



ESCUELA DE DOCTORADO  
INTERNACIONAL DE LA USC

HENRY DEMETRIO  
RIVERA CARRILLO

Tesis doctoral

Efecto de la aplicación vía foliar  
de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ )  
sobre la incidencia y severidad  
de la Roya (*Hemileia vastatrix*  
Berk. & Broome) en el cultivo  
de café (*Coffea arabica* L.)

Santiago de Compostela, 2024



## TESIS DE DOCTORADO

# **Efecto de la aplicación vía foliar de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) sobre la incidencia y severidad de la Roya (*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome) en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.)**

Autor

Henry Demetrio Rivera Carrillo

Director: Cristina Cabaleiro Sobrino

Tutora: Cristina Cabaleiro Sobrino

PROGRAMA DE DOCTORADO EN AGRICULTURA Y MEDIO AMBIENTE

SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO

2024



## **DEDICATORIA**

A Dios por los dones y bendiciones que me da.

A mi madre Ana Elvira Carrillo Ramírez, por darme la vida y sus ejemplos para alcanzar esta meta.

A mi esposa Ingrid Rosibel Hernández Godoy, luz de mi vida, quien en estos años de matrimonio me ha apoyado e inspirado.

A mis hijos Mariana Mishel, Andrea Mariana y Bryan Josué, por ser mi razón de vivir y el mayor orgullo de mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

A: Doctora Cristina Cabaleiro Sobrino, profesora titular del Departamento de Producción Vegetal y Proyectos de Ingeniería de la Universidad Santiago de Compostela (USC), por su apoyo como Directora y Tutora. Además, por sus consejos, orientación, valiosas sugerencias, aporte de su tiempo, paciencia y ayuda económica para la investigación durante todo el programa de doctorado

A: Ing. Daniel Martínez García, Coordinador, Ing. Carmen Regina Álvarez Hernández, Especialista en Calidad, Investigación y Desarrollo por el apoyo e Msc. Carlos René Yucuté Miranda especialista en plantas, del laboratorio de la Asociación Nacional de Café (ANALAB-ANACAFE) por la información, autorización y provisión de los recursos necesarios para el procesamiento de las muestras durante la ejecución del presente trabajo de investigación.

A: Doctor Gustavo Mora Aguilera, Coordinador del programa de Postgrado en Fitosanidad del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo Laboratorio de Análisis de Riesgo Epidemiológico Fitosanitario (LANREF) e Ing. Gerardo Acevedo del departamento de Epidemiología-Cuantitativa del Laboratorio de Análisis de Riesgo Epidemiológico Fitosanitario (CP-LANREF), por su valioso apoyo durante la pasantía realizada en la Universidad del Colegio de Postgraduados de México (COLPOS).

A: Doctor Agustín Merino, Coordinador del Programa de Doctorado en Agricultura y Medio Ambiente de la Universidad Santiago de Compostela (USC), por su apoyo y orientación durante el programa de doctorado.

A: Ing. Roni Osman Carrillo Aguilar, Coordinador de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Rafael Landívar (URL), mi mentor académico por el apoyo incondicional a lo largo de mi formación profesional.

# **Efecto de la aplicación vía foliar de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) sobre la incidencia y severidad de la Roya (*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome) en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.)**

## **RESUMEN**

La roya (*Hemileia vastratix*) es el hongo fitopatógeno clave en el cultivo de café; únicamente se ha logrado un buen control con aplicaciones de triazoles (epoxiconazole) ante los cuales ya ha generado resistencia. En la búsqueda de alternativas sostenibles de protección frente a la roya, el objetivo principal de esta investigación (2019-2021) fue estudiar si las aplicaciones vía foliar de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) ejercen un efecto protector frente a la roya. Los ensayos se hicieron en Santa Rosa (Guatemala) en una parcela de café en cultivo tradicional de la variedad susceptible Catuaí, con 3.500 plantas·ha<sup>-1</sup>. Se evaluaron dos concentraciones de SiO<sub>2</sub> (0,5 y 1 kg·ha<sup>-1</sup>) (Si05, Si1) frente a 2 kg·ha<sup>-1</sup> de oxiclورو de cobre (Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl) (Cu2) y un testigo sin tratar; en 2020 se incluyó como estándar el fungicida sistémico epoxiconazole (Epxi) a media dosis (250 mL·ha<sup>-1</sup>) + Si05 y en 2021 se añadieron combinaciones de SiO<sub>2</sub> con Cu y con Epxi a media dosis. Se evaluó incidencia, severidad, defoliación, contenido de silicio en hoja y estímulo de producción de fenoles. Los resultados de los tres años indican que, a pesar de no haber detectado acumulación de silicio ni estimulación de producción de fenoles totales (defensa de la planta), el Silicio sí ejerció un efecto preventivo superior al cobre y en muchos casos sin diferencias significativas en incidencia y severidad frente a Epxi. Los tres años las plantas tratadas con Si05 tuvieron menor incidencia, severidad y defoliación que con Si1 y siempre menor que con Cu. Las curvas de progreso de la incidencia y la severidad de la roya en esta localización de Guatemala, siguen mayoritariamente el modelo epidemiológico Gompertz, que predice bien el desarrollo de síntomas en ausencia de control. Los tratamientos aplicados tienden a linealizar la CPE. Los tratamientos con Si05, Epxi y la mezcla de ambos, presentaron los mejores promedios en días de protección, costos más bajos de control y mejores rentabilidades. No hubo diferencias significativas en el peso de cosecha de café, pero el SiO<sub>2</sub> parece mejorar la calidad de taza por tener ligeramente menor acidez. Todo ello hace del SiO<sub>2</sub> una sustancia prometedora dentro de los programas de gestión integrada y de prevención de la aparición de razas de *H. vastratix* resistentes a fungicidas.



**Palabras clave:** *Hemileia vastatrix*, café, dióxido de silicio, costes-control, epidemiología

# Effect of foliar application of silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) on the incidence and severity of rust (*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome) in coffee crops (*Coffea arabica* L.)

