no germinadas, las cuales permitieron determinar porcentajes de inhibición producto de las mezclas aplicadas. Se evaluaron 3 puntos de visión por repetición.

4.4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables de respuesta estudiada (porcentaje de germinación), se realizó un análisis de varianza (ANOVA). El modelo lineal para el experimento unifactorial es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

$$\text{con: } i = 1 \dots 5, \quad j = 1 \dots 3$$

Con

Y_{ij} : variable de respuesta del i-ésimo tratamiento, j-ésimo tiempo de evaluación y la k-ésima repetición.

μ : media general

α_i : efecto de la i-ésimo tratamiento.

ε_{ij} : término de error que se distribuye normal independiente con media cero y varianza constante.

Se comprobó los supuestos del ANOVA con gráficos diagnósticos (cuantiles de los términos de error, gráficos de residuos y gráficos de residuos vs. predichos) y se escogerá el mejor modelo en función de los criterios de Akaike (AIC) y de información Bayesiano (BIC). En las variables donde existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos, se realizará las comparaciones de medias por medio de la prueba de Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC) ($p \leq 0.05$) permitiendo la formación de grupos excluyentes y no transición entre tratamientos.

4.5. Prueba de Single Leaf

4.5.1. Estructura del área experimental y su respectivo manejo

El área experimental donde se realizó el montaje de estas pruebas es de aproximadamente 2950 m². Está conformada por dos secciones las cuales son el módulo de Smallplots (36 smallplots conformados por hileras de 5 plantas de banano, con un área de 20 m² cada uno. Representando 2130 m² de área) y el módulo de Bloques (plantas establecidas en 3 diferentes bloques bajo el sistema de siembra tres bolillos, siendo un área de 820 m²).

Estas parcelas experimentales se encuentran sembradas con plantas del subgrupo Cavendish (*Grand nain*), con distancia de 1.80 m entre plantas, y en el caso de los bloques 1.80 m entre hileras, con densidad de 1500 plantas/ha. Además, se encuentran delimitadas con barreras vivas conformadas con plantas de yute (*Musa textilis*) y King grass (*Pennisetum purpureum*). Es importante mencionar que *M. textilis*, es una planta considerada tolerante a *P. fijiensis* y cumple diferentes funciones: como evitar el máximo posible la deriva de aplicaciones experimentales, prevenir posibles daños en las plantas ocasionados por fuertes vientos, así como garantizar la presencia de sigatoka negra (función de hospedero) con fines experimentales.

Estas parcelas experimentales recibieron prácticas agrícolas como la chapea a la redonda de la planta, aporca, aplicaciones de enmiendas agrícolas y nematicidas, control de arvenses, deshija, riego en caso de que la condición climática lo amerite, mantenimiento de drenajes, así como también recibieron su manejo las barreras vivas, las cuales por su tamaño se deshojaron buscando evitar efecto de sombreado al material vegetativo de interés, además, se agobiaron hojas y deshijaron de forma estratégica buscando crear cortina viva.

Figura 8. Parcelas experimentales de banano.

Fuente: Departamento LIFE-RID, 2022.



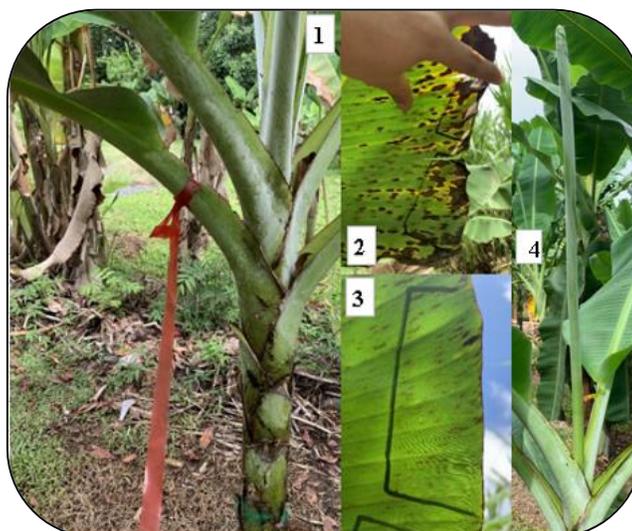
4.5.2. Desarrollo de la prueba

En esta prueba se evaluaron mezclas de fungicidas alternativos con acción protectante, la cual permitió conocer la eficacia temprana de las mezclas contra los síntomas de *P. fijiensis* en el tiempo, comparándose con un tratamiento comercial (mezcla de mancozeb) y un testigo absoluto, teniendo este último gran relevancia ya que la prueba finalizó cuando este alcanzaba el 100 % de afectación en el área a evaluar (Benavides *et al.*, 2021).

Esta prueba consistió en la preparación de las mezclas de interés a evaluar para aplicarlas ya sea en el área de Smallplots o Bloques. Esta aplicación se realizó en la hoja candela de las plantas en grado 2 (Anexo 5), que por la morfología de la hoja fue en el borde derecho (margen distal derecho). Las hojas candela aplicadas se marcaron en el punto de inserción con la hoja 1 de la planta, con el fin de que cuando la hoja estuvo totalmente plegada se pudiera identificar el área que fue aplicada, además, las mismas fueron identificadas con cintas y se les dibujó cuadrículas de 65 cm² en el área aplicada con la mezcla, las cuales delimitaron el área foliar a evaluar con el avance de síntomas de la enfermedad (Benavides *et al.*, 2021).

Figura 9. 1. Cinta para identificar hojas aplicadas. 2 y 3. Cuadrículas dibujadas en área aplicada para evaluación. 4. Hoja candela.

Fuente: Departamento LIFE-RID, 2022.

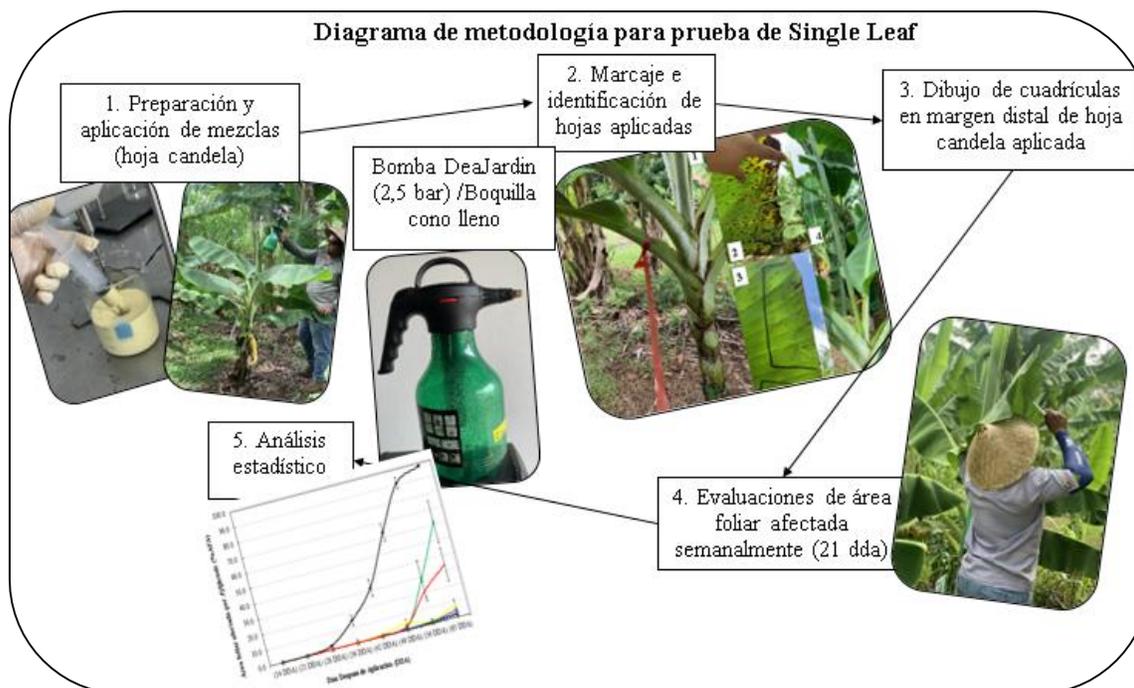


La aplicación de las mezclas de fungicidas se realizó con bombas marca Dea Jardin con boquilla de cono lleno y con una presión de descarga de 2,5 bar. Además, se realizó en horas de la

mañana, con condiciones climáticas que favorecieran la aplicación, es decir, se evitó altas temperaturas y lluvias.

Figura 10. Diagrama de prueba de Single Leaf.

Fuente: Elaboración propia, 2023.



4.5.3. Mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados

Tabla 5. Ensayo 1 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.

Tratamiento	Descripción de la mezcla
T1	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T2	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
T3*	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹)
T4	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (1 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
T5	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (3 L.ha ⁻¹) + (alcohol graso etoxilado 80 %) (1 %)
T6	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (pinoleno 96 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T7	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹)
T8*	(mancozeb 62 %) (1.7 L.ha ⁻¹)
T9	(aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T10	Testigo absoluto

* = fungicida en mezcla con aceites parafínicos 98 % a 2 L.ha⁻¹ y triglicéridos hidrogenados 12 % a 0.5 L.ha⁻¹.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 6. Ensayo 2 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.

Tratamiento	Descripción de la mezcla
T1*	(cobre 45 %) (0.6 L.ha ⁻¹)
T2*	(cobre 6.5 %) (0.8 L.ha ⁻¹)
T3*	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹)
T4*	(fosfito de potasio 544 g/Kg) (1.5 kg.ha ⁻¹)
T5*	(manganeso 14.5 % + zinc 19.7 %) (1.5 L.ha ⁻¹)
T6*	(mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)
T7	(aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T8	Testigo absoluto

* = fungicida en mezcla con triglicéridos hidrogenados 12 % a 1 L.ha⁻¹

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 7. Ensayo 3 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.

Tratamiento	Descripción de la mezcla
T1*	(extracto de tomillo 100 %) (0.3 L.ha ⁻¹)
T2*	(extracto de tomillo 100 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T3*	(extracto de tomillo 100 %) (0.75 L.ha ⁻¹)
T4*	(<i>Melaleuca alternifolia</i> 22.25 %) (0.4 L.ha ⁻¹)
T5*	(extracto botánico 100 %)(1.5 L.ha ⁻¹)
T6*	(mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)
T7	(aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)
T8	Testigo absoluto

* = fungicida en mezcla con aceites parafínicos 98% a 2 L.ha⁻¹ y triglicéridos hidrogenados 12% a 1 L.ha⁻¹

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 8. Ensayo 4 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.

Tratamiento	Descripción de la mezcla
T1*	(zinc 3 % + silicio 1.5 %) (0.36 L.ha ⁻¹)
T2*	(agentes quelatantes 7 % + zinc 3.4 %) (0.4 L.ha ⁻¹)
T3*	(triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T4*	(di-1-p-menteno 96 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T5	(mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)
T6	Testigo absoluto

* = fungicida en mezcla con mancozeb 62 % a 2 L.ha⁻¹

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 9. Ensayo 5 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.

Tratamiento	Descripción de la mezcla
T1	(azufre 70 %) (0.7 L.ha ⁻¹)
T2	(azufre 70 %) (1 L.ha ⁻¹)
T3	(azufre 70.70 % + zinc 15.20 %) (1 kg.ha ⁻¹)
T4	(azufre 70.70 % + zinc 15.20 %) (2 kg.ha ⁻¹)
T5	(azufre 80 %) (3 kg.ha ⁻¹)
T6	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹)
T7	(mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)
T8	(aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T9	Testigo absoluto

* = fungicida en mezcla con aceites parafínicos 98 % a 2 L.ha⁻¹ y triglicéridos hidrogenados 12 % a 0.5 L.ha⁻¹

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 10. Ensayo 6 de mezclas de fungicidas alternativos con coadyuvantes evaluados.

Tratamiento	Descripción de la mezcla
T1	(extracto botánico 100 %) (1 L.ha ⁻¹)
T2	(extracto botánico 100 %) (L.ha ⁻¹)
T3*	(extracto botánico 100 %) (1 L.ha ⁻¹)
T4*	(extracto botánico 100 %) (2 L.ha ⁻¹)
T5*	(<i>Melaleuca alternifolia</i> 22.25 %) (0.4 L.ha ⁻¹)
T6*	(mancozeb 62 %) (1.7 L.ha ⁻¹)
T7	(aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)
T8	Testigo absoluto

* = fungicida en mezcla con aceites parafínicos 98 % a 2 L.ha⁻¹ y triglicéridos hidrogenados 12 % a 0.5 L.ha⁻¹

Fuente: Elaboración propia, 2022.

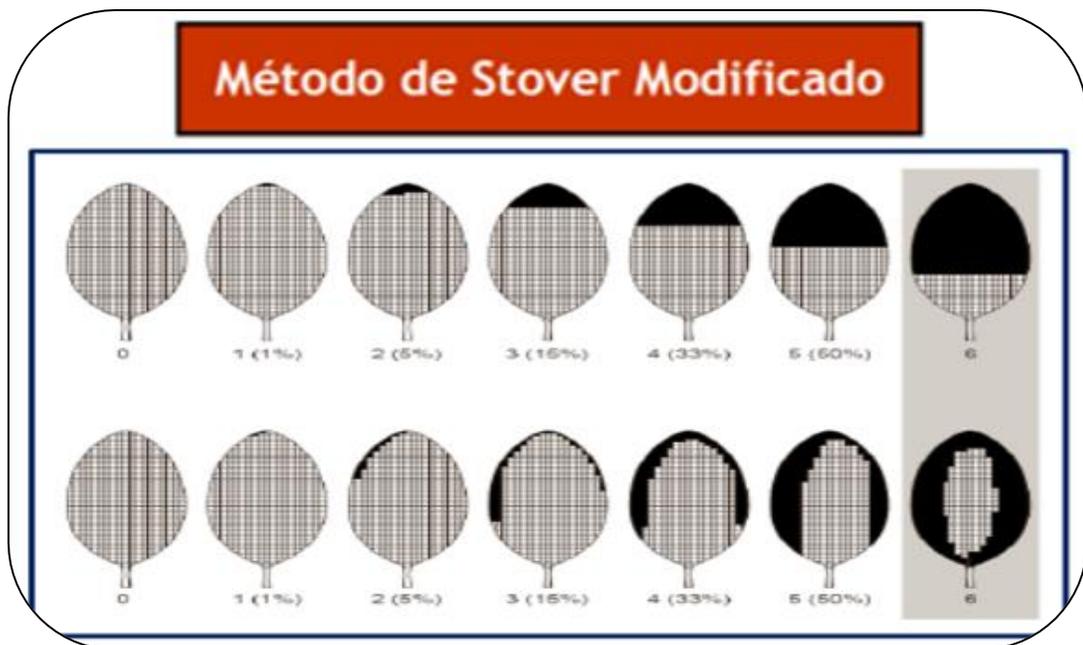
4.5.4. Variables evaluadas

Las evaluaciones iniciaron 21 días después de realizada la aplicación de las mezclas de interés, estas se realizaron cada 7 días hasta que el testigo absoluto alcanzó el 100 % de afectación en el área foliar delimitada por la cuadrícula dibujada. Cada mezcla evaluada es un tratamiento, el cual tuvo al menos 5 repeticiones que fueron distribuidos aleatoriamente en las parcelas experimentales designadas (Smallplots o Bloques).

Se evaluó el porcentaje del área foliar afectada con los síntomas de *P. fijiensis*, utilizando la escala Stover modificada por Gauhl y Pasberg, (1994) (Figura 11) y junto con el evaluador de la estación experimental (Juan José Mora). Además, se registró los estadios presentes y predominante en la cuadrícula.

Figura 11. Escala de afectación de sigatoka negra en hoja de banano.

Fuente: Gauhl y Pasberg, 1994.



4.5.5. Análisis estadístico

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables de respuesta estudiada (Escala de Stover), se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con medidas repetidas en el tiempo bajo la teoría de los modelos lineales mixtos. El modelo lineal para el experimento bifactorial es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \gamma_j + \delta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$\text{con: } i = 1 \dots 5, \quad j = 1 \dots 8, \quad k = 1 \dots 5$$

Con

Y_{ijk} : variable de respuesta del i -ésimo tratamiento, j -ésimo tiempo de evaluación y la k -ésima repetición.

μ : media general

α_i : efecto de la i -ésimo tratamiento.

γ_j : efecto de la j-ésimo tiempo de evaluación

δ_{ij} : efecto adicional (interacción) para la combinación de los niveles i del tratamiento y j tiempo de evaluación.

ε_{ijk} : término de error que se distribuye normal independiente con media cero y varianza constante.

Se comprobó los supuestos del ANOVA con gráficos diagnósticos (cuantiles de los términos de error, gráficos de residuos y gráficos de residuos vs. predichos) y se escogerá el mejor modelo en función de los criterios de Akaike (AIC) y de información Bayesiano (BIC). En las variables donde existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos, se realizará las comparaciones de medias por medio de la prueba de Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC) ($p \leq 0.05$) permitiendo la formación de grupos excluyentes y no transición entre tratamientos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Pruebas de estabilidad

A través de esta prueba se puede obtener un panorama inicial de mezclas con interés a estudiar, donde la realización de la mezcla a pequeña escala podría llegar a evitar el consumo de recursos destinados a experimentación, es decir, la prueba puede llegar a descartar mezclas pensadas como alguna opción de control a una enfermedad, evitando su estudio en otras fases de investigación (MAGRAMA, 2015).

Las evaluaciones realizadas mediante esta prueba permitieron determinar la compatibilidad de las diferentes mezclas de fungicidas con coadyuvantes que fueron planteadas, además, se conoció las principales características físico-químicas de las mismas. A continuación, se presenta el resumen de datos relevantes de las mezclas estudiadas.

Tabla 11. Características físico-químicas de las mezclas estudiadas (Parte 1).

Mezcla	Descripción de la mezcla	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (m/v)	pH
1	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	514	505	1,017	7,3
2	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	498	490	1,016	7,3
3	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	492	490	1,004	8
4	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (1 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	500	495	1,01	7,7
5	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (3 L.ha ⁻¹) + (alcohol graso etoxilado 80 %) (1 %)	484	485	0,997	8,2
6	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (pinoleno 96 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	499	490	1,018	8,4
7	(azufre 50 % + cobre 7.46 %) (1.5 L.ha ⁻¹)	499	490	1,018	8,1
8	(mancozeb 62 %) (1.7 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	490	490	1	6,8
9	(aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	485	500	0,97	7,4
10	(cobre 45 %) (0.6 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	495	490	1,01	7,9
11	(cobre 6.5 %) (0.8 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	493	495	0,995	5

Fuente: Elaboración propia, 2023.

De forma general, se debe hacer mención a la importancia de conocer la densidad de las mezclas, ya que a partir de la relación con la capacidad de peso que soporta un avión al volar, se puede determinar la cantidad de litros de mezcla que se pueden cargar en el tanque al momento de la aplicación (Bornacelly, 2022). Asimismo, tener conocimiento del pH de la mezcla nos puede indicar si alguna de las moléculas de los componentes involucrados podría verse alterada, lo que podría causar un desempeño no deseado de la mezcla (MAGRAMA, 2015).

Tabla 12. Características físico-químicas de las mezclas estudiadas (Parte 2).

Mezcla	Descripción de la mezcla	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (m/v)	pH
12	(fosfito de ptasio 544 g/Kg) (1.5 kg.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	487	475	1,006	4,6
13	(manganeso 14.5 % + zinc 19.7 %) (1.5 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	517	500	1,034	8,9
14	(agentes quelatantes 7 % + zinc 3.4 %) (0.4 L.ha ⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)	508	500	1,016	6,8
15	(di-1-p-menteno 96 %) (0.5 L.ha ⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)	508	500	1,016	5,3
16	(extracto de tomillo 100 %) (0.3 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	489	500	0,978	3,7
17	(extracto de tomillo 100 %) (0.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	488	500	0,976	3,6
18	(extracto de tomillo 100 %) (0.75 L.ha ⁻¹) + (aceites Parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	489	500	0,978	3,4
19	(<i>Melaleuca alternifolia</i> 22.25 %) (0.4 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	486	500	0,972	9,1
20	(extracto botánico 100 %)(1.5 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	488	500	0,976	8
21	(mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	492	495	0,993	6,7
22	(aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	496	512	0,968	6,5
23	(azufre 70 %) (0.7 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	496	500	0,992	7,6
24	(azufre 70 %) (1 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	500	502	0,996	7,6
25	(azufre 70.70 % + zinc 15.20 %) (1 kg.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	487	490	0,993	7,2
26	(azufre 70.70 % + zinc 15.20 %) (2 kg.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	488	475	1,027	7,3

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 13. Características físico-químicas de las mezclas estudiadas (Parte 3).

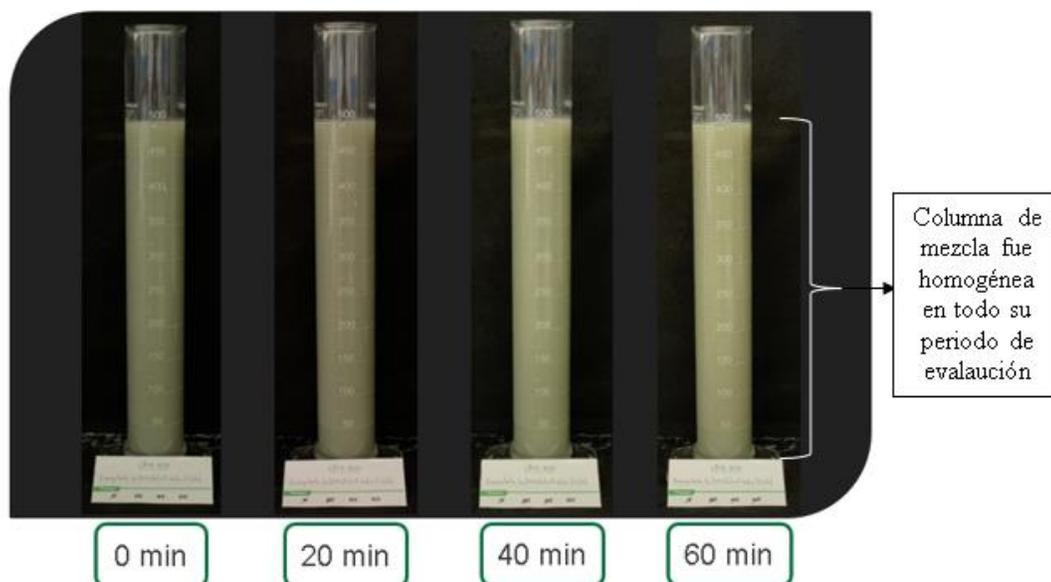
Mezcla	Descripción de la mezcla	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (m/v)	pH
27	(azufre 80 %) (3 kg.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	488	475	1,027	9,1
28	(azufre 80 %) (3 kg.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (alcohol graso etoxilado 80 %) (1 %)	487	465	1,047	9,3
29	(azufre 80 %) (3 kg.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (1 L.ha ⁻¹)	492	470	1,046	8,9
30	(extracto botánico 100 %) (1 L.ha ⁻¹)	86.6	100	0,866	7,1
31	(extracto botánico 100 %) (2 L.ha ⁻¹)	87.2	100	0,872	7,4
32	(extracto botánico 100 %) (1 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	83	100	0,83	7,8
33	(extracto botánico 100 %) (2 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	84	100	0,84	8
34	(<i>Melaleuca alternifolia</i> 22.25 %) (0.4 L.ha ⁻¹) + (aceites parafínicos 98 %) (2 L.ha ⁻¹) + (triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	76.8	100	0,768	9,3

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Por otro lado, los periodos en que se evaluaron las mezclas en condición de reposo, facilitaron observar que la mayoría de mezclas con características oleaginosas logran estabilizarse de mejor forma cuando participa el coadyuvante con ingrediente activo triglicéridos hidrogenados 12 %, lo cual suma a sus otras propiedades de adherente y penetrante (AMVAC, 2022). Además, se logró identificar que mezclas de fungidas con componentes de azufre (azufre 70 %, azufre 70.70 % + zinc 15.20 % y azufre 80 %), presentaron incompatibilidad con los demás componentes que se involucraban en las mezclas.

Benavides *et al.* (2021), realizando pruebas de estabilidad descubrieron que una de las limitaciones en la generación de diferentes alternativas biorracionales para control de sigatoka negra es la inestabilidad de algunas mezclas como por ejemplo *Malaleuca alternifolia* en emulsión. Lo cual se puede validar con la presente investigación ya que ingredientes activos provenientes de fuentes orgánicas demostraron incompatibilidad en mezcla con otros componentes (Ej. *M. alternifolia* + aceites parafínicos 98 % + triglicéridos hidrogenados 12 %).

Figura 12. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 11. Ejemplo de mezcla homogénea en todo su periodo de evaluación.



La siguiente tabla (Tabla 14), muestra el detalle de las evaluaciones a cada mezcla en el periodo de reposo (1 hr), mencionando que mezclas con asterisco (*) fueron catalogadas con poca espuma.

Tabla 14. Resumen de evaluaciones a las mezclas de interés en periodo de reposo (Parte 1).

			Detalle del resultado de Estabilidad cada 5 minutos (√=Homogénea / X=Separación)												
Mezcla	Separación (% Fase)	Estabilidad	0'	5'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'
1	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
2	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
3	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
4	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
5	17,5 %	Estable	√	√	√	√	√	√	√	√	x	x	x	x	x
6*	5,1 %	Estable	√	√	√	√	√	√	√	√	x	x	x	x	x
7	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
8*	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
9	11 %	Inestable	√	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
11	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
12*	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
13	-	Muy estable	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 15. Resumen de evaluaciones a las mezclas de interés en periodo de reposo (Parte 2).

Mezcla	Separación (% Fase)	Estabilidad	Detalle del resultado de Estabilidad cada 5 minutos (✓=Homogénea / X=Separación)											
			0'	5'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'
15*	14 %	Inestable	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
16	11 %	Inestable	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
17	5 %	Moderadamente estable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x
18	9 %	Inestable	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x
19	-	Muy estable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20	3 %	Inestable	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x
21	-	Muy estable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
22	18,95 %	Moderadamente estable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x
23	12 %	Moderadamente estable	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x
24	12,30 %	Moderadamente estable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x
25	12,20 %	Inestable	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x
26	11,50 %	Inestable	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
27	13,20 %	Inestable	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
28	14,90 %	Muy inestable	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
29	1,06 %	Inestable	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30*	-	Muy estable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
31*	-	Muy estable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
32	10 %	Inestable	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
33	11 %	Inestable	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
34	14 %	Moderadamente estable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Es importante mencionar que según Bornacelly (2002), por lo general el equipo de aplicación en los aviones utilizados para llevar acabo el control de sigatoka negra en las plantaciones bananeras, suele contar con sistema de agitación de mezclas, cuya finalidad es generar una mezcla más homogénea durante el tiempo de la aplicación. Por lo tanto, esto significa que mezclas que a través de la prueba resultaron moderadamente estables, podrían considerarse como mezclas óptimas para una eventual aplicación, ya que se ven favorecidas por la acción de la agitación.

Figura 13. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 25. Ejemplo de separación en la mezcla.

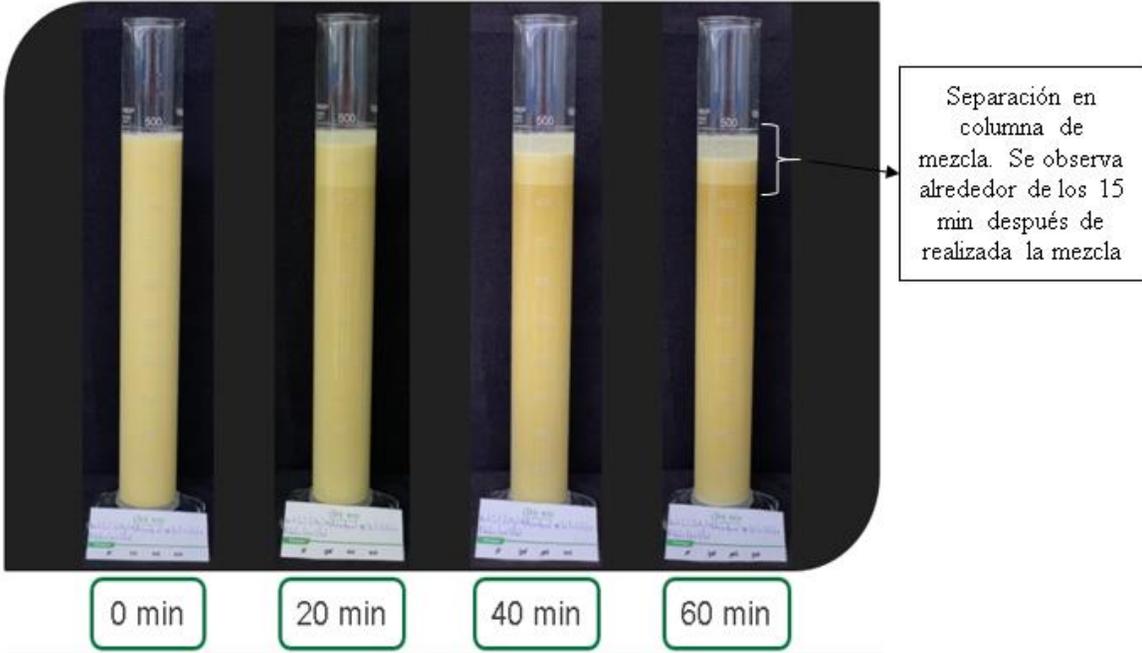
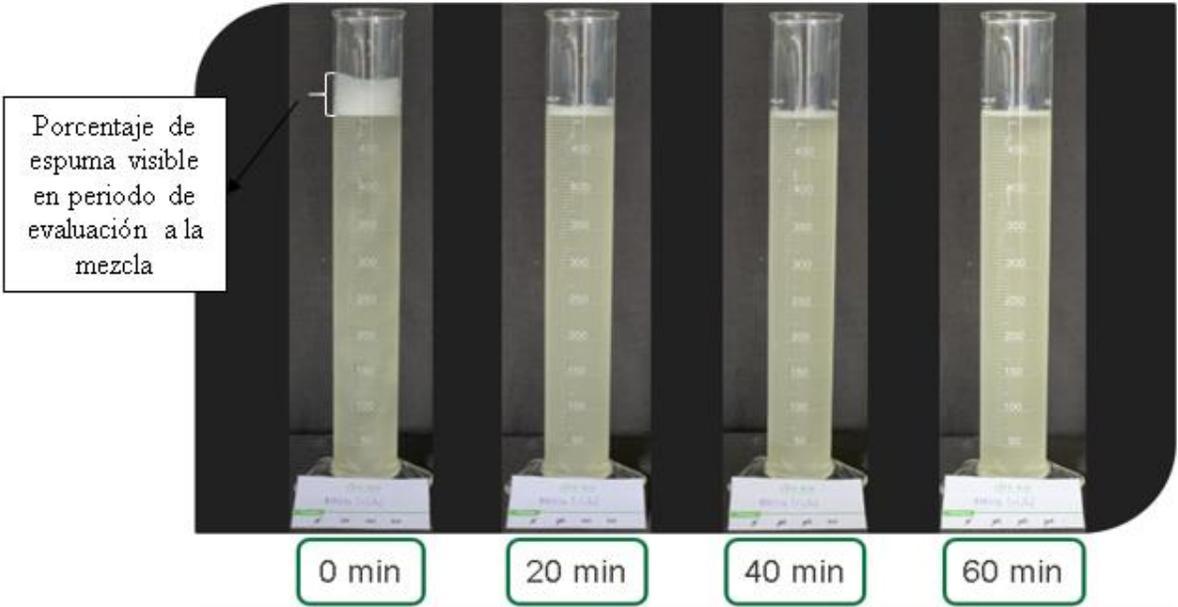


Figura 14. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 31. Ejemplo de visualización de espuma en periodo de evaluación a la mezcla.



5.2. Prueba de tenacidad

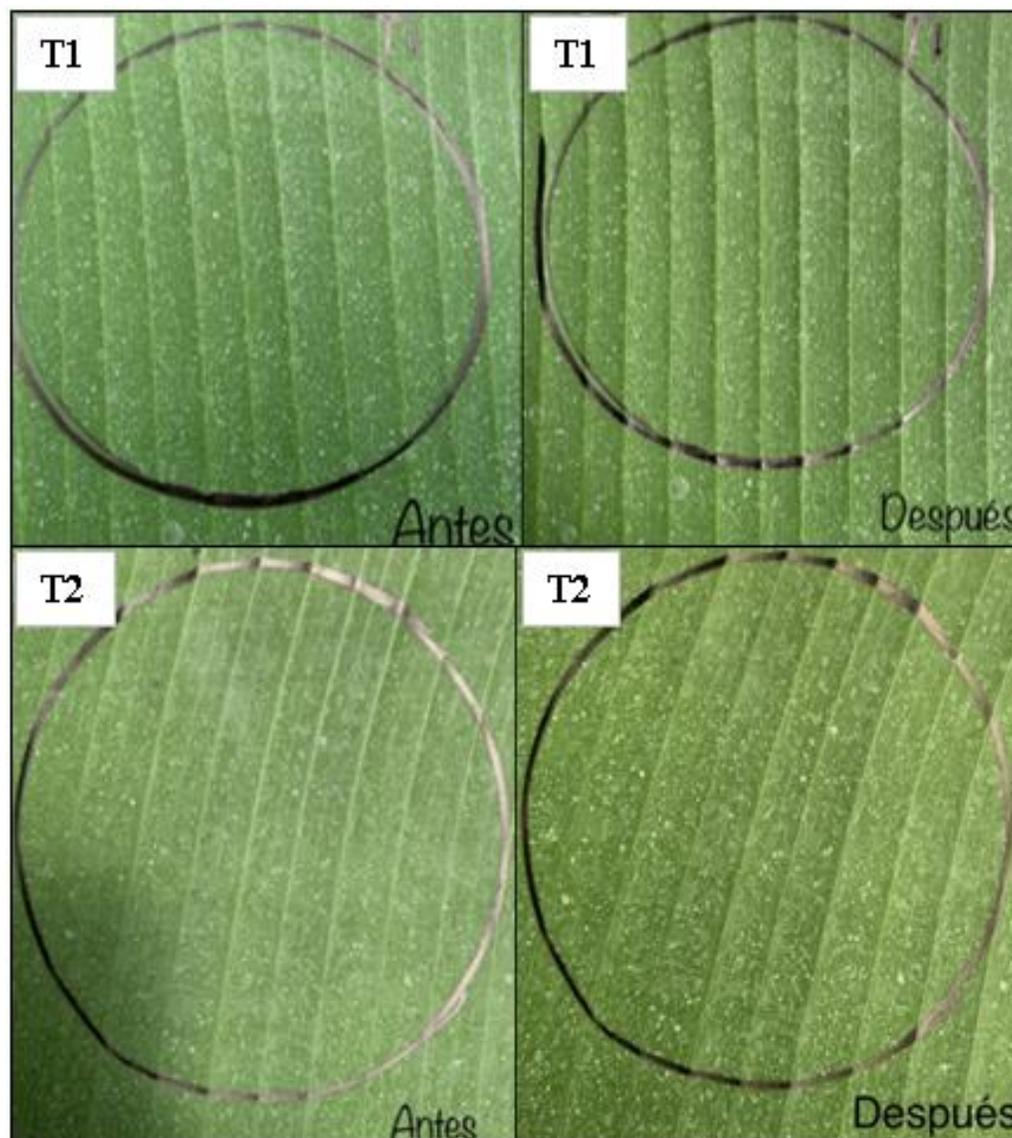
La realización de esta prueba permite conocer la calidad de mezclas de interés bajo una condición de alto rigor, donde se logra comparar la adherencia de la mezcla con la eficacia biológica (Benavides *et al.*, 2021). Según Bornacelly (2002), entre las características deseables de un fungicida está la buena adherencia y tenacidad, es decir, la capacidad de este que impulsa a continuar con desempeño y sin desistir en el objetivo de la aplicación, a pesar de eventos que puedan alterar su efecto. Dicho esto, a través del desarrollo de esta prueba fue posible conocer la eficacia biológica de las mezclas de fungicidas con coadyuvantes que se plantearon, en términos de su desempeño inhibiendo la germinación de ascosporas de *P. fijiensis* después de eventos de alta precipitación, además, se evaluó de forma visual el antes y después de la cobertura de gota de las mezclas adherida al material vegetal ante la simulación de estos eventos.