## SUMMARY

Rust (*Hemileia vastratix*) is the key phytopathogenic fungus in coffee cultivation; good control has only been achieved with applications of triazoles (epoxiconazole) to which resistance has already been generated. In the search for sustainable alternatives for protection against rust, the main objective of this research (2019-2021) was to study whether foliar applications of silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) exert a protective effect against rust. The trials were carried out in Santa Rosa (Guatemala) in a coffee plot under traditional cultivation of the susceptible variety Catuaí, with 3,500 plants·ha<sup>-1</sup>. Two concentrations of SiO<sub>2</sub> (0,5 and 1 kg·ha<sup>-1</sup>) (Si05, Si1) were evaluated against 2 kg·ha<sup>-1</sup> of copper oxychloride (Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl) (Cu<sub>2</sub>) and an untreated control; in 2020, the systemic fungicide epoxiconazole (Epoxi) at a half dose (250 mL·ha<sup>-1</sup>) + Si05 was included as standard and in 2021 combinations of SiO<sub>2</sub> with Cu and with Epoxi were added at half dose. Incidence, severity, defoliation, leaf silicon content and stimulation of phenol production were evaluated. The results of the three years indicate that, despite not having detected silicon accumulation or stimulation of total phenol production (plant defense), Silicon did exert a preventive effect superior to copper and in many cases without significant differences in incidence and severity versus Epoxi. In the three years, plants treated with Si05 had lower incidence, severity and defoliation than with Si1 and always lower than with Cu. The progress curves of the incidence and severity of rust in this location in Guatemala mostly follow the Gompertz epidemiological model, which predicts well the development of symptoms in the absence of control. The treatments applied tend to linearize the CPE. Treatments with Si05, Epoxi and the mixture of both, presented the best averages in days of protection, lower control costs and better profitability. There were no significant differences in coffee harvest weight, but SiO<sub>2</sub> seems to improve cup quality by having slightly lower acidity. All of this makes SiO<sub>2</sub> a promising substance within integrated management programs and prevention of the emergence of fungicide-resistant races of *H. vastratix*.

**Keywords:** *Hemileia vastatrix*, coffee, silicon dioxide, total phenols, control-costs, epidemiology

# Efecto da aplicación foliar de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) sobre a incidencia e a gravidade da ferruxe (*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome) en cultivos de café (*Coffea arabica* L.)

## RESUMO

A ferruxe (*Hemileia vastratrix*) é o fungo fitopatóxeno clave no cultivo do café; só se conseguiu un bo control con aplicacións de triazoles (epoxiconazol) aos que xa se xerou resistencia. Na procura de alternativas sostibles de protección contra a ferruxe, o obxectivo principal desta investigación (2019-2021) foi estudar se as aplicacións foliares de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) exercen un efecto protector contra a ferruxe. Os ensaios realizáronse en Santa Rosa (Guatemala) nunha parcela de café en cultivo tradicional da variedade susceptible Catuaí, con 3.500 plantas·ha<sup>-1</sup>. Avaliáronse dúas concentracións de  $\text{SiO}_2$  (0,5 e 1 kg·ha<sup>-1</sup>) fronte a 2 kg·ha<sup>-1</sup> de oxiclورو de cobre ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ) (Cu) e un control sen tratar; en 2020 incluíuse como estándar o fungicida sistémico epoxiconazol (Epoxi) a media dose (250 mL·ha<sup>-1</sup>) +  $\text{SiO}_2$  0,5 kg·ha<sup>-1</sup> e en 2021 engadíronse combinacións de  $\text{SiO}_2$  con Cu e con Epoxi a media dose. Avaliáronse a incidencia, a gravidade, a defoliación, o contido de silicio da folla e a estimulación da produción de fenois. Os resultados dos tres anos indican que, a pesar de non ter detectado acumulación de silicio nin estimulación da produción total de fenois (defensa das plantas), o silicio sí exerceu un efecto preventivo superior ao cobre e en moitos casos sen diferenzas significativas de incidencia e gravidade fronte ao Epoxi. Nos tres anos, as plantas tratadas con Si05 tiveron menor incidencia, gravidade e defoliación que con Si1 e sempre menor que con Cu. As curvas de progreso da incidencia e gravidade da ferruxe neste lugar de Guatemala seguen na súa maioría o modelo epidemiolóxico de Gompertz, que predice ben o desenvolvemento dos síntomas en ausencia de control. Os tratamentos aplicados tenden a linealizar a CPE. Os tratamentos con Si05, Epoxi e a mestura de ambos, presentaron as mellores medias en días de protección, menores custos de control e mellor rendibilidade. Non houbo diferenzas significativas no peso da colleita do café, pero o  $\text{SiO}_2$  parece mellorar a calidade da cunca ao ter unha acidez lixeiramente menor. Todo isto fai que o  $\text{SiO}_2$  sexa unha substancia prometedora dentro dos programas de xestión integrada e de prevención da aparición de razas resistentes aos fungicidas de *H. vastratrix*.

**Palabras chave:** *Hemileia vastatrix*, café, dióxido de silicio, custos-control, epidemoloxía

## INDICE

RESUMEN.....	i
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. CULTIVO DE CAFÉ.....	1
1.1.1. Consumo de café en el mundo .....	2
1.1.2. Producción de café en Guatemala .....	2
1.2. LA ROYA DEL CAFÉ .....	3
1.2.1. Historia de la roya del café.....	3
1.2.2. <i>Hemileia vastatrix</i> .....	6
1.2.3. Ciclo biológico .....	8
1.2.4. Síntomas y daños de la roya del café .....	12
1.2.5. Condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de la roya.....	13
1.2.6. Epidemiología .....	15
1.2.7. Medidas de control .....	19
1.2.8. El silicio como alternativa al uso de fitosanitarios .....	26
2. JUSTIFICACIÓN.....	32
3. OBJETIVOS.....	34
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	34
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	34
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	35
4.1. LOCALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	35
4.2. HISTORIAL CLIMÁTICO EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN (2009-2018) .....	35
4.3. MATERIAL EXPERIMENTAL.....	37
4.3.1. Catuaí rojo. ....	37
4.3.2. Productos fitosanitarios .....	38
4.4. MÉTODOS .....	39
4.4.1. Diseño de los ensayos .....	39
4.4.2. Fase de campo .....	46
4.4.3. Estudio epidemiológico.....	48
4.4.4. Estudio económico .....	50
4.4.5. Muestreos de suelo y hojas.....	51
4.4.5.1. Determinaciones a nivel de campo.....	51
4.4.5.2. Determinaciones a nivel de laboratorio.....	53
4.4.6. Producción.....	54
4.4.7. Calidad .....	55
4.4.8. Análisis estadístico.....	56
5. RESULTADOS.....	57