5.2.1. Evaluación visual de la cobertura de gota de las mezclas antes y después del evento de precipitación

Seguidamente, se muestran capturas fotográficas de la evaluación visual a la cobertura de gota obtenida en la aplicación de los diferentes tratamientos (mezclas) a las muestras vegetativas, antes y después de la simulación de lluvia.

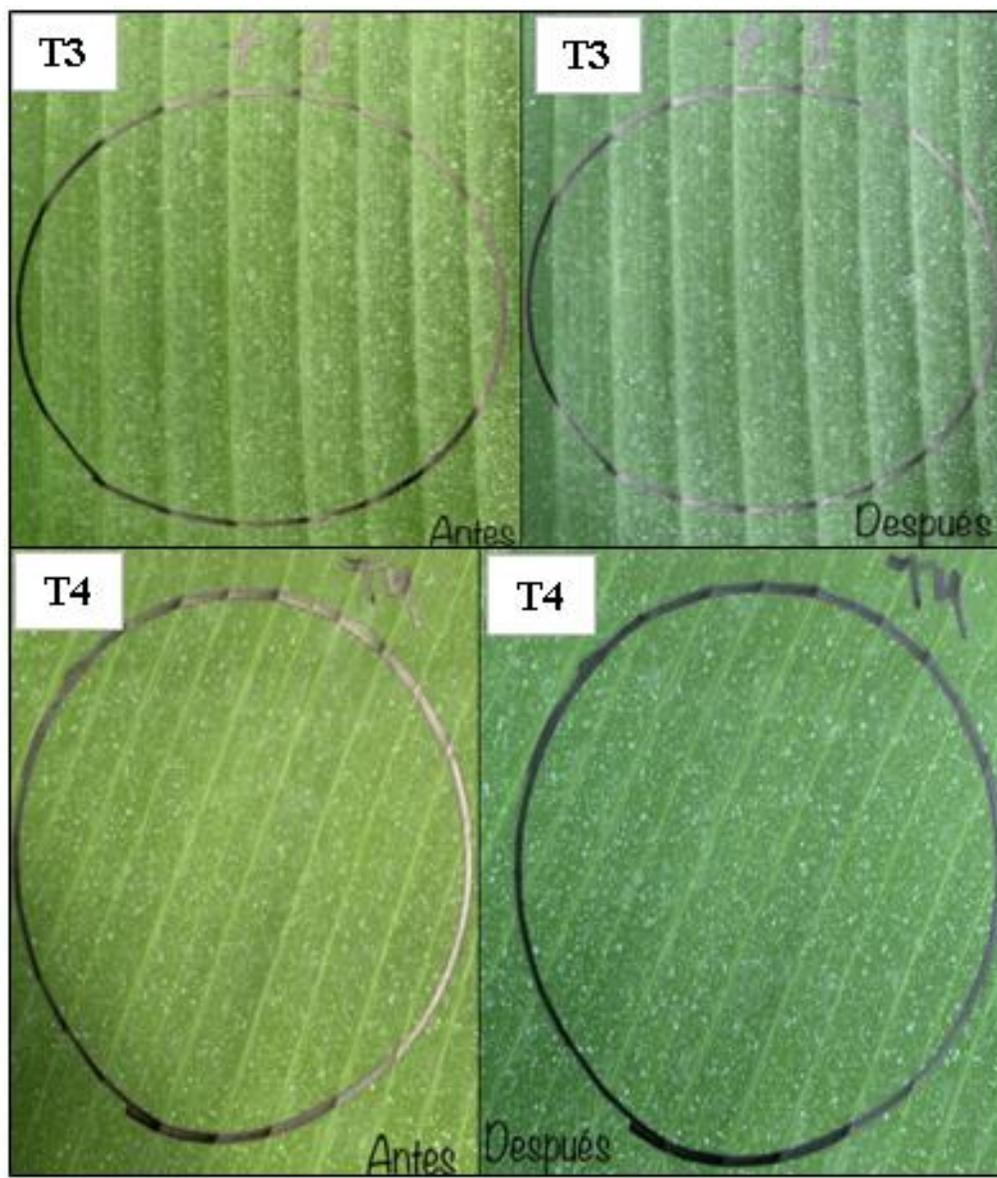
Se debe mencionar que los tratamientos 1 y 2, evalúa productos catalogados como protectores solares (zinc 3 % + silicio 1.5 % y agentes quelatantes 7 % + zinc 3.4 %) (AMVAC, 2022), en donde los dos en mezcla con mancozeb 62 %, mostraron cobertura de gota homogénea y con evidencias visuales mínimas de lavado producto de la simulación del evento de precipitación (Figura 15), sin embargo, se observa una leve diferencia comparándolas entre ellas, ya que en el T2 la captura fotográfica del momento después muestra una cobertura de gota poco más irregular y desgastada que en el T1.

Figura 15. Cobertura de gota obtenida en la aplicación del tratamiento 1 y 2, antes y después del evento de precipitación. **T1.** (zinc 3 % + silicio 1.5 %) (0.36 L.ha⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha⁻¹) y **T2.** (agentes quelatantes 7 % + zinc 3.4 %) (0.4 L.ha⁻¹) + (mancozeb 62 %) (2 L.ha⁻¹).



Por su lado, los tratamientos 3 y 4 exponen el desempeño de coadyuvantes, donde productos con ingrediente activo triglicéridos hidrogenados 12 % y di-1-p-menteno 96 % en mezcla con mancozeb 12 %, reflejaron buena cobertura de gota producto de la aplicación (Figura 16), no obstante, el T4 evidencia una excelente área de aplicación aún después del evento agresivo de lluvia (150 mm), notándose que en el T3 existe más irregularidad en el momento final de la prueba.

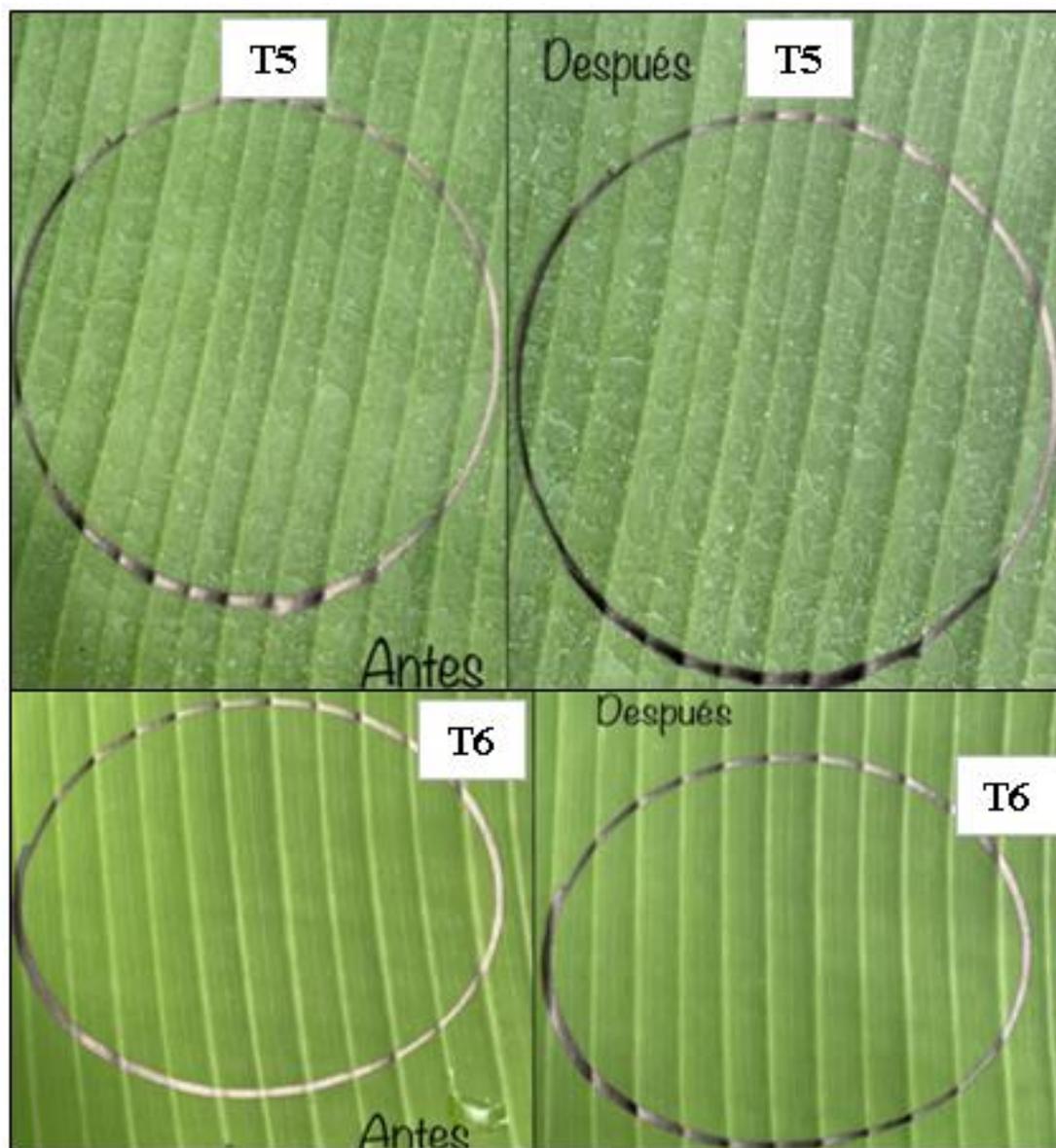
Figura 16. Cobertura de gota obtenida en la aplicación del tratamiento 3 y 4, antes y después del evento de precipitación. **T3.** (triglicéridos hidrogenados 12 %) ($0.5 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$) + (mancozeb 62 %) ($2 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$) y **T4.** (di-1-p-menteno 96 %) ($0.5 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$) + (mancozeb 62 %) ($2 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$)



Por otro lado, estratégicamente se evaluó el desempeño de mancozeb 62 % solo (T5) (ingrediente activo presente en los demás tratamientos) y de un testigo absoluto (T6) (tratamiento sin aplicación de ninguna mezcla de fungicida con coadyuvante). El tratamiento 5 evidenció que el efecto del coadyuvante es de gran importancia en la tenacidad de las mezclas, ya que por sí solo el fungicida

con i. a. mancozeb 62 % refleja cobertura de gota irregular y no uniforme (Figura 17), por su lado el T6 no muestra rastros de aplicación.

Figura 17. Cobertura de gota obtenida en la aplicación del tratamiento 5 y 6, antes y después del evento de precipitación. **T5.** (mancozeb 62 %) (2 L.ha⁻¹) y **T6.** Testigo absoluto.



De manera general, se consiguió evidenciar de forma visual el gran aporte que tienen los coadyuvantes (zinc 3% + silicio 1.5 %, agentes quelatantes 7% + zinc 3.4 %, triglicéridos hidrogenados 12 % y di-1-p-menteno 96 %) en mezcla con mancozeb 62 %, ya que por medio de la aplicación de las mezclas, en los tratamientos 1, 2, 3 y 4 se observó una cobertura de gota homogénea,

incluso después de la simulación de lluvia, que comparándose con el tratamiento 5 donde el fungicida es aplicado como único componente en la mezcla, se logra observar irregularidad y desgaste en la cobertura de gota.

5.2.2. Eficacia biológica de los diferentes tratamientos evaluados en la prueba de tenacidad

También, se evaluó el desempeño de las mezclas anteriores inhibiendo la germinación de las ascosporas inoculadas. Primeramente, se debe mencionar que el proceso de inoculación garantizó la colonización de ascosporas en el material vegetal deseado, reflejándose en el tratamiento testigo absoluto (T6) (Tabla 16) donde tan solo un 13.5 % de las ascosporas no alcanzaron germinar. Asimismo, se logró evidenciar que la aplicación de las mezclas (T1, T2, T3, T4 y T5) si tuvieron un efecto positivo inhibiendo la germinación de las ascosporas.

Tabla 16. Efecto de los tratamientos evaluados sobre la germinación de ascosporas.

Tratamientos	Descripción de la mezcla	Ascosporas no germinadas (%)	Error estándar
T1*	(zinc 3 % + silicio 1.5 %) (0.36 L.ha ⁻¹)	90,5 / A	2,03
T2*	(agentes quelatantes 7 % + zinc 3.4 %) (0.4 L.ha ⁻¹)	77,7 / A	7,72
T3*	(triglicéridos hidrogenados 12 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	90,5 / A	0,64
T4*	(di-1-p-menteno 96 %) (0.5 L.ha ⁻¹)	89,9 / A	2,03
T5	(mancozeb 62 %) (2 L.ha ⁻¹)	96,5 / A	2,03
T6	Testigo absoluto	13,5 / B	7,72

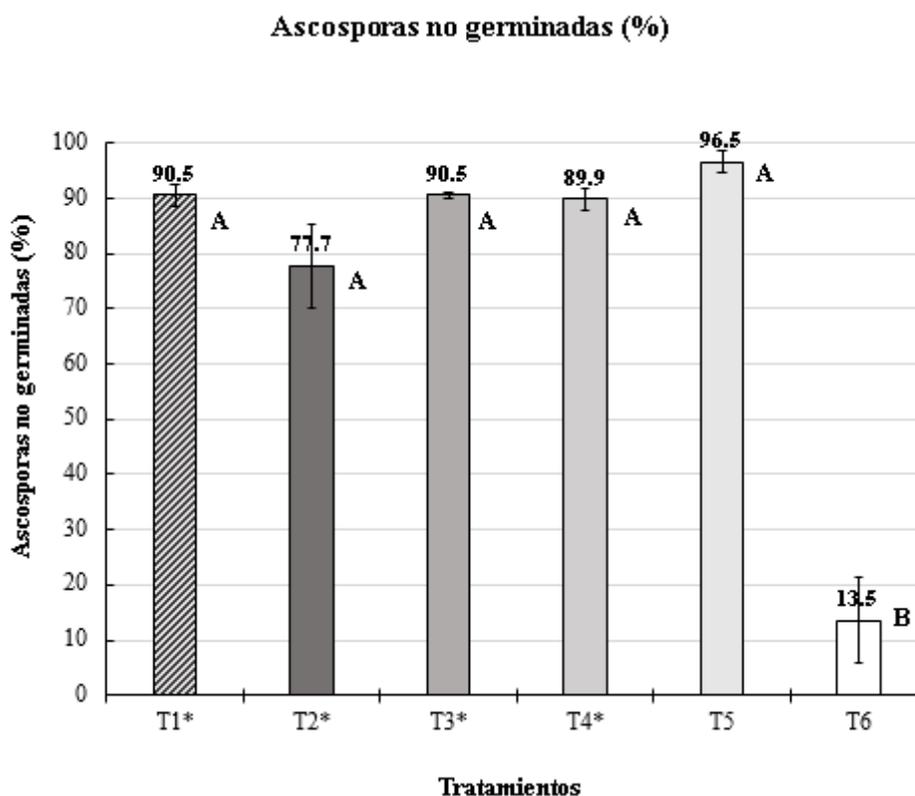
* Fungicida en mezcla con (mancozeb 62%) (2 L.ha⁻¹)

Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes (p>0.05)

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Con base en lo anterior, se observó que los tratamientos 1, 3, 4 y 5 tienen una eficacia biológica de prácticamente 90 %, ya que logran inhibir de excelente forma la germinación de las ascosporas de *P. fijiensis* inoculadas (Figura 18). Por su parte el T2 (agentes quelatantes 7 % + Zinc 3.4% con mancozeb 62 %), evidencia menor desempeño de la mezcla, ya que logra inhibir 77.7 % la germinación de las ascosporas inoculadas, sin embargo, estadísticamente no presenta diferencias significativas (p>0.05) comparándose con los tratamientos que si tienen ingredientes activos presentes.

Figura 18. Efecto de las mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluadas sobre la inhibición de germinación de ascosporas de *P. fijiensis*. Barras de error representa el error estándar. Letras distintas indica diferencias estadísticas ($p>0.05$).



5.3. Prueba de Single Leaf

5.3.1. Eficacia temprana de mezclas de fungicidas con coadyuvantes evaluadas en los diferentes ensayos, a través de la prueba de Single Leaf

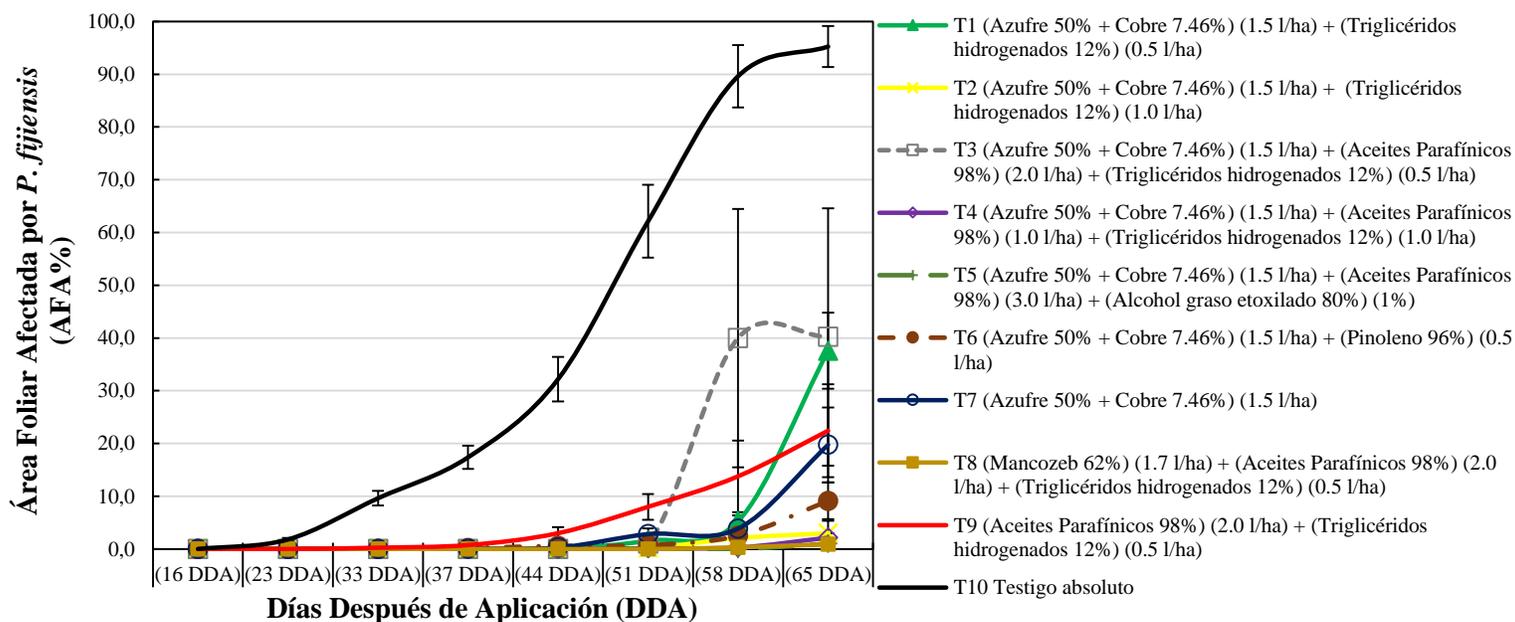
Según Rivera y Wriath (2020), al evaluar con intervalos de tiempo la evolución de enfermedades en las plantas, se podrían confeccionar curvas del progreso, por lo general siempre presentando las enfermedades monocíclicas y policíclicas la misma evolución (Anexo 12). Basado en lo anterior, las evaluaciones realizadas a través del tiempo a los ensayos planteados, permitieron conocer la eficacia temprana de las mezclas de fungicidas con coadyuvantes en términos de su efecto sobre la evolución de síntomas de sigatoka negra, además, se logró conocer mejor el comportamiento de *P. fijiensis* en el cultivo de banano.

Primeramente, se debe hacer mención que los ensayos realizados garantizaron que en las parcelas experimentales existe gran presión de infección de sigatoka negra, evidenciándose en las curvas del progreso de la enfermedad de los tratamientos testigos en los diferentes ensayos, es decir, los síntomas de la enfermedad se desarrollaron de acuerdo con lo esperado. No obstante, se logró identificar que los tratamientos evaluados tuvieron un efecto protector, ya que lograron retener (algunos con mejor desempeño) la evolución de síntomas de *P. fijiensis* en el tejido vegetativo.

En el ensayo 1, se conoció el desempeño del fungicida con ingrediente activo (i.a.) azufre 50 % + cobre 7.46 % a su dosis recomendada ($1.5 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$) y en mezcla con diferentes componentes. De forma general, se evidenció que los tratamientos empiezan a perder de forma mínima su efecto a partir de los 44 días después de la aplicación (DDA) (Figura 19), también, los tratamientos T1, T3 y T9 a pesar de tener efecto sobre la enfermedad son los que alcanzaron niveles de infección mayores a 20 % de área foliar afectada (AFA %), además, los tratamientos T2, T4, T5, T6 y T7 demostraron no tener diferencias significativas respecto al testigo comercial (T8), por lo que podrían eventualmente considerarse en ensayos de programas de aplicación en parcelas comerciales.

Figura 19. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 1. Barras de error representa el error estándar.

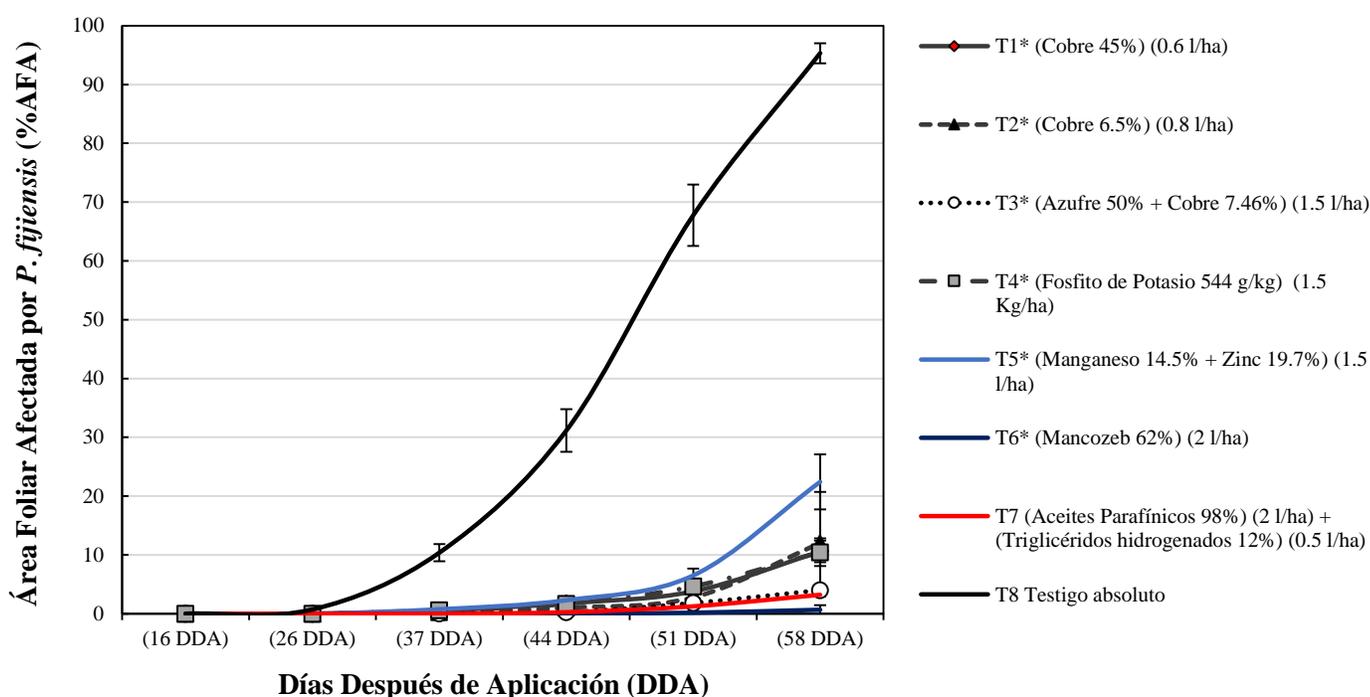
Fuente: Elaboración propia, 2022.



En el ensayo 2, se evidencia el buen desempeño de la mayoría de los tratamientos evaluados en comparación con el tratamiento comercial (T6), debido a que alcanzan retener la evolución de síntomas de *P. fijiensis* (Figura 20) de forma similar, presentando los tratamientos hasta 12 % de AFA, exceptuando el T5 que su efecto se ve menguado en comparación a los demás (77.6 % inhibición de la germinación de ascosporas), especialmente después de los 44 DDA.

Figura 20. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 2. Barras de error representa el error estándar. * = fungicida en mezcla con triglicéridos hidrogenados 12 % a 1 L.ha⁻¹.

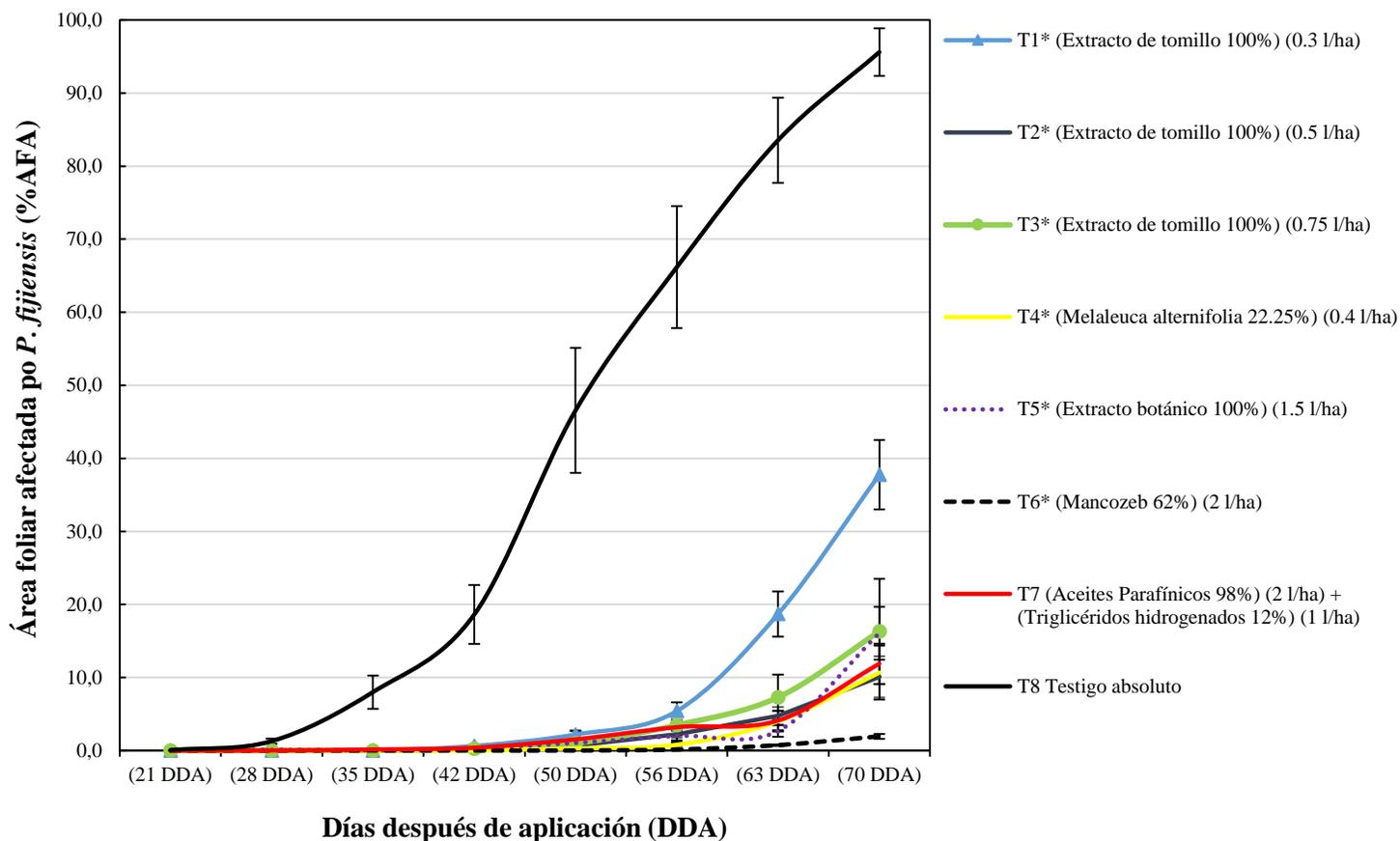
Fuente: Elaboración propia, 2022.



Por su parte, en el ensayo 3 se compara el desempeño de mezclas con productos que tienen ingredientes activos de origen orgánico, presentando los diferentes tratamientos un óptimo desempeño y mostrando hasta los 50 DDA los primeros signos de la enfermedad en el tejido foliar (síntomas en estadios 1-3) (Figura 21), sin embargo, se evidencia que a los 63 DDA las mezclas pierden su efecto retenedor de la enfermedad, siendo a los 70 DDA de forma más abrupta (porcentajes de AFA se duplican comparado a la anterior evaluación). Se debe mencionar, que solamente el tratamiento 1 y el Testigo absoluto fueron los que presentaron diferencias significativas comparándose con los demás tratamientos.

Figura 21. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 3. Barras de error representa el error estándar. * = fungicida en mezcla con aceites parafínicos 98 % a 2 L.ha⁻¹ + triglicéridos hidrogenados 12 % a 1 L.ha⁻¹.

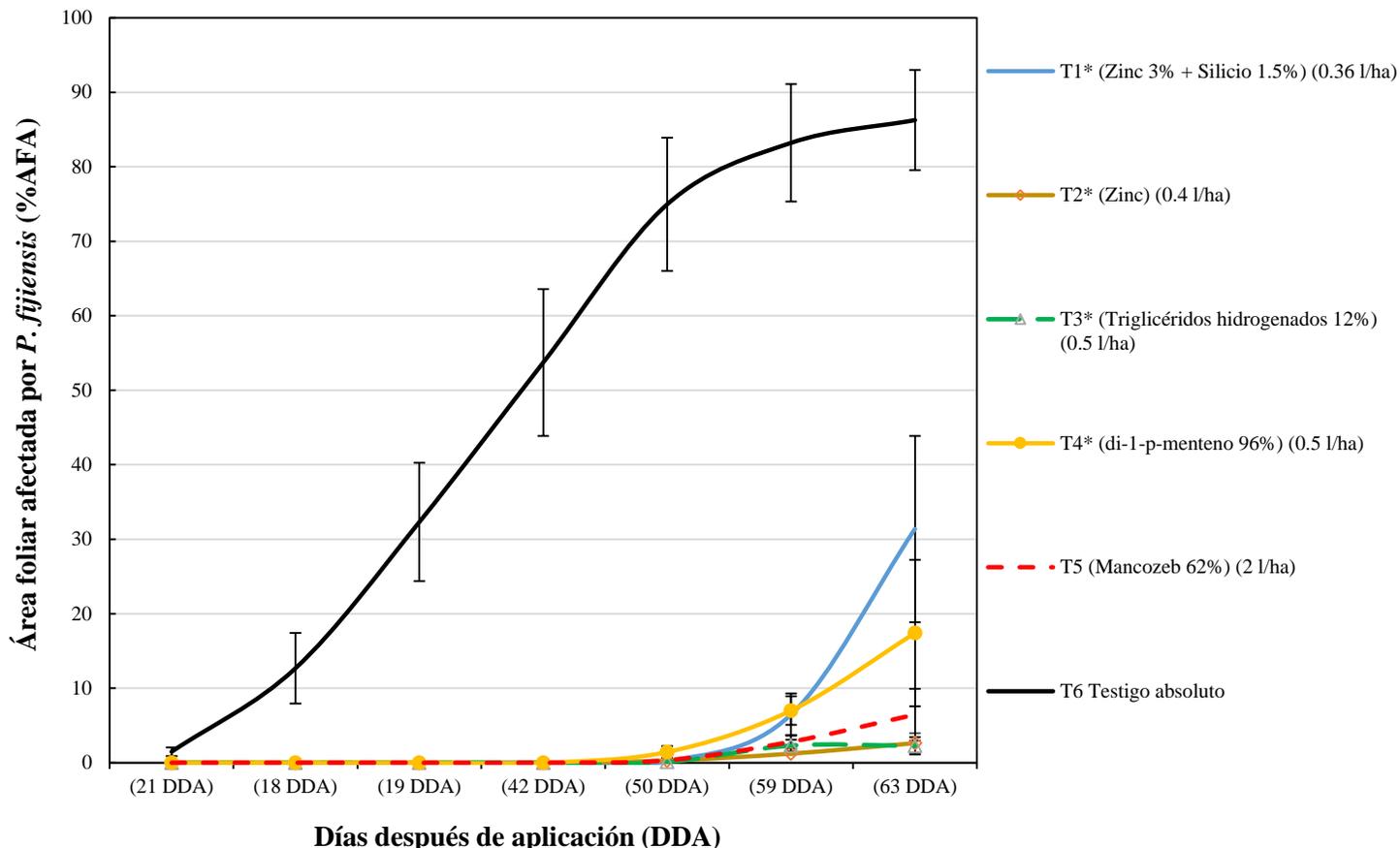
Fuente: Elaboración propia, 2022.



De igual forma, el ensayo 4 presenta similitud en el desempeño de las mezclas evaluadas con respecto a los ensayos anteriores, siendo hasta los 50 DDA que inician los signos de afectación por parte de sigatoka negra, no obstante, se puede apreciar que en los tratamientos 1 y 4 los coadyuvantes zinc 3 % + silicio 1.5 % y di-1-p-menteno 96 % (Figura 22), alcanzan a entorpecer el desempeño de mancozeb 62 %, evidenciándose en tratamiento 5, que teniendo este ingrediente activo como único componente en la mezcla logra alcanzar un desempeño de 93.5 % inhibiendo procesos en el desarrollo de *P. fijiensis*.

Figura 22. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 4. Barras de error representa el error estándar. * = fungicida en mezcla con (mancozeb 62%) (2 L.ha⁻¹).

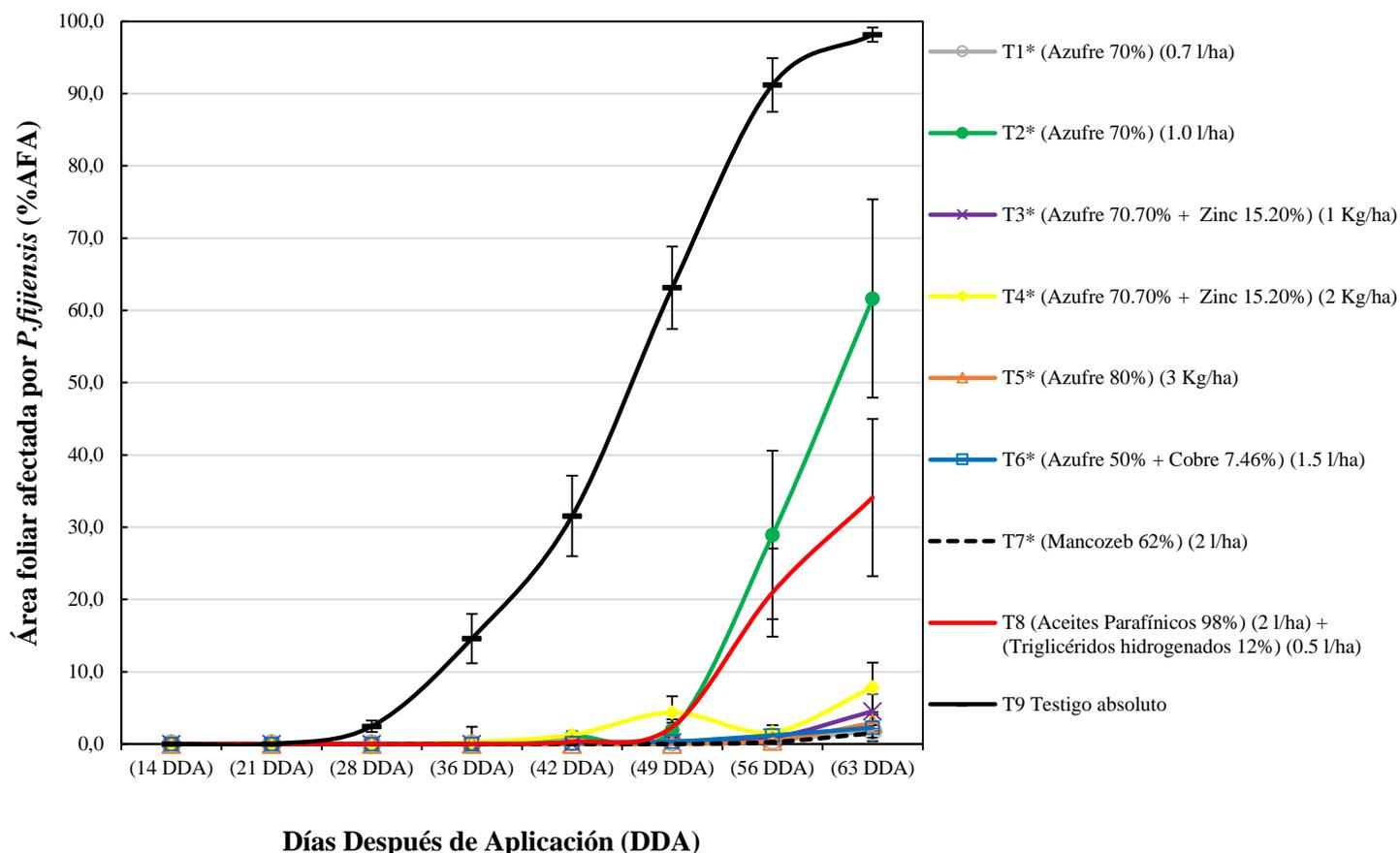
Fuente: Elaboración propia, 2022.