5.1. RESULTADOS ENSAYO AÑO 2019 .....	57
5.1.1 Condiciones meteorológicas.....	57
5.1.2. Incidencia .....	57
5.1.3. Severidad.....	59
5.1.4. ABCPSE 2019.....	60
5.1.5. Defoliación .....	61
5.1.6. Contenido de silicio.....	62
5.1.7. Contenido de fenoles totales.....	63
5.2. RESULTADOS ENSAYO AÑO 2020 .....	64
5.2.1 Condiciones meteorológicas.....	64
5.2.2. Incidencia .....	64
5.2.3. Severidad.....	66
5.2.4. ABCPSE 2020.....	67
5.2.5. Defoliación .....	68
5.2.6. Contenido de silicio.....	69
5.2.7. Contenido de fenoles totales.....	70
5.2.8. Producción.....	70
5.2.9. Calidad .....	70
5.3. RESULTADOS ENSAYO AÑO 2021 .....	72
5.3.1. Condiciones meteorológicas .....	72
5.3.2. Incidencia .....	72
5.3.3. Severidad.....	74
5.3.4. Defoliación .....	75
5.3.5. ABCPSE 2021.....	76
5.3.6. ABCPSE 2019-2021. ....	78
5.3.7. Contenido de silicio.....	79
5.3.8. Contenido de fenoles totales.....	81
5.3.9. Producción.....	82
5.3.10. Calidad .....	84
5.3.11. Días control de los tratamientos en 2021. ....	84
5.3.12. Costo días control de los tratamientos.....	86
5.4. ESTUDIO EPIDEMIOLÓGICO.....	87
6. DISCUSIÓN .....	93
7. CONCLUSIONES .....	103
8. BIBLIOGRAFÍA.....	104
9. ANEXOS.....	120
9.1. DECLARACIONES: Uso de imágenes y derechos de publicación .....	120

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Exportación de café en Guatemala en miles de sacos de 60 kg .....	3
Figura 2. Mapa de diseminación de la <i>Hemileia vastatrix</i> a nivel mundial .....	5
Figura 3. Mapa de distribución de la <i>Hemileia vastatrix</i> en Centroamérica .....	5
Figura 4. Esporulación en el envés de la hoja y observación microscópica de uredosporas de <i>Hemileia vastatrix</i> .....	8
Figura 5. Germinación de teliosporas y basidiosporas de <i>Hemileia vastatrix</i> .....	8
Figura 6. Progreso etapas de infección de <i>Hemileia vastatrix</i> .....	12
Figura 7. A) Lesión inicial en el haz de la hoja. B) Inicio de producción de uredosporas en el envés y C) Lesión avanzada de roya del café.....	13
Figura 8. Datos climatológicos (1981-2010) en comparación con las temperaturas diarias máximas y mínimas (a) y las amplitudes térmicas (b) observadas en 2012.....	14
Figura 9. Anomalías de precipitación (mm) en 2012 en comparación con el clima (1981-2010) para Centroamérica .....	14
Figura 10. Progreso típico de la roya del café.....	16
Figura 11. Esquema de planación de café con diferentes tipos de sombra .....	22
Figura 12. Recopa con altura del corte 0,30 m.....	23
Figura 13. Fotografía al microscópico electrónico de barrido. A) Acumulación no se presenta en el testigo. B) Acumulación de silicio en xilema de plantas asperjadas con silicio .....	28
Figura 14. Ubicación del área de la evaluación.....	35
Figura 15. Diseño de la unidad experimental.....	39
Figura 16. Distribución de las unidades experimentales (año 2019).....	41
Figura 17. Distribución de las unidades experimentales (año 2020).....	43
Figura 18. Distribución de las unidades experimentales (año 2021).....	45
Figura 19. Estrato medio de la planta de café donde se seleccionaron las bandolas para monitorización de roya del café .....	46
Figura 20. Identificación de bandolas por planta para monitorización. ....	46
Figura 21. Escala de severidad Roya de Café .....	47
Figura 22. Grados de madurez del grano del café.....	55
Figura 23. Datos de precipitación (mm) y temperatura (°C) diarias en la segunda mitad de 2019 indicando fechas de evaluaciones y tratamientos en septiembre, octubre y noviembre.....	57
Figura 24. Incidencia (%) de roya ( $\pm$ et) en el ensayo de 2019.....	58
Figura 25. Desarrollo de la severidad (%) de roya ( $\pm$ et) en el ensayo de 2019.....	60
Figura 26. Área bajo de la curva del progreso de la severidad de la enfermedad ( $\pm$ et) en el ensayo de 2019.....	61
Figura 27. Evolución de la defoliación (%) causada por la roya ( $\pm$ et) en el ensayo de 2019. ...	62
Figura 28. Datos de precipitación (mm) y temperatura (°C) diarias en la segunda mitad de 2020 indicando fechas de evaluaciones y tratamientos en julio, agosto, septiembre y octubre.....	64
Figura 29. Evolución de la incidencia (%) de roya ( $\pm$ et) en el ensayo de 2020. ....	65
Figura 30. Evolución de la severidad (%) de roya ( $\pm$ et) en el ensayo de 2020. ....	66
Figura 31. Área bajo de la curva del progreso de la severidad de la enfermedad ( $\pm$ et) del año 2020.....	68
Figura 32. Defoliación (%) a causa de la roya ( $\pm$ et) en el ensayo del 2020.....	69
Figura 33. Curva de contenido del % de silicio en tejido vegetal (enero-diciembre 2020). ....	69
Figura 34. Rendimiento de grano maduro de café (kg·ha <sup>-1</sup> ) de los tratamientos del 2020.....	70

Figura 35. Datos de precipitación (mm) y temperatura (°C) diarias en la segunda mitad de 2021 indicando fechas de evaluaciones y tratamientos en julio, agosto, septiembre y octubre (2021). .....	72
Figura 36. Incidencia (%) de roya ( $\pm$ et) en el ensayo de 2021.....	74
Figura 37. Evolución de la severidad (%) a causa de la roya ( $\pm$ et) en el ensayo del 2021.....	75
Figura 38. Defoliación (%) a causa de la roya ( $\pm$ et) en el ensayo del año 2021. ....	76
Figura 39. Área bajo de la curva del progreso de severidad de la enfermedad ( $\pm$ et) 2021. ....	78
Figura 40. Área bajo de la curva del progreso de severidad de la enfermedad ( $\pm$ et) 2019-2021. .....	79
Figura 41. Porcentaje promedio de contenido de silicio en tejido vegetal ( $\pm$ et) de los años 2019-2021.....	81
Figura 42. Curva de contenido de fenoles totales en tejido vegetal con muestreos cada 7 días (julio-octubre 2021). ....	81
Figura 43. Contenido medio de fenoles totales ( $\pm$ et) para el periodo 2019-2021. ....	82
Figura 44. Rendimiento promedio de grano maduro de café ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) ( $\pm$ et) en las parcelas sometidas a los distintos tratamientos en 2021. ....	83
Figura 45. Días control de los tratamientos ( $\pm$ et) en el ensayo de 2021.....	85
Figura 46. CPE para incidencia y severidad observadas (Ob) para el testigo los tres años y CPE con datos esperados (Es) según el modelo epidemiológico que mejor se ajustó a los datos observados (tabla 64). Precipitaciones mensuales ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$ ). ....	88
Figura 47. CPE semanal para incidencia en 2021 en base a datos observados (Ob) para los datos semanales (tabla 65), sin tratamientos combinados y Curvas con datos esperados (Es) según el modelo epidemiológico que mejor se ajustó a la CPE. A partir de la línea discontinua vertical, predicción para las semanas 20 a 24. ....	90
Figura 48. CPE semanal para severidad en 2021 en base a datos observados, Ob y curvas con datos esperados (Es) según el modelo epidemiológico que mejor se ajustó a la CPE. (tabla 66). A partir de la línea discontinua vertical, predicción para las semanas 20 a 24. ....	92