Asimismo, el ensayo 5 evalúa el desempeño de fungicidas con diferentes fuentes de azufre, en mezcla con aceites parafínicos 98 % y triglicéridos hidrogenados 12 % (Figura 23), donde se puede observar que los tratamientos 2 y 8 pierden abruptamente su efecto protectante a partir de los 49 DDA, mientras que los demás (T1, T3, T4, T5, T6 y T7) a los 63 DDA solamente alcanzaron porcentajes de AFA menores a 10 %. Se puede deducir al observar las gráficas de los tratamientos, que el producto con i.a. azufre 70 % a 1 L.ha⁻¹ (T2) tiene un efecto negativo en mezcla sobre los productos con i.a. aceites parafínicos 98 % y triglicéridos hidrogenados 12 %, ya que estos últimos estando presente en los demás tratamientos no presentaron este efecto.

Figura 23. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 5. Barras de error representa el error estándar. * = fungicida en mezcla con aceites parafínicos 98 % a 2 L.ha⁻¹ + triglicéridos hidrogenados 12 % a 0.5 L.ha⁻¹.

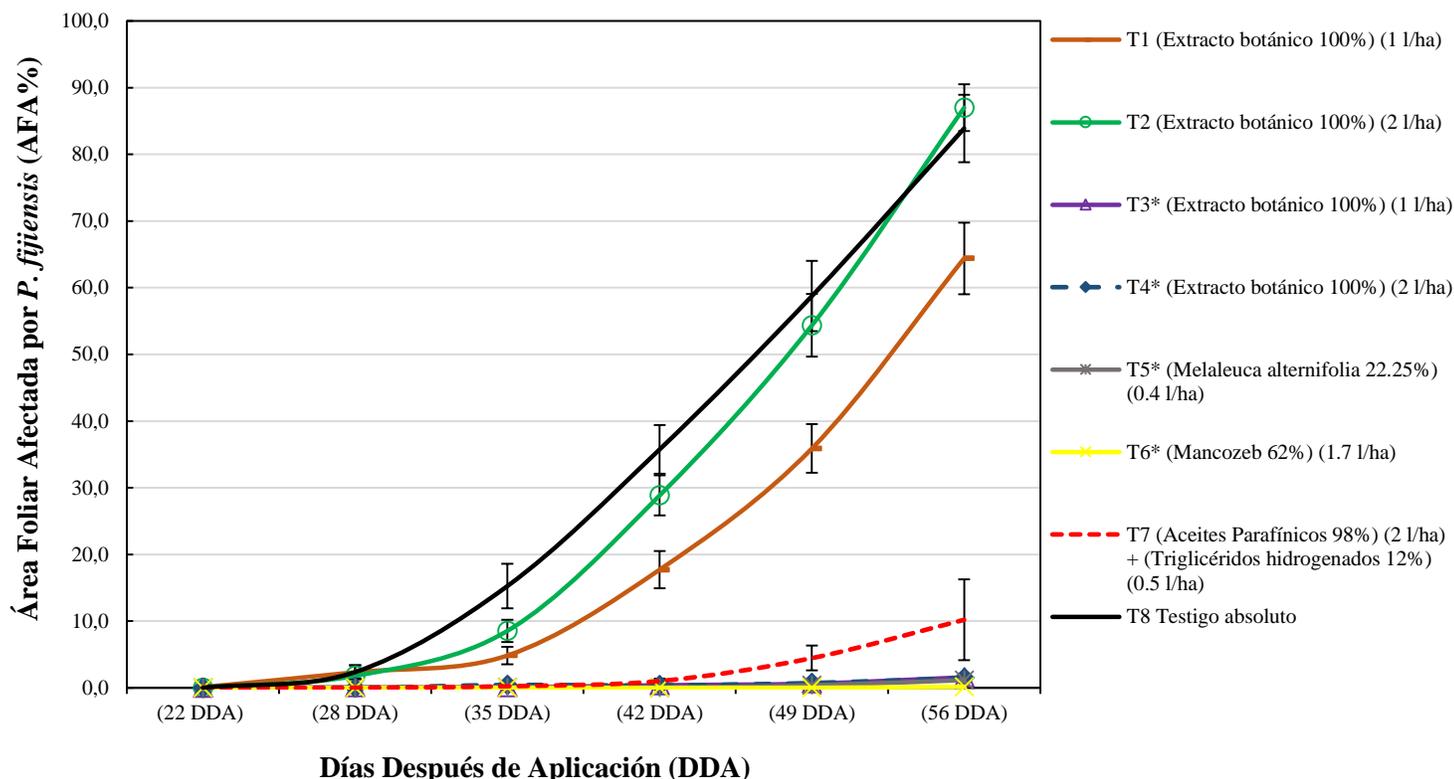
Fuente: Elaboración propia, 2022.



Finalmente, el ensayo 6 muestra el desempeño del bioestimulante extracto botánico al 100 % y en mezcla con diferentes componentes, se evidencia que el producto mejora su desempeño combinándolo con aceites parafínicos 98 % y triglicéridos hidrogenados 12 %, ya que sin estos los tratamientos alcanzan porcentajes de hasta 64.5 % de AFA (Figura 24). Se debe mencionar, que el aceite agrícola (aceites parafínicos 98 %) posee un efecto fungistático persistente en el tiempo, el cual alcanza a formar una barrera física ocasionando que la planta no pueda metabolizarlo, logrando causar afectación al desarrollo de sigatoka negra (Benavides *et al.*, 2021).

Figura 24. Desarrollo de sigatoka negra en los tratamientos evaluados en el ensayo 6. Barras de error representa el error estándar. * = fungicida en mezcla con aceites parafínicos 98 % a 2 L.ha⁻¹ + triglicéridos hidrogenados 12 % a 0.5 L.ha⁻¹.

Fuente: Elaboración propia, 2022.



6. CONCLUSIONES

- El coadyuvante triglicéridos hidrogenados 12 % demostró ser un componente estabilizador en diferentes mezclas evaluadas por medio de las pruebas de estabilidad, además, logra aportar un equilibrio en el pH de las mezclas, manteniendo rangos óptimos para diferentes fungicidas (5-7).
- El coadyuvante aceites parafínicos 98 % (aceite agrícola) destacó por mejorar el desempeño de las mezclas en cuanto a inhibir la germinación de ascosporas de sigatoka negra, esto debido su efecto fungistático.

- Las mezclas de diferentes productos fungicida con coadyuvantes, no necesariamente mejora el desempeño de la mezcla, en ciertas ocasiones puede causar incompatibilidad entre componentes, lo que podría afectar directamente el fin deseado de la aplicación.
- La metodología utilizada en esta investigación permitió determinar que el uso de todas las mezclas evaluadas garantizan un desempeño positivo inhibiendo la germinación de ascosporas, demostrando a través de tratamientos testigo que si no existe un control adecuado contra *P. fijiensis* en las plantaciones bananeras, podría significar grandes pérdidas económicas.
- El uso de coadyuvantes presentes en mezcla con fungicidas podrían garantizar no solo mejorar el desempeño de la mezcla en cuanto un accionar contra *P. fijiensis*, sino que también puede otorgarle características a la mezcla para favorecer su acción a pesar de eventos alta de precipitación.

7. RECOMENDACIONES

- Registrar a través de instrumentos con mayor precisión (probeta 100 ml) los datos para cálculo de la densidad de las mezclas, lo que permite calcular de forma más exacta el rendimiento de la mezcla aplicándose por avión
- Realizar evaluaciones del AFA % en la prueba de Single Leaf a través de láminas transparentes cuadradas y graduadas, lo que facilitará y hará más preciso la evaluación sobre la evolución de los síntomas.
- Relacionar la evolución de sigatoka negra en el tiempo con promedios de precipitaciones semanales, aportaría para comprender de mejor forma el comportamiento de la enfermedad en el periodo de evaluación

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrios, G. (2005). *Plant Pathology*. 5 ed. Elsevier Academic Press. Florida, Estados Unidos.
- Alarcón, J. y Jiménez, Y. (2012). Manejo fitosanitario del cultivo del plátano (*Musa* spp.): Medidas para la temporada invernal. ICA (Instituto Colombiana Agropecuario). Bogotá, Colombia. Disponible en <http://www.ica.gov.co/getattachment/08fbb48d-a985-4f96-9889-0e66a461aa8b/-nbspm;Manejo-fitosanitario-del-cultivo-de-platano.aspx>
- Álvarez, E., Pantoja, A., Gañan, L. y Ceballos, G. (2013). Estado del arte y opciones de manejo del Moko y la Sigatoka Negra en América Latina y el Caribe. CIAT, FAO. Cali, Colombia.
- AmbientWeather (2022). Estadísticas climatológicas del poblado de Muelle de la zona de San Carlos. Alajuela, Costa Rica.
- AMVAC. (2022). Soluciones comprobadas para la agricultura moderna. Alajuela, Costa Rica. Disponible en <https://amvac.lat/costa-rica/>
- Asmar, S., Castro, E., Pasqual, M., Pereira, F. y Soares, J. (2013). Changes in leaf anatomy and photosynthesis of micropropagated banana plantlets under different silicon sources. *Scientia Horticulturae*. Brasil.
- Benavides, L. (2019). Cuantificación temprana de *Pseudocercospora fijiensis* por medio de qPCR en modelos predictivos de Sigatoka negra en plantas de banano (*Musa* AAA). Instituto Tecnológico de Costa Rica. San Carlos, Costa Rica.
- Benavides, L., Zavala, D., Delgado, J., Mora, J., Torres, M. y Majil, E. (2021). AMGREEN Sigatoka: Desarrollo de alternativas biorracionales para el control de Sigatoka negra (*Pseudocercospora fijiensis*) en el cultivo de banano (*Musa* AAA) en Costa Rica. *Revista científica LIFE-RID*. San Carlos, Costa Rica.
- Blasco, G. y Gómez, F. (2014). Propiedades funcionales del banano (*Musa* sp.). *Revista Médica de la Universidad Veracruzana*, 14(2), 22–26. México.
- Bornacelly, C. (2002). Técnicas de aplicación aérea de plaguicidas agrícolas. CORPOICA. Bogotá. Colombia.

- Bornacelly, H. y Bolaños, J. (2003). Efecto de diferentes labores de manejo sobre el desarrollo de la Sigatoka Negra del banano en el distrito de Sevilla, zona bananera del Magdalena. Santa Marta. Universidad del Magdalena. Área fitopatología. Málaga, España.
- CORBANA (Corporación Bananera Nacional). (2011). Implementación de buenas prácticas agrícolas para reducir el escurrimiento de plaguicidas en el cultivo de banano de la región Caribe Costarricense. San José, Costa Rica.
- CORBANA (Corporación Bananera Nacional). (2018). Fomento y desarrollo de la industria bananera en Costa Rica: Estadísticas bananeras. San José, Costa Rica. Disponible en <https://www.corbana.co.cr/categories/estadisticas-bananeras>
- CORBANA (Corporación Bananera Nacional). (2020). Fomento y desarrollo de la industria bananera en Costa Rica: Estadísticas bananeras. San José, Costa Rica. Disponible en <https://www.corbana.co.cr/categories/estadisticas-bananeras>
- Corrales, A., Peñaloza, J., Rietz, E., Mora, A., Menezes-Filho, J., Smith, D... Lindh, C. (2021). Exposición a pesticidas de uso común, manganeso, plomo y función tiroidea en mujeres embarazadas del estudio Salud Ambiental Infantil (ISA), Costa Rica. ScienceDirect. Costa Rica.
- Churchill, A. (2011). *Mycosphaerella fijiensis*, the black leaf streak pathogen of banana: progress towards understanding pathogen biology and detection, disease development, and the challenges of control. Molecular Plant Pathology. Estados Unidos.
- Crous, P., Groenewald, J., Slippers, B. y Windfield, M. (2016). Global food and fibre security threatened by current inefficiencies in fungal identification. Royal Society Publishing. Phil. Trans. R. Soc. B, 371, 20160024. Sudáfrica.
- Departamento LIFE-RID. (2022). Fotografías a través de dron de la estación experimental LIFE-RID. Alajuela, Costa Rica.
- Escobedo, A. (2013). Cadena productiva de banano criollo (*Gross Michel*) de Costa Rica. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). Seguridad Alimentaria bajo la Pandemia de COVID-19. Disponible en: <http://www.fao.org/3/ca8873es/CA8873ES.pdf>

- Fort, L., Bille, H., Cros, D., Carlote, O. Nicodeme, V., Bell, J. y Enoch G. (2022). Perspective for genomic-enabled prediction against black sigatoka disease and drought stress in polyploid species. *Frontiers*. Benín.
- Fouré, E. (1985). Black leaf streak Disease of bananas and plantains (*Mycosphaerella fijiensis*, Morelet), Study of the symptoms and stages of the disease in Gabon. IRFE. Paris.
- Ganry, J., Fouré, E., Lapayre, L. y Lescot, T. (2012). An Integrated Approach to Control the Black Leaf Streak Disease (BLSD) of Bananas, while reducing fungicide use and environmental impact. Disponible en: http://cdn.intechopen.com/pdfs/26030/InTechAn_integrated_approach_to_control_the_black_leaf_streak_disease_blsd_of_bananas_while_reducing_fungicide_use_and_environmental_impact.
- Gauhl, F. y Pasberg, C. (1994). Epidemiology of Black Sigatoka disease on plantain in Nigeria. *Phytopathology*. Nigeria.
- Gómez, M. (2013). Efecto de las condiciones de incubación y de compuestos inorgánicos y orgánicos sobre la esporulación de lesiones de Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis*). TEC. San Carlos, Costa Rica.
- Guzmán, M. (2006). Epidemiología de la Sigatoka Negra y el sistema de preaviso biológico. Manejo convencional y alternativo de la Sigatoka Negra, nematodos y otras plagas asociadas al cultivo de Musáceas en los trópicos. INIBAP. Guayaquil. Ecuador.
- Guzmán, M. (2012). Control biológico y cultural de la Sigatoka negra. 45 Congreso Brasileiro de Fitopatología. Manaus, AM. Brazilian Phytopathological Society.
- Guzmán, M., Orozco, M. y Pérez, L. (2013). Las enfermedades Sigatoka de las hojas de banano: dispersión, impacto y evolución de las estrategias de manejo de América latina y el Caribe. XX Reunión internacional de asociación para la cooperación en búsqueda y desenvolvimiento integral de Musáceas (banano y plátano). Fortaleza, Brasil.
- Hoffman, L., Trombetta, L. y Hardej, D. (2015). Ethylene bisdithiocarbamate pesticides Maneb and Mancozeb cause metal overload in human colon cells. *Science Direct*. Estados Unidos.