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales regiones productoras de café (2023-2024) en miles de sacos de 60 KG .....	1
Tabla 2. Detección de <i>H. vastatrix</i> a nivel mundial .....	4
Tabla 3. Producción de grano de café y pérdidas ocasionadas por la roya (2012-2013) .....	6
Tabla 4. Característica de los materiales con resistencia genética a la roya del café.....	25
Tabla 5. Historial de temperatura diaria promedio (°C) del 2009 al 2018. ....	36
Tabla 6. Historial de precipitación mensual (mm) del 2009 al 2018. ....	36
Tabla 7. Historial de humedad relativa diaria promedio (%) del 2009 al 2018. ....	37
Tabla 8. Descripción de los tratamientos evaluados. ....	39
Tabla 9. Datos meteorológicos medios de la estación meteorológica Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa (año 2019) .....	40
Tabla 10. Tratamientos y dosis evaluadas en 2019. ....	40
Tabla 11. Datos meteorológicos medios de la estación meteorológica Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa (año 2020) .....	42
Tabla 12. Tratamientos y dosis evaluadas en 2020.....	42
Tabla 13. Datos meteorológicos medios de la estación meteorológica Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa (año 2021) .....	44
Tabla 14. Tratamientos y dosis evaluadas en 2021.....	44
Tabla 15. Ecuaciones para la transformación de los datos básicos correspondientes a cada uno de los modelos epidemiológicos temporales.....	49
Tabla 16. Resumen de datos utilizados para el ajuste de modelos epidemiológicos para el testigo en cada año (datos de las tablas 20, 22, 31, 33, 42 y 44 de resultados).....	49
Tabla 17. Valores de Severidad (S) e Incidencia (I) en 2021 con datos de los muestreos entre julio y noviembre para los distintos tratamientos: mensuales (5 datos), quincenales (10 datos) y semanales (19 datos). ....	50
Tabla 18. Escala de clasificación del perfil de taza de grano de café. ....	55
Tabla 19. Análisis de varianza para incidencia de roya en el ensayo del año 2019. ....	58
Tabla 20. Valores medios de incidencia de roya ( $\pm$ et) en el ensayo del año 2019.....	58
Tabla 21. Análisis de varianza de los datos de severidad en el ensayo del año 2019. ....	59
Tabla 22. Valores medios de severidad ( $\pm$ et) de los tratamientos en el ensayo del 2019. ....	59
Tabla 23. Análisis de varianza de los datos de área bajo la curva del progreso de severidad de la enfermedad en el ensayo del año 2019.....	60
Tabla 24. Valores medios de ABCPSE ( $\pm$ et) de los tratamientos en el año 2019.....	60
Tabla 25. Análisis de varianza de los datos de defoliación en el ensayo del año 2019.....	61
Tabla 26. Valores medios de defoliación ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2019.....	61
Tabla 27. Contenido de silicio en el suelo (%) pre-aplicación de los tratamientos del año 2019. ....	62
Tabla 28. Contenido de silicio en de hojas de café (%) de plantas tratadas con Cu y Si y en el testigo sin tratar del año 2019. ....	63
Tabla 29. Contenido de fenoles totales en hojas de café (mg de ácido gálico/g de tejido vegetal), año 2019.....	63
Tabla 30. Análisis de varianza para los datos de incidencia en el ensayo del año 2020. ....	65
Tabla 31. Valores medios de incidencia ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2020. ....	65
Tabla 32. Análisis de varianza para los datos de severidad en el ensayo del año 2020. ....	66
Tabla 33. Valores medios de severidad ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2020. ....	66
Tabla 34. Datos de salida del ANOVA para el área bajo la curva de progreso de severidad de la enfermedad del año 2020. ....	67
Tabla 35. Valores medios de ABCPSE ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2020.....	67

Tabla 36. Análisis de varianza para los datos de defoliación en el ensayo del 2020. ....	68
Tabla 37. Valores medios de defoliación en porcentaje ( $\pm$ et) de los tratamientos. ....	68
Tabla 38. Contenido de fenoles totales en hojas de café (mg de ácido gálico/g de tejido vegetal), presentes en el año 2020. ....	70
Tabla 39. Resultados del análisis organoléptico del grano de café (2020), según la escala de la Specialty Coffee Association of America (SCAA). ....	71
Tabla 40. Características de perfil de taza promedio 2020. ....	71
Tabla 41. Análisis de varianza para los datos de incidencia en el ensayo del año 2021. ....	73
Tabla 42. Valores medios de incidencia ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2021. ....	73
Tabla 43. Análisis de varianza para los datos de severidad en el ensayo del año 2021. ....	74
Tabla 44. Valores medios de severidad ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2021. ....	74
Tabla 45. Análisis de varianza para los datos de defoliación en el ensayo del 2021. ....	75
Tabla 46. Valores medios de defoliación ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2021. ....	76
Tabla 47. Análisis de varianza para los datos de área bajo la curva de progreso de severidad de la enfermedad en el ensayo de 2021. ....	77
Tabla 48. Valores medios de ABCPSE ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2021. ....	77
Tabla 49. Análisis de varianza para los datos de área bajo la curva de progreso de severidad de la enfermedad en el ensayo para los 3 años (2019-2021). ....	78
Tabla 50. Valores medios de ABCPSE ( $\pm$ et) de los tratamientos del 2019-2021. ....	78
Tabla 51. Porcentaje del contenido de silicio en el tejido vegetal en hojas de café en el de parcelas sometidas a los distintos tratamientos en 2021. ....	79
Tabla 52. Análisis de varianza para los datos del contenido de silicio en tejido vegetal en el ensayo para los 3 años (2019-2021). ....	80
Tabla 53. Valores medios de contenido de silicio ( $\pm$ et) de los tratamientos (2019-2021). ....	80
Tabla 54. Análisis del contenido de fenoles totales (mg ácido gálico) en el ensayo para los 3 años (2019-2021). ....	82
Tabla 56. Análisis de varianza para los datos de producción en el ensayo del 2021. ....	83
Tabla 57. Valores de producción ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\pm$ et) de los tratamientos del año 2021. ....	83
Tabla 60. Análisis de varianza para los días control en el ensayo de 2021. ....	85
Tabla 61. Valores medios de los días control ( $\pm$ et) de los tratamientos en 2021. ....	85
Tabla 62. Análisis del costo sobre el promedio de días control en el ensayo del 2021. ....	86
Tabla 63. Relación beneficio costo y rentabilidad de los tratamientos de control de roya para el año 2021. ....	87
Tabla 64. Datos de los modelos epidemiológicos que mejor se ajustan a las CPE (incidencia y severidad) sin intervención (T) en los tres años de estudio. Porcentaje final de incidencia o severidad observada (Ob) y esperada (Es). ....	87
Tabla 65. Selección de modelos epidemiológico que mejor se ajustan a las CP de la incidencia de la roya a partir de muestreos mensuales (m), quincenales (q) o semanales (s), para testigo y los tratamientos realizados en 2021. Valores de incidencia observados (Ob) y esperados (Es) al final del periodo de evaluación. ....	89
Tabla 66. Selección del modelo epidemiológico que mejor se ajusta a las CPE para Severidad de la roya a partir de muestreos mensuales (m), quincenales (q) o semanales (s), para el Testigo y todos los tratamientos realizados en 2021. Valores de severidad observados (ob) y esperados (es) al final del periodo de evaluación. ....	91