- Lapayre, L., Fouré, E., Abadie, C. y Carlier, J. (2010). Black leaf streak disease is challenging the banana industry. Estados Unidos.
- MAGRAMA. (2015). Guía de buenas prácticas para la mezcla en el campo de productos sanitarios. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, España.
- Manzo, S.; Guzmán, S.; Rodríguez, C.; James, A. y Orozco, M. (2005). Biología de *Mycosphaerella fijiensis* Morelet y su interacción con *Musa* spp. Revista Mexicana de Fitopatología 23(1):87-96. México.
- Marín, D., Romero, R., Guzmán, M. y Sutton, T. (2003). Black Sigatoka: An increasing treat to banana cultivation. Plant disease. Estados Unidos.
- Martínez, I., Villalta, R., Soto, E., Murillo, G. y Guzmán, M. (2011). Manejo de la Sigatoka Negra en el cultivo de banano. Hoja divulgativa 2011. Disponible en: [http://www.infoagro.net/programas/Ambiente/pages/adaptacion/casos/Siga toka.pdf](http://www.infoagro.net/programas/Ambiente/pages/adaptacion/casos/Siga_toka.pdf)
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (1991). Recomendaciones para el manejo seguro de los plaguicidas, en Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2017). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de banano en Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Montero, F. (2020). Fortalecimiento de la calidad de vida de la sociedad productiva agrícola. Moko en banano (*Ralstonia solenacearum*). UCR, San Pedro, Costa Rica. Disponible en <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2020/09/BoletinMoko.pdf>
- Mora, A., Hoppin, J., Córdoba, L., Cano, J., Soto, M., Eskenazi, B...Van Wendel, B. (2020). Exposición prenatal a pesticidas y resultados de salud respiratoria en el primer año de vida: Resultados del estudio de salud ambiental de los bebés (ISA). ScienceDirect. Costa Rica.
- Mourichon, X., Carlier, J. y Fouré, E. (1997). Enfermedades de Sigatoka: Raya negra de la hoja (Sigatoka Negra) Enfermedad de Sigatoka (Sigatoka amarilla). PROMUSA. Disponible en: [http://www.bioversityinternational.org/uploads/tx_news/Sigatoka_leaf_spot_diseases_699_E S.pdf](http://www.bioversityinternational.org/uploads/tx_news/Sigatoka_leaf_spot_diseases_699_ES.pdf)

- Murillo, J. (2015). Efecto de la sensibilidad de *Mycosphaerella fijiensis* sobre la eficacia biológica de fungicidas sistémicos utilizados contra la Sigatoka Negra. Instituto Tecnológico de Costa Rica. San Carlos, Costa Rica.
- Orozco, M., García, K., Manzo, G., Guzmán, S., Martínez, L., Beltrán, M., Garrigo, E., Torres, J. y Canto, B. (2013). La Sigatoka Negra y su manejo integrado en banano. SAGARPA. INIFAB. CIRPAC. México.
- Osorio, G. (2006). Evaluación de hongos endófitos y extractos botánicos para el control de la sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) en banano. Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.
- Paro, R., Tiboni, G., Buccione, R., Rossi, G., Cellini, V., Canipari, R. y Cecconi, S. (2012). The fungicide mancozeb induces toxic effects on mammalian granulosa cells. *Toxicol. Appl. Pharmacol. Italia*.
- PROCOMER. (2021). Anuario Estadístico 2019. Costa Rica. Disponible en: <https://www.procomer.com/exportador/documentos/anuarioestadistico-2019/>
- Queiroz, C., Ferreira, M., Ferreira, G., Gomide, E., Fernandes, E. y Vieira, M. (2013). Use of the IRAP to study genetic variability in *Pseudocercospora fijiensis* populations. *Current Microbiology*. Brasil.
- Rivera, M. y Wright, E. (2020). Apuntes de patología vegetal. Fundamentos y prácticas para la salud de las plantas. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- Robinson, J. y Galán, V. (2012). Bananos y plátanos. Ediciones Mandí-Prensa. Madrid, España.
- Robinson, J. y De Villiers, E. (2007). The cultivation of banana. ARC-Institute for Tropical and Subtropical Crops. 258 p. South Africa.
- Scot, N. (2008). Black Leaf Streak of Banana. Plant Disease. Corporative Extension Services. Hawaii. Disponible en: <http://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/PD-50.pdf>
- SFE. (2022). *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* Raza 4 Tropical. Ministerio de agricultura y ganadería, Costa Rica. Disponible en https://www.sfe.go.cr/SitePages/FocR4T/Inicio_FocR4T.aspx#:~:text=En%20Costa%20Rica%20est%C3%A1%20presente,fincas%20de%20banano%20de%20exportaci%C3%B3n.

- Soto, M. (2014). Bananos: Conceptos básicos. Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Van Wendel, B., Barbeau, B., Bouchard, M., Mora, A., Skytt, A. Córdoba, L...Mergler, D. (2016). Concentraciones de manganeso en agua potable de aldeas cercanas a plantaciones bananeras con aspersión aérea de mancozeb en Costa Rica: Resultados del Estudio de Salud Ambiental Infantil (ISA). Costa Rica.
- Viljoen, A., Mahuku, G., Massawe, C., Ssali, R., Kimunye, J., Mostert, G., Ndayihanzamaso, P. y Coyne, D. (2017). Banana diseases and pest: fields guide for diagnostics and data collection. IITA. Ibadan, Nigeria.
- Vizcaíno, D. y Betancourt, R. (2013). Guía de buenas prácticas agrícolas para banano: Inocuidad de los alimentos (en línea). Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, ECU. Disponible en: <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/guia4.pdf>
- Zamora, R., Alvarado, F., Robles-Chaves, D., Sáenz, G., Avendano, E., Sánchez, A. y Starbird, R. (2019). Electrochemical Characterization of Mancozeb Degradation for Wastewater Treatment Using a Sensor Based on Poly (3, 4- ethylenedioxythiophene) (PEDOT) Modified with Carbon Nanotubes and Gold Nanoparticles. Polymers (Basel). Costa Rica.

9. ANEXOS

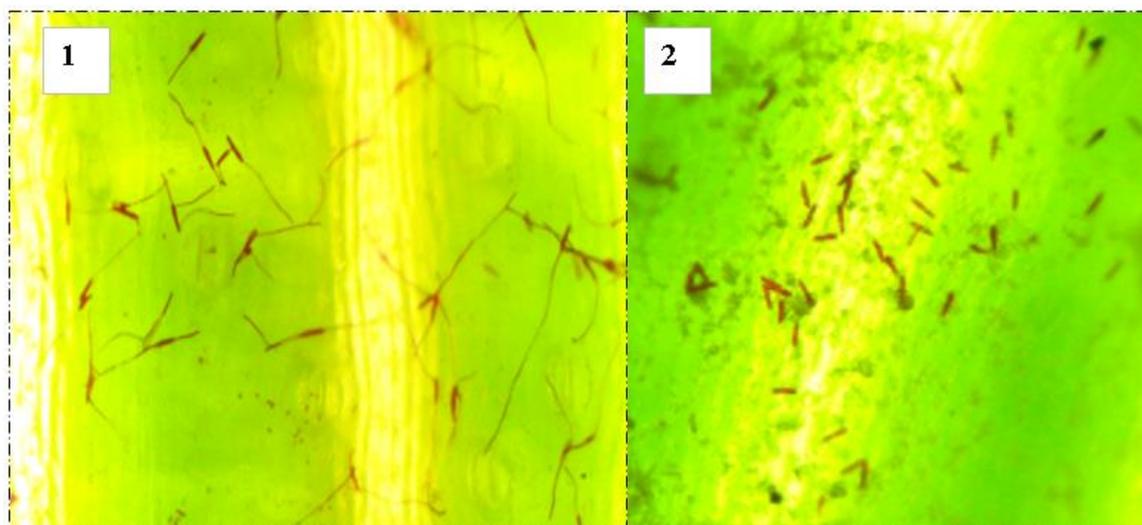
Anexo 1. Ejemplo de protocolo para elaboración de mezclas.

Orden de Agregación	Producto	Dosis (L o Kg.ha ⁻¹)	Cantidad (ml o g)	Proporción	Detalle del Proceso
1	Agua	-	204.54	0.5	Iniciar agitación
2	triglicéridos hidrogenados 12 %	0.5	11.36	1	Agitar 5 minutos
3	aceites parafínicos 98 %	2	45.45	1	Agitar 5 minutos
4	azufre 50 % + cobre 7.46 %	1.5	34.09	1	Agitar 5 minutos
5	Agua	-	204.54	0.5	Agitar 5 minutos

500

Fuente: Departamento LIFE-RID, 2022.

Anexo 2. Ascosporas germinadas (1) y no germinadas (2) vistas en el microscopio.



Anexo 3. Resumen de resultados obtenidos en la prueba de tenacidad.

Tratamientos	Descripción de la mezcla	Ascosporas germinadas (%)	Desv.est. Ascosporas germinadas (%)	Ascosporas no germinadas (%)	Desv.est. Ascosporas no germinadas (%)
T1*	(zinc 3% + silicio 1.5%) (0.36 L.ha ⁻¹)	9.5	5.7	90.5	5.7
T2*	(agentes quelatantes 7% + zinc 3.4%) (0.4 L.ha ⁻¹)	22.3	21.7	77.7	21.7
T3*	(triglicéridos hidrogenados 12%) (0.5 L.ha ⁻¹)	9.5	5.8	90.5	5.8
T4*	(di-1-p-menteno 96%) (0.5 L.ha ⁻¹)	10.1	6.9	89.9	6.9
T5	(mancozeb 62%) (2 L.ha ⁻¹)	3.5	4.7	96.5	4.7
T6	Testigo absoluto	86.5	24.1	13.5	4.7

* Fungicida en mezcla con (mancozeb 62%) (2 L.ha⁻¹)

Desv.est. = Desviación estándar

Anexo 4. Resumen estadístico, ascosporas no germinadas.

Resultados para el modelo:

Variable dependiente: Media

Medidas de ajuste de modelo:

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
18	94.93	99.30	-38.47	3.52	0.95	

AIC y BIC menores implica mejor

Prueba de hipótesis marginales (SS tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	1593.65	<0.0001
Tratamiento	5	22.15	<0.0001

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Tratamiento	5	12	22.15	<0.0001

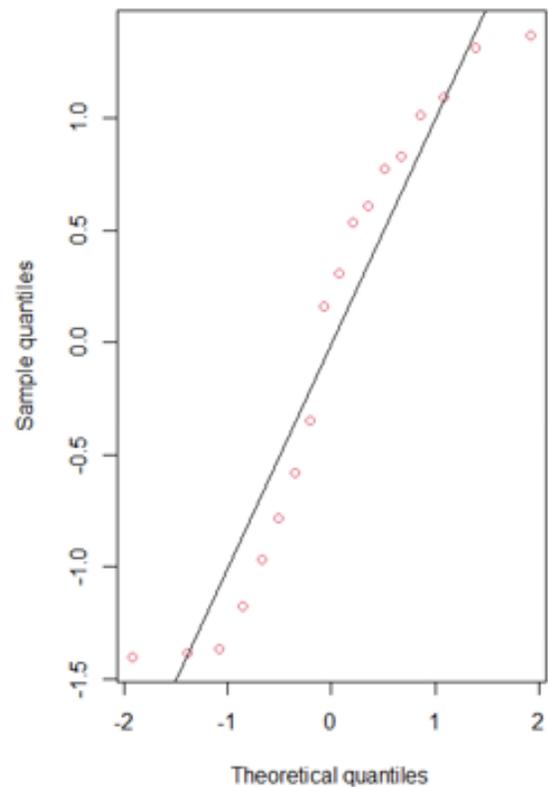
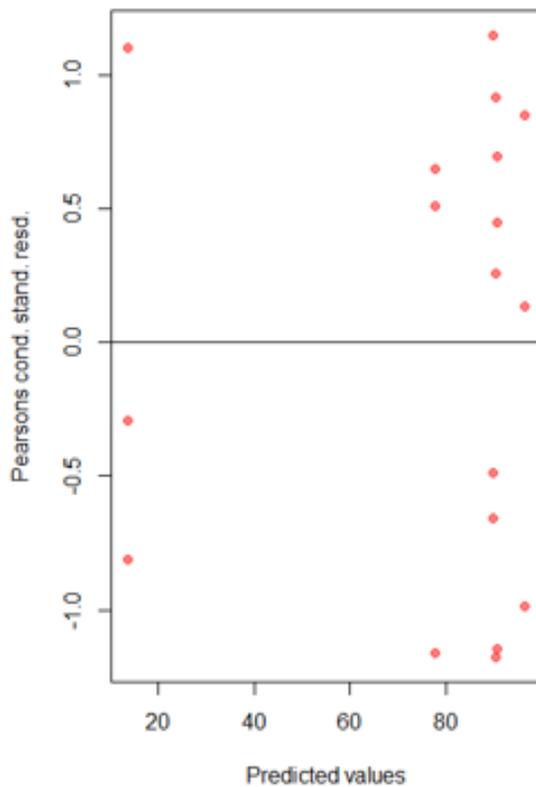
Estructura de varianza

Modelo de varianza: *varIdent*

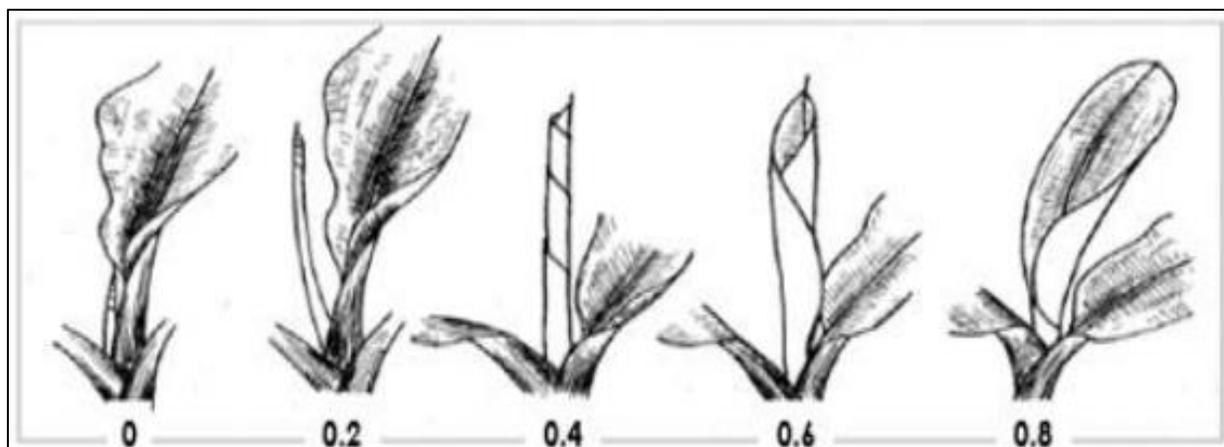
Fórmula: $\sim 1 \mid \text{Cluster}$

Parámetros de la función de la varianza

Parameter	Estim.
1	1.00
2	3.79
3	0.32



Anexo 5. Escala de grados de apertura de la hoja candela.



Anexo 6. Resumen de resultados del ensayo 1 en la prueba de Single Leaf.

Tratamiento	Desarrollo del área foliar afectada por sigatoka negra (<i>P.fijinesis</i>)															
	16 DDA		23 DDA		33 DDA		37 DDA		44 DDA		51 DDA		58 DDA		65 DDA	
	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)
T1	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.1	± 0.05	0.1	± 0.05	1.6	± 0.29	5.3	± 1.10	37.6	± 7.21
T2	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.1	± 0.06	0.2	± 0.10	2.1	± 1.34	3.0	± 2.34
T3	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	1.0	± 0.63	40.0	± 24.49	40.2	± 24.41
T4	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.1	± 0.14	0.3	± 0.18	2.1	± 0.88
T5	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	1.0	± 0.00
T6	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.2	± 0.13	0.6	± 0.33	0.8	± 0.36	2.5	± 1.13	9.1	± 3.47
T7	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.1	± 0.05	0.3	± 0.10	2.8	± 1.07	3.9	± 0.85	19.8	± 7.10
T8	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.3	± 0.17	0.9	± 0.36
T9	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.3	± 0.11	0.8	± 0.17	3.0	± 1.14	8.0	± 2.44	13.8	± 6.80	22.4	± 8.82
T10	0.0	± 0.00	1.8	± 0.27	9.6	± 1.39	17.4	± 2.21	32.2	± 4.23	62.1	± 6.91	89.6	± 5.93	95.3	± 3.91

DDA = Días después de aplicación

AFA = Área foliar afectada

E.E. = Error estándar

Anexo 7. Resumen de resultados del ensayo 2 en la prueba de Single Leaf.

Desarrollo del Área Foliar Afectada (AFA) por Sigatoka negra (<i>P. fijiensis</i>)												
Tratamiento	16 DDA		26 DDA		37 DDA		44 DDA		51 DDA		58 DDA	
	AFA (%)	E.E (%)										
T1	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.5	± 0.17	1.8	± 0.53	3.8	± 1.44	10.6	± 1.84
T2	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.3	± 0.25	1.0	± 0.41	2.8	± 1.03	12.0	± 8.71
T3	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.1	± 0.06	0.3	± 0.11	1.8	± 0.36	4.0	± 0.81
T4	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.6	± 0.21	1.7	± 0.41	4.6	± 0.77	10.5	± 2.36
T5	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.8	± 0.23	2.3	± 0.32	6.5	± 1.19	22.4	± 4.67
T6	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.2	± 0.09	0.7	± 0.28
T7	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.3	± 0.10	1.3	± 0.25	3.2	± 0.76
T8	0.0	± 0.00	0.7	± 0.10	10.4	± 1.46	31.1	± 3.62	67.8	± 5.24	95.3	± 1.71

DDA = Días después de aplicación

AFA = Área foliar afectada

E.E. = Error estándar

Anexo 8. Resumen de resultados del ensayo 3 en la prueba de Single Leaf.

Desarrollo del área foliar afectada por sigatoka negra (<i>P. fijiensis</i>)																
Tratamiento	21 DDA		28 DDA		35 DDA		42 DDA		50 DDA		56 DDA		63 DDA		70 DDA	
	AFA (%)	E.E (%)														
T1	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.6	± 0.15	2.2	± 0.54	5.4	± 1.19	18.7	± 3.08	37.8	± 4.76
T2	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.1	± 0.05	0.7	± 0.21	2.2	± 0.48	4.8	± 1.23	10.1	± 2.80
T3	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.2	± 0.13	1.0	± 0.33	3.5	± 1.42	7.3	± 3.10	16.3	± 7.22
T4	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.3	± 0.12	0.8	± 0.18	4.0	± 1.41	10.7	± 3.70
T5	0.0	± 0.00	0.1	± 0.06	0.0	± 0.04	0.3	± 0.18	1.0	± 0.60	2.0	± 0.83	2.7	± 0.79	16.1	± 3.61
T6	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.1	± 0.09	0.7	± 0.11	1.9	± 0.33
T7	0.0	± 0.00	0.0	± 0.00	0.1	± 0.07	0.4	± 0.25	1.5	± 1.15	3.2	± 1.82	4.1	± 1.35	11.9	± 2.76
T8	0.1	± 0.06	1.3	± 0.36	8.0	± 2.27	18.6	± 4.03	46.6	± 8.56	66.2	± 8.35	83.6	± 5.82	95.6	± 3.26

DDA = Días después de aplicación

AFA = Área foliar afectada

E.E. = Error estándar

Anexo 9. Resumen de resultados del ensayo 4 en la prueba de Single Leaf.

Tratamiento	Desarrollo del área foliar afectada por sigatoka negra (<i>P.fijinesis</i>)													
	21 DDA		28 DDA		35 DDA		42 DDA		50 DDA		59 DDA		63 DDA	
	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)
T1	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.2 ± 0.09	6.5 ± 2.82	31.4 ± 12.5			
T2	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.3 ± 0.12	1.2 ± 0.14	2.6 ± 1.36			
T3	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.1 ± 0.06	2.3 ± 0.79	2.3 ± 1.14			
T4	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	1.4 ± 0.77	7.0 ± 1.92	17.4 ± 9.82			
T5	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.3 ± 0.12	2.8 ± 0.92	6.5 ± 3.47			
T6	1.5 ± 0.59	12.7 ± 4.75	32.3 ± 7.94	53.7 ± 9.85	74.9 ± 8.95	83.2 ± 7.87	86.3 ± 6.73							

DDA = Días después de aplicación

AFA = Área foliar afectada

E.E. = Error estándar

Anexo 10. Resumen de resultados del ensayo 5 en la prueba de Single Leaf.