## ABREVIATURAS

ABCPSE:	Área bajo la curva del progreso de severidad de la enfermedad	Kg:	kilogramo
ANACAFE:	Asociación Nacional del Café	LIPRONAT:	Laboratorio de investigación de productos naturales
ANOVA:	Análisis de varianza	MLG:	Modelo Lineal General
CBC:	Concentración base curva	mm:	milímetros
CP:	Curva de progreso	MOCCA:	Proyecto Maximizando Oportunidades en Café y Cacao en las Américas
CPE:	Curva de progreso de la enfermedad	MSNM:	Metros sobre el nivel del mar
Cu1:	Oxicloruro de cobre 1 kg.ha <sup>-1</sup>	OES:	Optical emission spectrometry
Cu2:	Oxicloruro de cobre 2 kg.ha <sup>-1</sup>	PIB:	Producto interno bruto
DC:	Días control	RBC:	Relación beneficio costo
Epoxi:	Epoxiconazole	SCAA:	Specialty coffee association of américa
FAO:	Food and agriculture organization	Si:	Silicio
FRAC:	Fungicide resistance action community	Si05:	Dióxido de silicio 0,5 kg.ha <sup>-1</sup>
FT:	Fenoles totales	Si1:	Dióxido de silicio 1 kg.ha <sup>-1</sup>
Ha:	Hectárea	SPSS:	Statistical package for social sciences
HCL:	Hydrochloric	USAC:	Universidad de san carlos de Guatemala
HF:	Hydrofluoric	WCR:	Word coffee research
IAC:	Instituto agronómico	WPR:	World population review
ICO:	International coffee organization		
ICP:	Inductively coupled plasma		
INSIVUMEH	Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología		

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. CULTIVO DE CAFÉ

El café es el segundo producto básico más exportado del mundo después del petróleo, cultivándose en más de 70 países tropicales (World Population Review-WPR, 2022), convirtiéndose en el producto tropical más comercializado (80% de la producción mundial), según la Food and Agriculture Organization-FAO, (2021).

Las exportaciones mundiales de café ascendieron a 12,17 millones de sacos de 60 kg en diciembre de 2023, en comparación con 10,71 millones en diciembre de 2022. Las exportaciones en los primeros tres meses del año cafetero 2023/24 (de octubre a diciembre de 2023) aumentaron un 6,8% a 32,42 millones de sacos en comparación con 30,35 millones en el mismo período en 2022/23 (International Coffee Organization-ICO, 2024).

Según la ICO (2024), la producción mundial de café aumentó un 0,1 % hasta los 168,2 millones de sacos en el año cafetero 2022/23. La tasa de crecimiento estancada oculta los tremendos cambios a nivel regional; el sector del café está claramente dividido entre la expansión del continente americano y la contracción observada en el resto del mundo. De cara al futuro, se espera que la producción para el año cafetero 2023/24 se incremente un 5,8 % hasta los 178,0 millones de sacos, con un aumento de la producción de los Arabica hasta los 102,2 millones de sacos y de los Robusta hasta los 75,8 millones de sacos.

**Tabla 1.** Principales regiones productoras de café (2023-2024) en miles de sacos de 60 kg (Elaboración propia con datos de ICO, 2023).

Región	Producción	Ranking
América del Sur	89,30	1
Asia y Oceanía	49,90	2
África	20,10	3
Caribe, Centro América y México	18,70	4

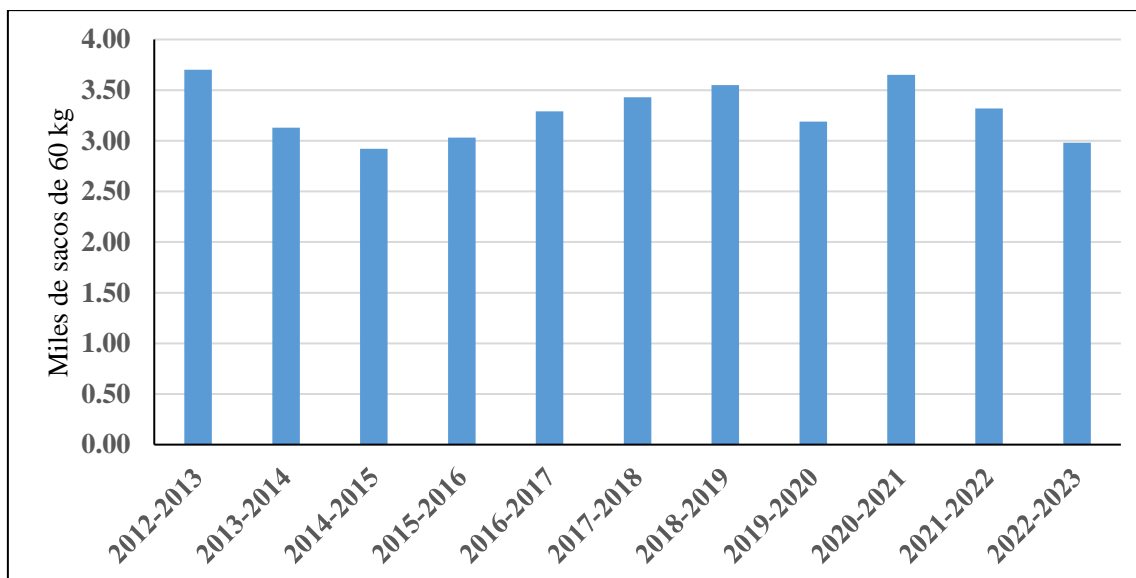
Los principales países productores de café son Brasil con 58,2 miles de sacos de 60 kg (37,4%), Vietnam con 30,5 (17,1%) y Colombia con 14,1 (8,4%), mientras que la Unión Europea, Asia, Oceanía y Norteamérica son los principales mercados de consumo e importación a nivel mundial (ICO, 2023). De la región centroamericana, Honduras es actualmente el país que más café produce 5,9 miles de sacos de 60 kg (3,6%) (Peralta *et al.*, 2023), seguido por Guatemala con 2,98 (1,82%), que se ubica en el puesto 11 a nivel mundial (ANACAFE, 2023).