Tratamiento	Desarrollo del área foliar afectada por sigatoka negra (<i>P.fijinesis</i>)															
	14 DDA		21 DDA		28 DDA		36 DDA		42 DDA		49 DDA		56 DDA		63 DDA	
	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)
T1	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.3 ± 0.18	0.4 ± 0.17	0.6 ± 0.22	1.8 ± 0.90				
T2	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	1.1 ± 0.49	1.9 ± 1.01	28.9 ± 11.66	61.6 ± 13.71				
T3	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.1 ± 0.05	0.2 ± 0.10	0.9 ± 0.39	4.5 ± 2.39				
T4	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.3 ± 0.10	1.3 ± 0.49	4.4 ± 2.28	1.6 ± 0.96	7.8 ± 3.44					
T5	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.4 ± 0.14	2.9 ± 1.15				
T6	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.3	0.1 ± 0.14	0.3 ± 0.21	1.2 ± 0.48	2.3 ± 1.10					
T7	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.3 ± 0.09	1.5 ± 1.11				
T8	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 2.4	0.3 ± 0.16	2.4 ± 1.03	20.9 ± 6.11	34.1 ± 10.90					
T9	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	2.5 ± 0.77	14.6 ± 3.42	31.6 ± 5.58	63.2 ± 5.70	91.2 ± 3.70	98.2 ± 0.97							

DDA = Días después de aplicación

AFA = Área foliar afectada

E.E. = Error estándar

Anexo 11. Resumen de resultados del ensayo 6 en la prueba de Single Leaf.

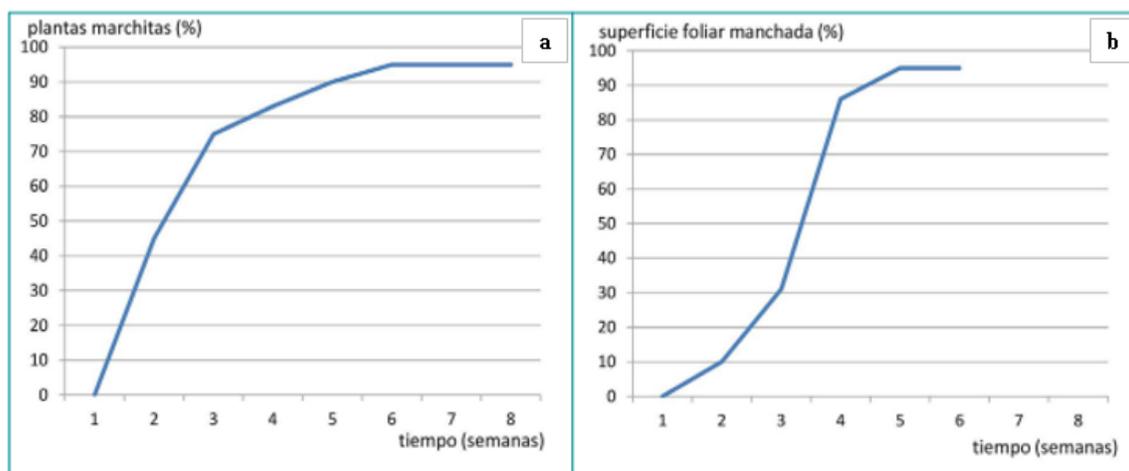
Tratamiento	Desarrollo del área foliar afectada por sigatoka negra (<i>P.fijinesis</i>)											
	22 DDA		28 DDA		35 DDA		42 DDA		49 DDA		56 DDA	
	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)	AFA (%)	E.E (%)
T1	0.1 ± 0.09	2.3 ± 1.03	4.8 ± 1.30	17.7 ± 2.79	35.9 ± 3.66	64.4 ± 5.37						
T2	0.0 ± 0.00	1.8 ± 0.36	8.5 ± 1.66	28.8 ± 3.00	54.4 ± 4.71	87.0 ± 3.51						
T3	0.0 ± 0.00	0.1 ± 0.06	0.1 ± 0.06	0.4 ± 0.20	0.6 ± 0.20	1.6 ± 0.56						
T4	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.4 ± 0.29	0.4 ± 0.11	0.7 ± 0.14	1.5 ± 0.31						
T5	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.04	0.0 ± 0.00	0.4 ± 0.12	1.1 ± 0.37						
T6	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.1 ± 0.07						
T7	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.2 ± 0.10	1.0 ± 0.35	4.4 ± 1.86	10.2 ± 6.05						
T8	0.0 ± 0.00	2.4 ± 1.01	15.3 ± 3.33	35.8 ± 3.63	58.8 ± 5.27	83.9 ± 5.05						

DDA = Días después de aplicación

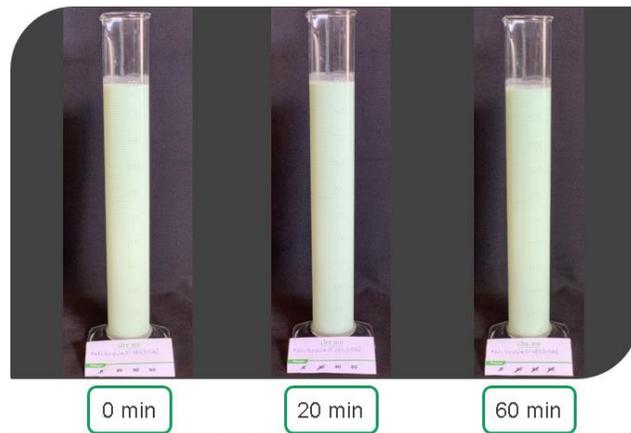
AFA = Área foliar afectada

E.E. = Error estándar

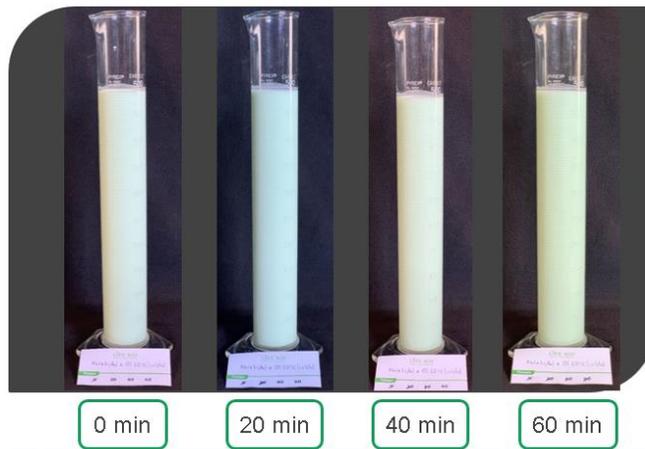
Anexo 12. Curva de progreso de una enfermedad. a. monocíclica y b. policíclica.



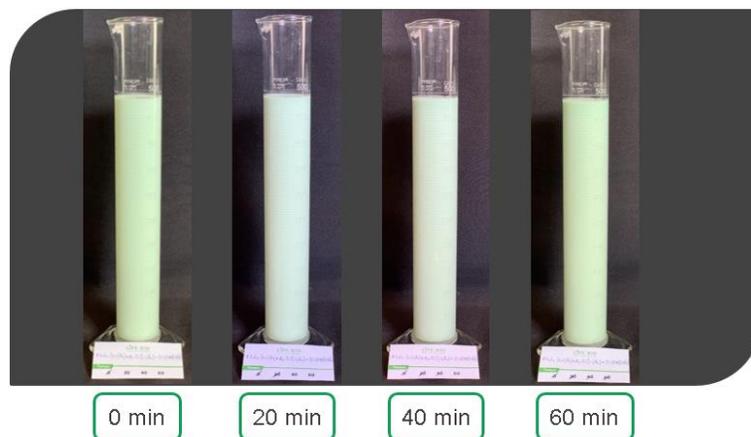
Anexo 13. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 1.



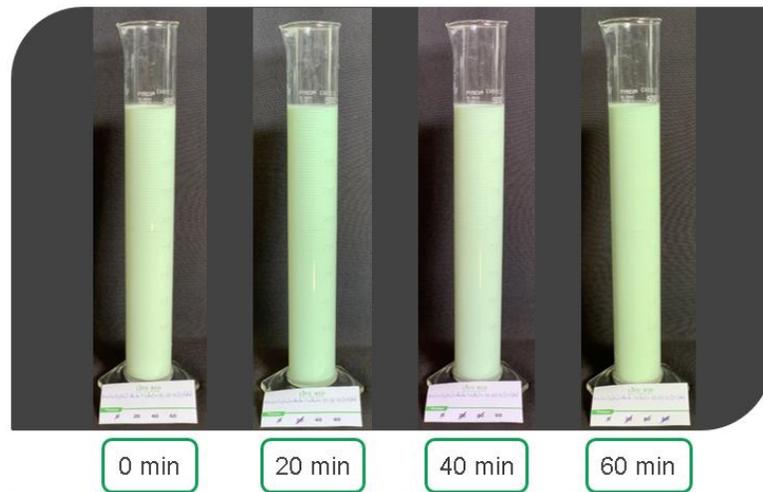
Anexo 14. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 2.



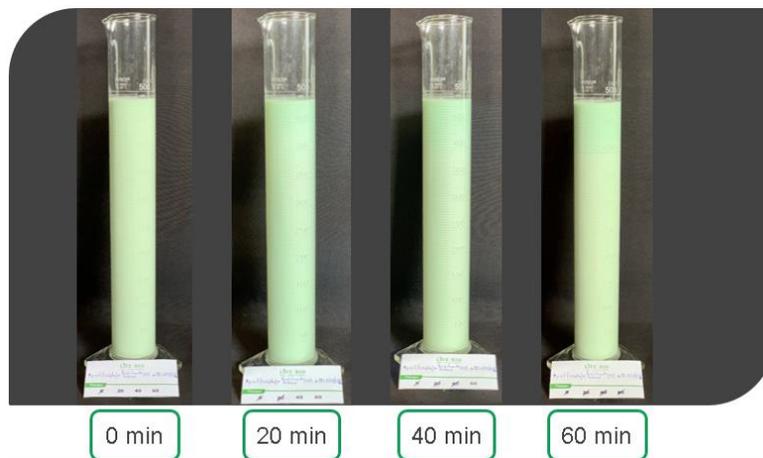
Anexo 15. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 3.



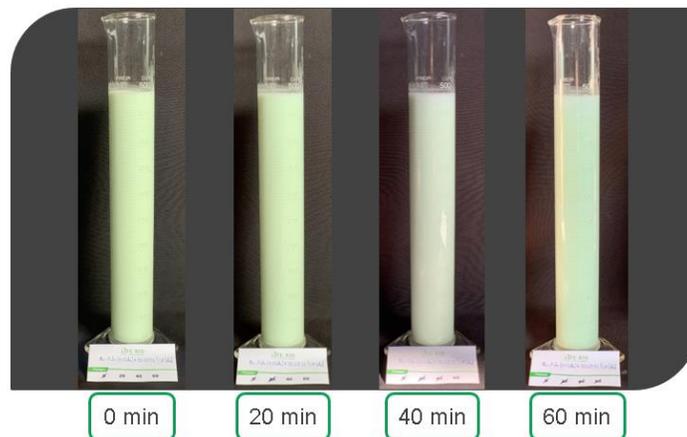
Anexo 16. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 4.



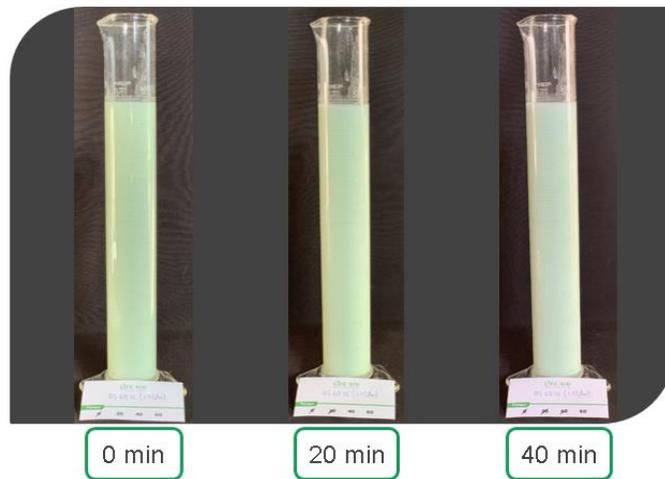
Anexo 17. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 5.



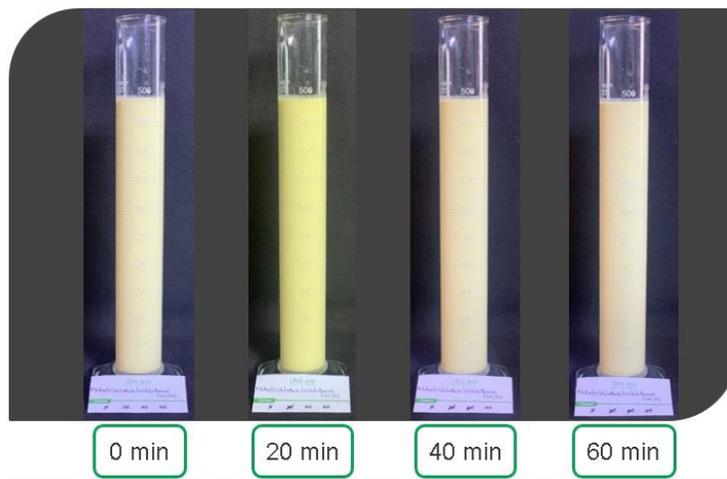
Anexo 18. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 6.



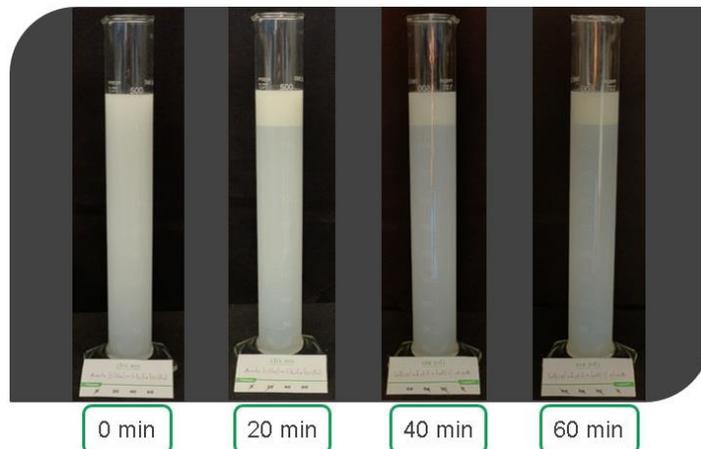
Anexo 19. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 7.



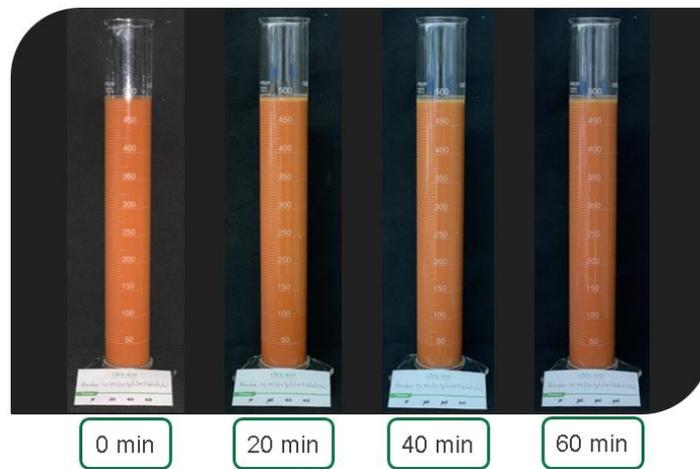
Anexo 20. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 8.



Anexo 21. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 9.



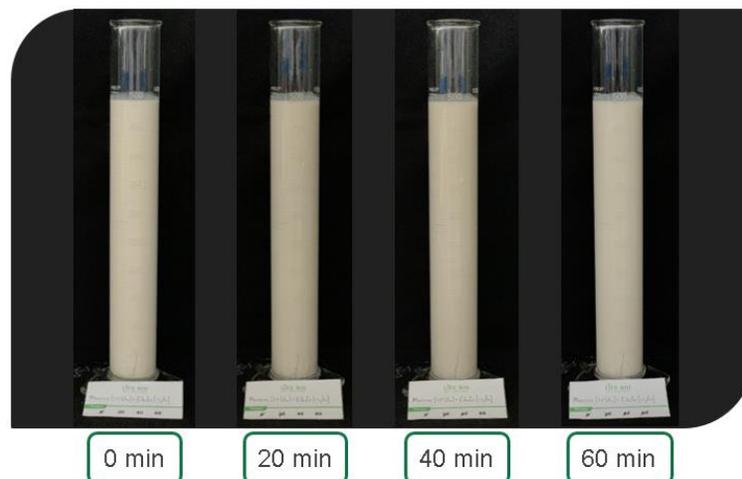
Anexo 22. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 10.



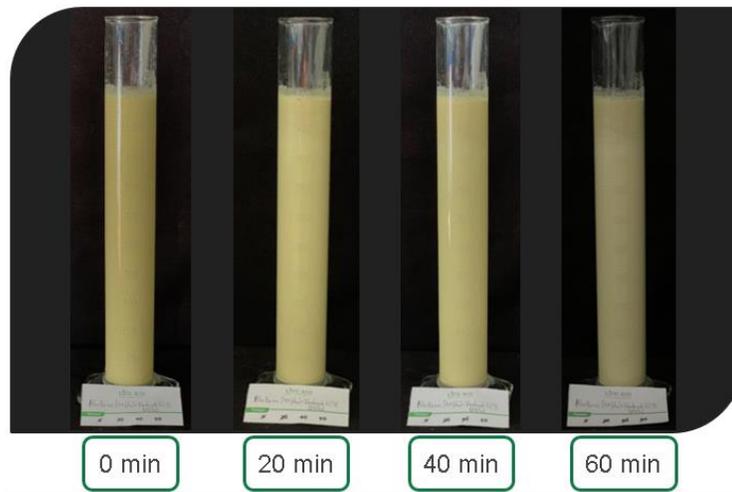
Anexo 23. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 12.



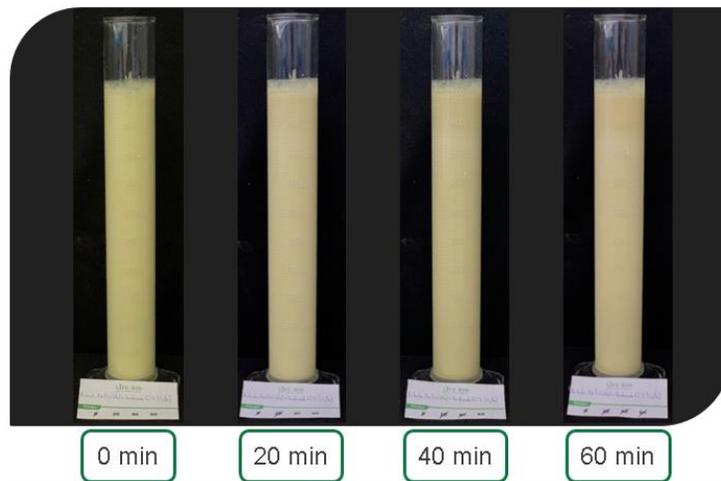
Anexo 24. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 13.



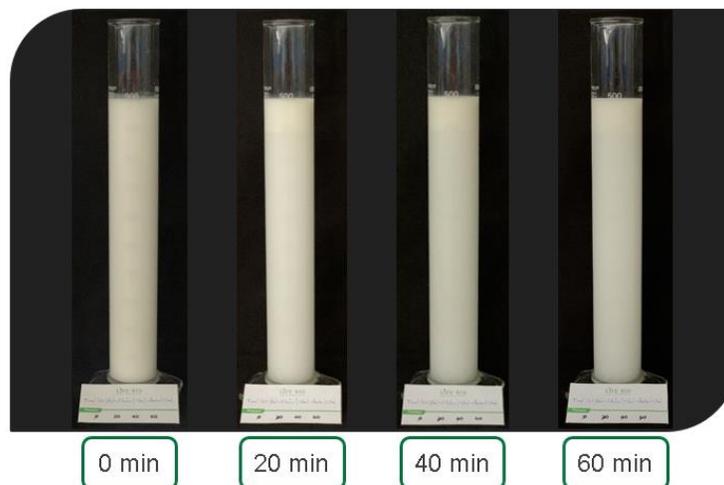
Anexo 25. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 14.



Anexo 26. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 15.



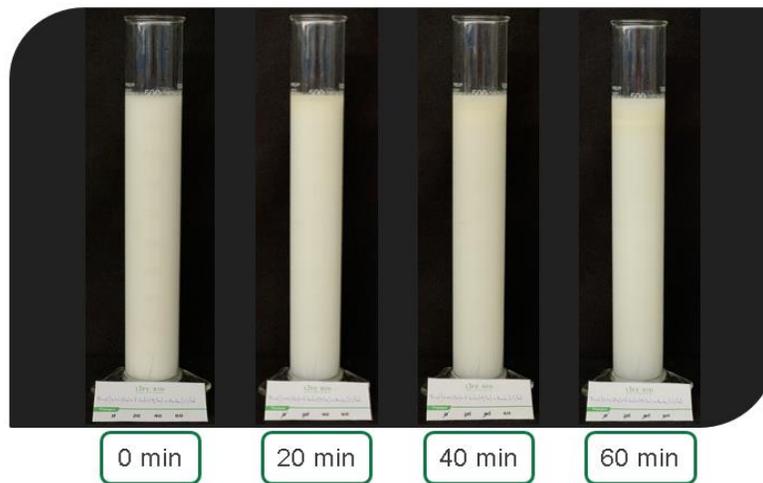
Anexo 27. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 16.



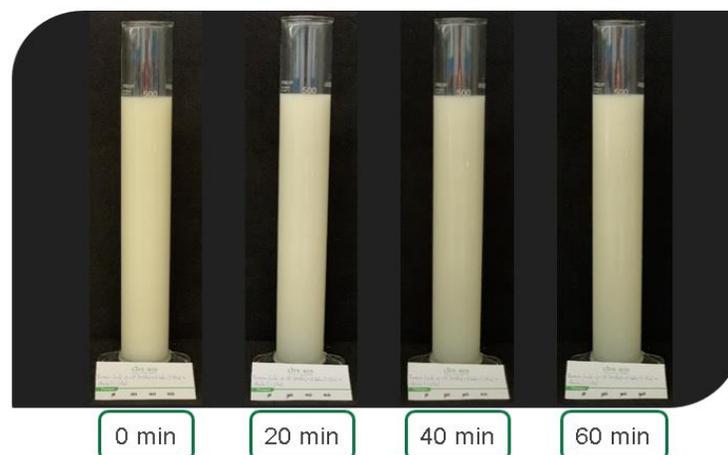
Anexo 28. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 17.



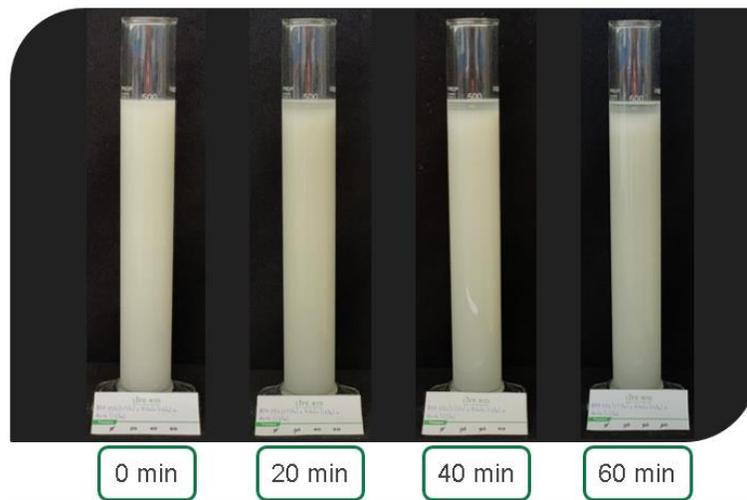
Anexo 29. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 18.



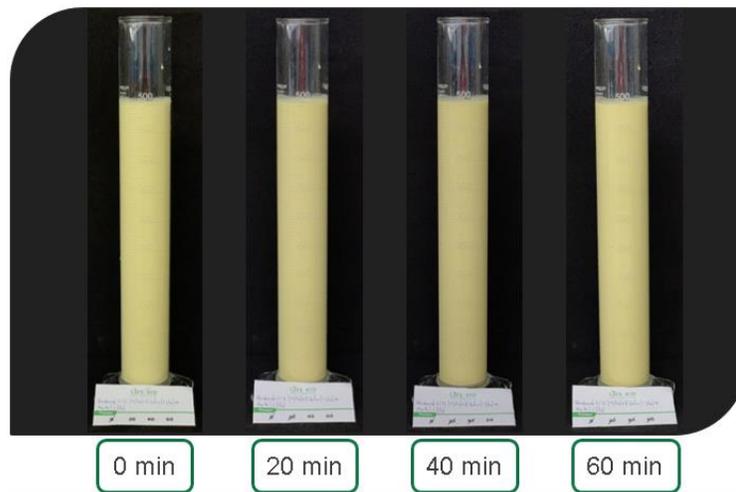
Anexo 30. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 19.



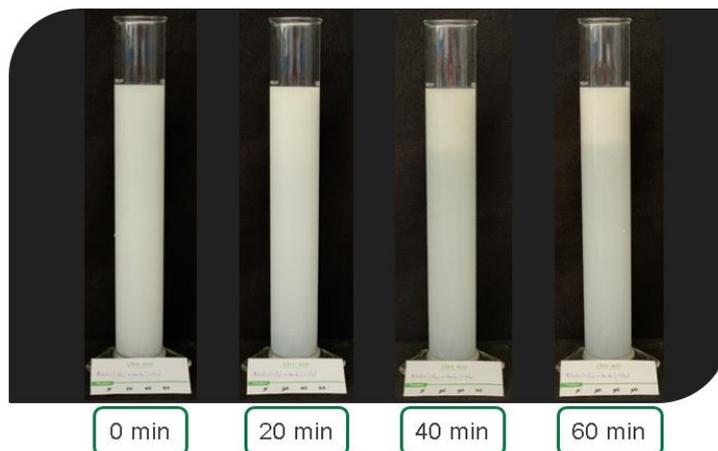
Anexo 31. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 20.



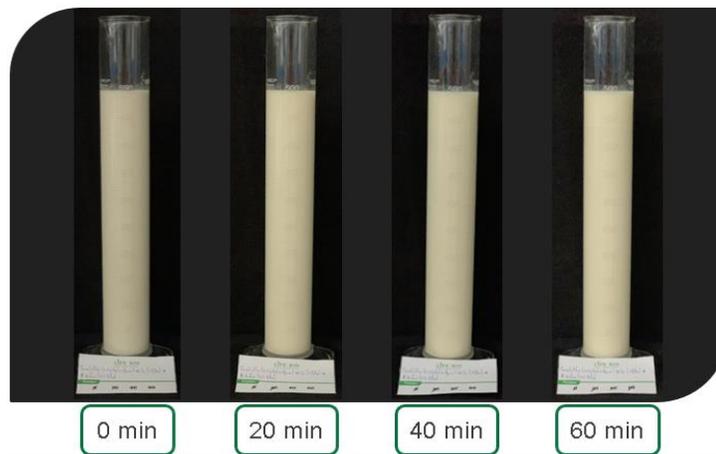
Anexo 32. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 21.



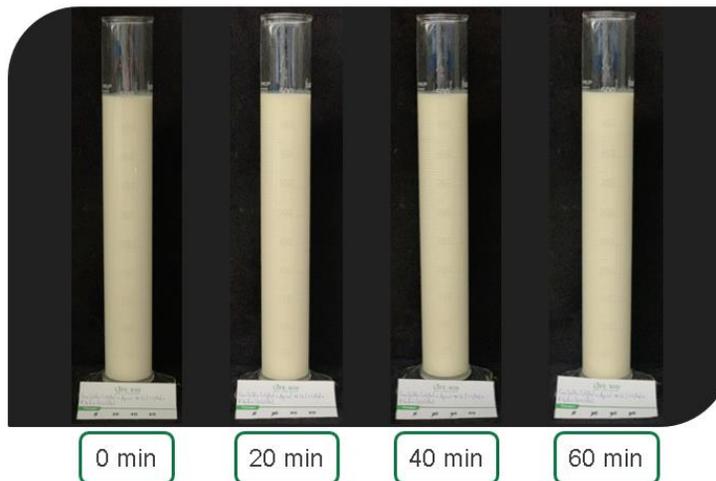
Anexo 33. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 22.



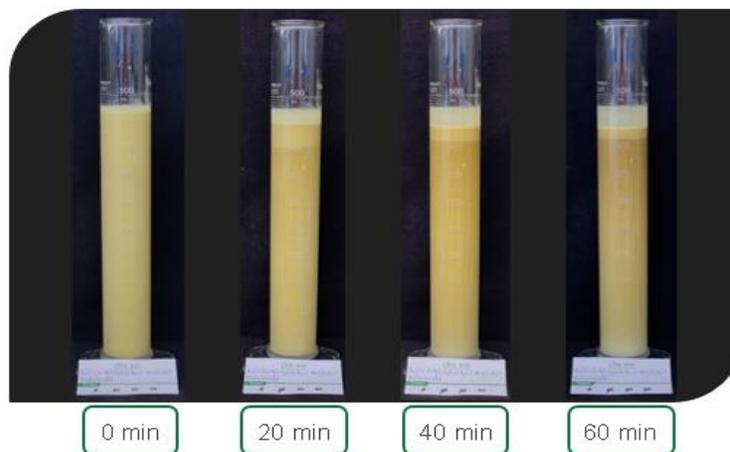
Anexo 34. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 23.



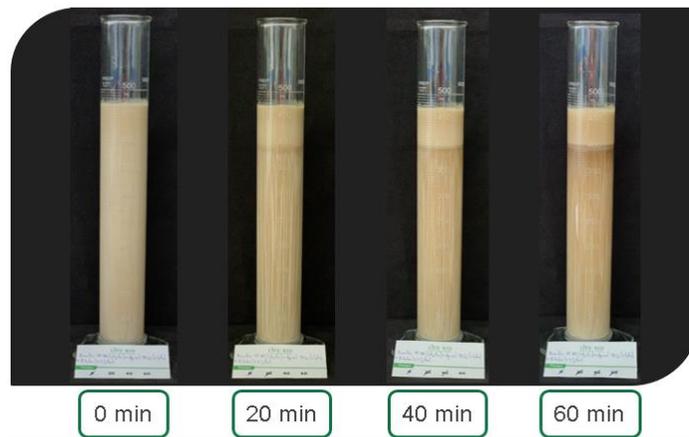
Anexo 35. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 24.



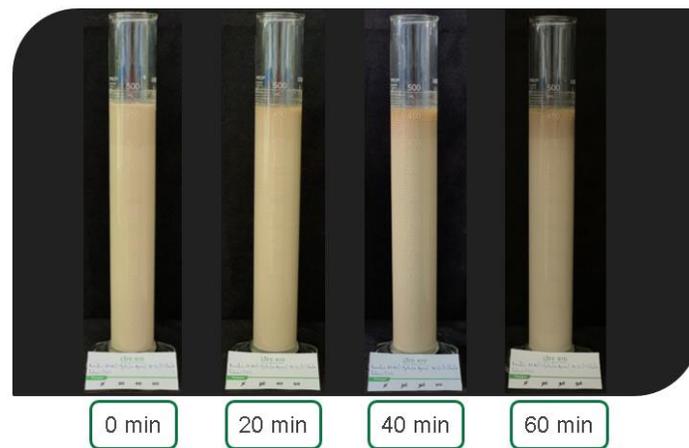
Anexo 36. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 26.



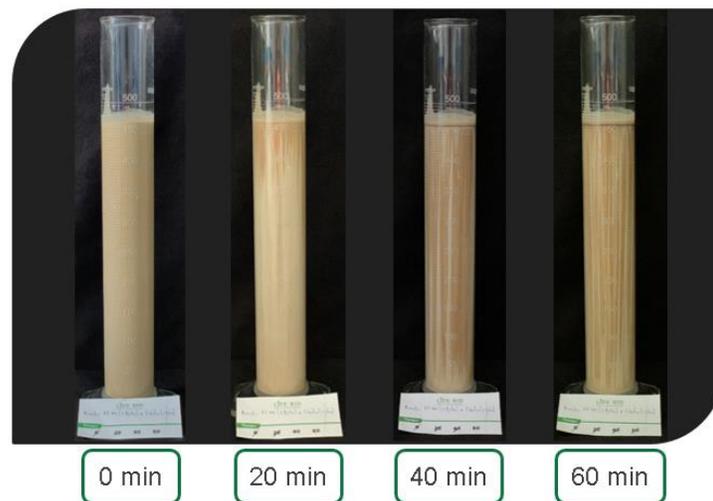
Anexo 37. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 27.



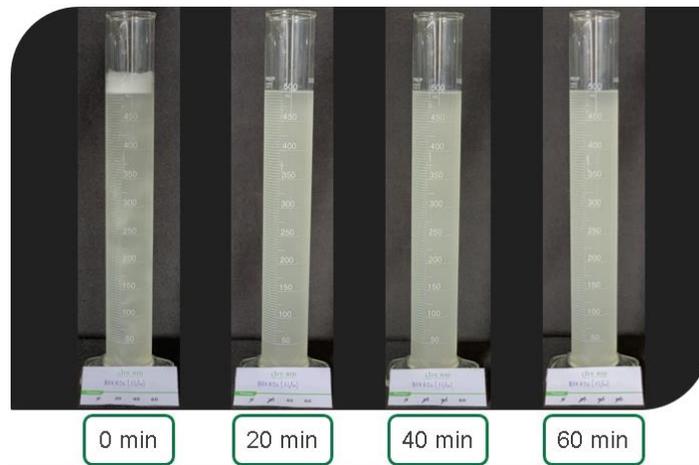
Anexo 38. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 28.



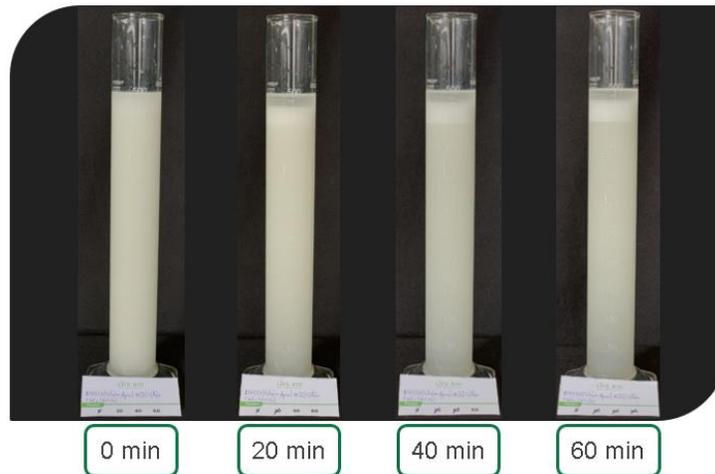
Anexo 39. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 29.



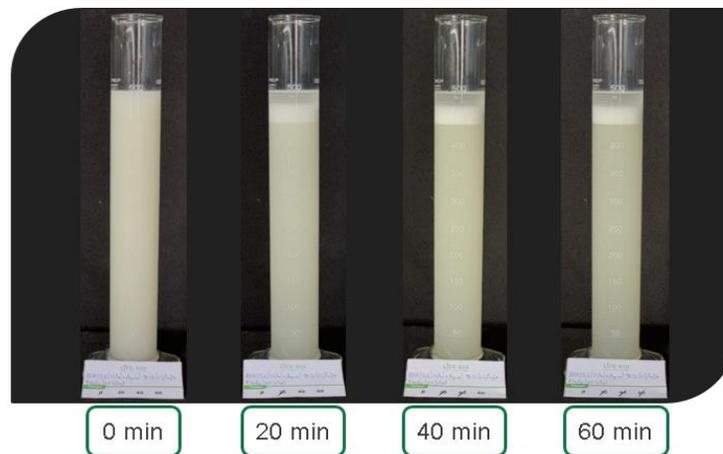
Anexo 40. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 30.



Anexo 41. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 32.



Anexo 42. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 33.



Anexo 43. Capturas fotográficas del periodo de evaluación a la mezcla 34.