### ***1.1.1. Consumo de café en el mundo***

El café es una de las bebidas más consumidas en el mundo y uno de los productos básicos más comercializados a nivel mundial (FAO, 2021). Las perspectivas del consumo mundial de café para el año cafetero 2023/24 se enmarcan en términos generales en el supuesto de que la economía mundial seguirá creciendo por encima del 3% y que la industria responderá a la gran reducción de existencias, lo que se reflejará positivamente en consumo aparente. Como resultado, se espera que el consumo mundial de café crezca en 2,2% a 177 millones de sacos, siendo los países no productores los mayores contribuidores al aumento global. El consumo de café en este grupo de países debería crecer un 2,1%. Como resultado, se espera que el mercado mundial del café tenga un superávit de 1 millón de sacos en año cafetalero 2023/24 (ICO, 2023).

### ***1.1.2. Producción de café en Guatemala***

El café constituye una de las actividades económicas más importantes para Guatemala, según la Asociación Nacional del Café, este cultivo ocupa el segundo lugar entre los principales productos de exportación, con un total de 2,8 millones de sacos de 60 kg para la cosecha 2022-2023, los cuales representaron ingresos equivalentes a U\$ 944,37 millones y una participación porcentual del 3,5% del producto interno bruto (PIB) de los principales productos de exportación del país. En la figura 1, se presentan los datos de las exportaciones de café para Guatemala, según la Asociación Nacional del café.



**Figura 1.** Exportación de café en Guatemala en miles de sacos de 60 kg (Elaboración propia con información de ANACAFE, 2023).

En Guatemala la principal especie cultivada es *Coffea arabica* L. catalogada de alta calidad en el mercado internacional pero sensible a la mancha de hierro (*Cercospora/Mycosphaerella coffeicola*), antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*), ojo de gallo (*Mycena citricolor*); y la roya del Café (*Hemileia vastatrix*), catalogada por la Asociación Nacional del Café (ANACAFE) como epidemia desde 2010.

## 1.2. LA ROYÁ DEL CAFÉ

### 1.2.1. Historia de la roya del café

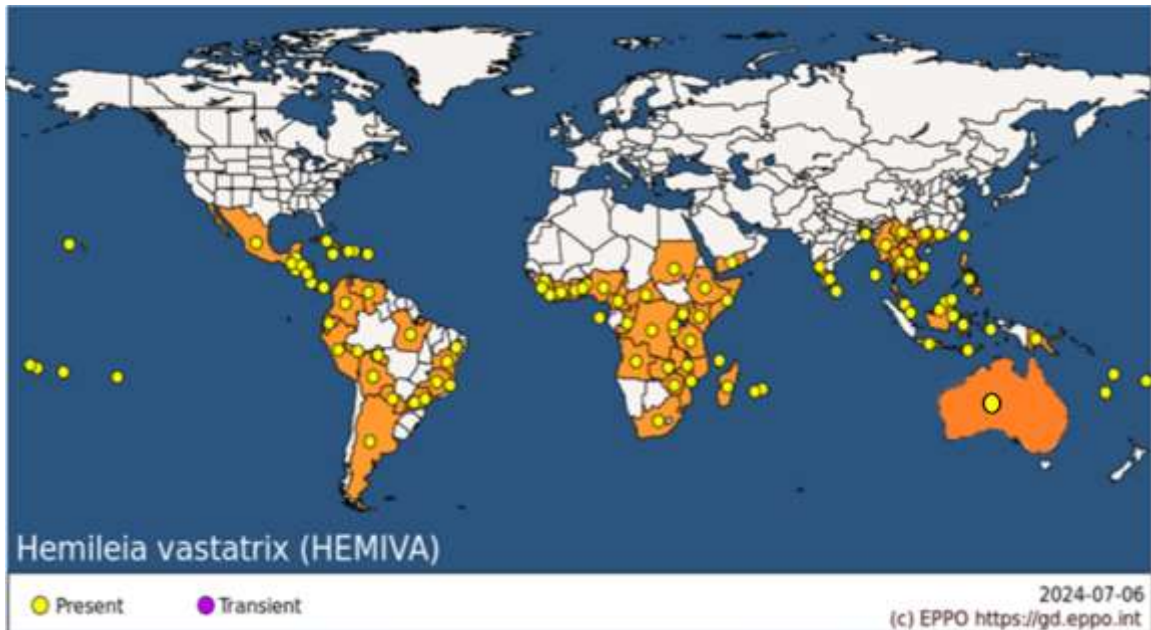
La roya del café, causada por *H. vastatrix*, es una de las principales enfermedades de los cafetos en América Latina (Avelino *et al.*, 2006) y una de las enfermedades más graves que ha afectado a la industria cafetalera mundial. En el siglo XIX, devastó plantaciones de café en el Viejo Mundo y redujo drásticamente la producción de café arábica en África, Asia y el pacífico dando lugar al traslado de la mayoría de la producción mundial a América. La roya se detectó por primera vez en las Américas en la década de 1970 en el estado de Bahía, Brasil (McCook, 2008); la epidemia se ha ido extendiendo por todos los países productores y, en menos de veinte años después de su llegada a Brasil, la roya anaranjada se hizo presente en todos los países latinoamericanos productores de café (Avelino y Rivas, 2013).

Aunque el centro de origen de la roya radica en África (Kenia) en el año 1861, fue en Asia (Ceilán, hoy Sri Lanka) en el año 1869 es donde se reportó por primera vez como epidemia (McCook, 2006). Entre los años 1870-1970, la enfermedad se difundió en todas las zonas cafeteras de Asia, África, y el Pacífico, con impacto variable (McCook, 2009); en la tabla 2 se presenta el resumen del comportamiento de distribución de la roya del café a nivel mundial.

**Tabla 2.** Detección de *H. vastatrix* a nivel mundial. (Elaboración propia con información de (Schieber y Zentmeyer, 1984; McCook, 2009; De Melo y Astorga, 2015 y Koutouleas et al., 2023).

Año	País	Año	País
1861	<b>Este de África:</b> Kenia (en la región de Lago Victoria)	1940	Mozambique
1869	<b>Sur de Asia:</b> Sri Lanka (Ceylán)	1942	China
1870	India y Pakistán	1946	Zanzibar
1878	Mauricio	1951	<b>Oeste de África:</b> Costa de Marfil
1878	<b>Sur África, Oceanía:</b> Fiji y Australia, <b>Sur Este de Asia:</b> Indonesia, Java y Sumantra	1970	<b>América del Sur:</b> Brasil (Estado de Bahía)
1880	Isla Reunión	1976	Ecuador
1886	Madagascar	1976	<b>Centro América:</b> Nicaragua (entre San Marcos y Masatepe) y Panamá
1890	Filipinas, <b>Este de Asia:</b> Vietnam	1978	Perú y Bolivia
1892	Papúa Nueva Guinea	1979	El Salvador
1894	Uganda y Samoa	1980	Honduras y Guatemala
1910	Nueva Celedonia	1981	<b>Norte América:</b> México
1912	Kenia	1983	Colombia y Costa Rica
1930	Angola	2020	Hawái

En 1976, la roya saltó de Brasil a Centroamérica (Nicaragua), pero no hubo ataques severos; de hecho, ni siquiera se cuantificó la reducción en la producción (Cristancho *et al.*, 2012). No está claro cómo llegó a Nicaragua, probablemente a través de material vegetal desde Brasil porque, aunque muchas de estas variedades adaptadas pasaron por el control de instituciones públicas o privadas, en esta época se difundían muchas innovaciones por medio de traslados privados de caficultores individuales que raras veces pasaron por las mismas inspecciones fitosanitarias que los traslados oficiales (McCook, 2009). En la figura 2, se presenta el mapa de diseminación de la *Hemileia vastatrix* a nivel mundial según Arneson (2000) y en la figura 3, el mapa de distribución de la enfermedad en Centroamérica, según La Organización Europea y Mediterránea para la Protección de Plantas-EPPO (2024).



**Figura 2.** Mapa de distribución de la *Hemileia vastatrix* a nivel mundial (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: EPPO, 2024. Modificada con información de Koutouleas *et al.*, 2023).



**Figura 3.** Mapa de distribución y de la *Hemileia vastatrix* y razas presentes en Centroamérica (Elaboración propia con información de Schieber y Zentmeyer, 1984; McCook, 2009; De Melo y Astorga, 2015; Quispe *et al.*, 2017 y Koutouleas *et al.*, 2023).

2013, la enfermedad causó grandes pérdidas, reducción de los ingresos a los productores y desempleo (De Melo y Astorga, 2015). En la tabla 3, se presentan los datos de reducción de las cosechas y las pérdidas ocasionadas por la roya durante la temporada 2012-2013.

**Tabla 3.** Pérdidas de producción ocasionadas por la roya 2012-2013. (Elaboración propia con información de Avelino y Rivas, 2013).

País	Reducción de cosecha del año 2012-2013 (%)	Estado de emergencia declarado
Honduras	31	Sí
Guatemala	15	Sí
Costa Rica	5	Sí
Nicaragua	3	No
El Salvador	23	No

Generalmente la roya ocasiona la pérdida de hasta el 50% de las hojas (Avelino *et al.*, 2004) y 30% del rendimiento en algunas variedades de *C. arabica*, lo que significa un gran impacto económico a nivel mundial (Barka *et al.*, 2017). El hongo *H. vastatrix*, ataca las hojas, las ramas y hasta los frutos del café, en particular en las variedades de la especie *C. arabica*, y se considera el patógeno más destructivo y de mayor importancia económica para el sector a nivel mundial.

### 1.2.2. *Hemileia vastatrix*

El género *Hemileia* es miembro del filo Basidiomycota, clase Pucciniomycetes, orden Pucciniales (hongos de la roya). Comprende 42 especies que se encuentran principalmente en regiones tropicales a subtropicales de África y Asia, principalmente en plantas Rubiaceae y Apocynaceae no cultivadas (Ritschel, 2005).

Aunque exhibe un polimorfismo genético limitado, el enorme genoma de *H. vastatrix* (c. 797 Mbp) oculta una gran diversidad patológica, con más de 50 razas fisiológicas (Talhinhas *et al.*, 2017).

La aparición de nuevas razas fisiológicas de la roya del café puede surgir por diferentes medios que incluyen el proceso de selección natural que actúa sobre poblaciones que ha estado expuestas a un mayor despliegue de cultivares individuales y

resistentes o el resultado de nuevas combinaciones de genes de avirulencia a través de la reproducción sexual (Burdon *et al.*, 2016).

Debido a esta capacidad de rápida adaptación a nuevos cultivares de café se ha llegado a considerar a *H. vastatrix* como un patógeno de alto potencial evolutivo cuyas evidencias de variación vienen siendo estudiadas desde 1930, en los cuales se ha reportado la presencia de la raza II en casi todos los casos (Quispe *et al.*, 2017).

**Clasificación taxonómica.** Según la European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO, 2024), la roya del café se clasifica de la siguiente manera:

Reino: Fungi

División: Basidiomycota

Clase: Pucciniomycotina

Sub Clase: Pucciniomycetes

Orden: Puccinales/Uredinales

Familia: Chaconiaceae

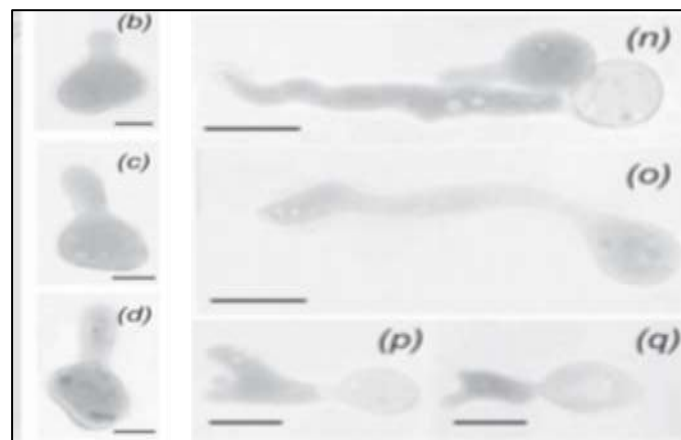
Género: *Hemileia*

Especie: *H. vastatrix*

**Características morfológicas.** Este hongo presenta ocasionalmente teliosporas y basidiosporas pero su principal forma de multiplicación son las uredosporas (Kolmer *et al.*, 2009). Las uredosporas de *H. vastatrix* son reniformes, de  $28\text{--}36 \times 18\text{--}28$   $\mu\text{m}$  y poseen una pared hialina, fuertemente verrugosa en la cara convexa, lisa en la cara recta o cóncava y de 1  $\mu\text{m}$  de espesor; las teliosporas son esféricas, subglobosas a napiformes, de 20 a 28  $\mu\text{m}$  de diámetro; la pared de las teliosporas es hialina, lisa y de 1  $\mu\text{m}$  de espesor (Ritschel, 2005). Las basidiosporas son vestigios de una forma ancestral, que no tienen función conocida y son genética y morfológicamente inestables (Fernandes *et al.*, 2009). En la figura 4 se puede observar la esporulación del hongo en el envés de una hoja de café y las uredosporas de *H. vastatrix* vistas al microscopio y en la figura 5 se observa la germinación de teliosporas y basidiosporas de *Hemileia vastatrix*.



**Figura 4.** Esporulaci3n en el env3s de la hoja y observaci3n microsc3pica de uredosporas de *Hemileia vastatrix* (Elaboraci3n y fotograf3as propias).



**Figura 5.** Germinaci3n de teliosporas y basidiosporas de *Hemileia vastatrix*. b-d. Inicio de la germinaci3n de las teliosporas; n-q. Basidiosporas en germinaci3n (b-q. barra = 10  $\mu\text{m}$ .) (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: Fernandes *et al.*, 2009, Tropical Plant Pathology).

### 1.2.3. Ciclo biol3gico

Este hongo sobrevive 3nicamente en tejido vivo del hu3sped por lo que se define como un par3sito obligado que se alimenta de las c3lulas de hojas vivas de las especies del g3nero *Coffea*, siendo *C. arabica*, la m3s afectada (Kolmer *et al.*, 2009). Las uredosporas pueden sobrevivir hasta 6 semanas bajo condiciones ambientales secas (Arneson, 2000).

Muchos hongos de la roya alternan entre dos plantas hospederas no relacionadas para completar su ciclo de vida, lo que se le denomina heteroecismo (Visser *et al.*, 2019). Un hu3sped est3 colonizado por gametotalo f3ngico y es el sitio de recombinaci3n sexual mediante fertilizaci3n. El esporotalo f3ngico coloniza un hu3sped no emparentado, donde la parte repetitiva asexual del ciclo de vida ocurre a trav3s de la

propagación clonal continua de uredosporas (Aime *et al.*, 2018). Algunos hongos de la roya, llamados autoicos, se han adaptado para completar ambas partes de su ciclo de vida en un solo huésped que está colonizado tanto por el esporotalo como por el gametotalo (Ramírez *et al.*, 2022). Debido a la complejidad de los ciclos de vida de la roya y a la variación morfológica extrema entre gametotalos y esporotalos, se desconocen los ciclos de vida completos de miles de especies de hongo de la roya, incluidas algunas de importancia agrícola (Aime y McTaggart 2021). En el caso de *H. vastatrix* sólo se conoce el esporotalo, que infecta a varias especies de Coffez (Talhinas *et al.*, 2017). Nunca se ha observado el establecimiento de un gametotalo y la fertilización en *Coffea* spp. o en cualquier otra especie de huésped (Aime y McTaggart 2021). Aún se desconoce si esta roya forma un gametotalo y, de ser así, si se forma en un huésped alternativo desconocido o en el mismo huésped que el esporotalo (Ramírez *et al.*, 2022). En la actualidad, no se ha reportado ningún huésped alternativo de la roya, por lo que su ciclo biológico se cumple en la misma planta parasitada sin necesidad de otro (roya autoica) (Figueiredo y Passador, 2008).

La reproducción clonal de este hongo puede provocar la disminución progresiva de la resistencia en las variedades mejoradas de café en varios países. Ante el resurgimiento de epidemias de la enfermedad entre 2008 y 2013 en algunas zonas de América, se desarrollan estrategias de control efectivas para hacer frente al patógeno, comprendiendo a fondo la biología de *H. vastatrix* para desarrollar variedades de café resistentes para garantizar la sostenibilidad de la producción cafetalera a nivel mundial (Ramírez *et al.*, 2022).

El ciclo de vida del hongo causante de la roya del café se divide en los siguientes eventos:

**Inoculo primario:** La mayor fuente de inóculo primario es el inóculo residual constituido por las uredosporas (Mayne, 1930), inóculo constituido por las lesiones necrosadas y/o latentes llevadas por las hojas del cafeto que sobrevivieron después de la época seca (Narayana, 2013). La cantidad de inóculo residual depende, por lo tanto, de la intensidad de la defoliación después de cosecha (Avelino y Rivas, 2013).



**Inoculación:** La llegada del inóculo inicial es a través de las uredosporas y se da por la salpicadura de lluvia (Arneson, 2000). Posteriormente el desarrollo de la

enfermedad inicia en el envés de la hoja con pequeños puntos de 1 a 3 milímetros de diámetro, de color amarillo débil denominadas esporas; en el haz de la hoja se observan manchas de coloración amarilla (McCook, 2008). Los síntomas aparecen 14 días después de la inoculación (Rayner, 1961).

**Germinación:** Es el proceso donde la espora una vez depositada en el envés de la hoja emite de uno a cuatro tubos germinativos, en un período de 6 a 12 horas (Rivillas *et al.*, 2011). Los límites de temperatura óptimos para su desarrollo se enmarcan entre los 21 y 25° C. (Gouveia, 2005), oscuridad y agua libre durante el proceso hasta la penetración (Villareyna, 2016). Por debajo de 16° C y por encima de los 27° C las esporas no germinan (Gouveia, 2005). El tubo germinativo crece hasta encontrar los estomas, que son aberturas naturales de la hoja para el intercambio gaseoso en la respiración (Rivillas *et al.*, 2011). En esta etapa, hay formación de un apresorio sobre el estoma, producido por los tubos germinales, el cual será necesario para la etapa siguiente de penetración (Kushalappa y Eskes 1989). El apresorio es una estructura afilada que permite forzar la entrada por el estoma; su formación es favorecida por temperaturas entre 13°C y 16°C (Villareyna, 2016) y se forman entre 6,5 a 8,5 horas (Jong *et al.*, 2005).

**Etapa de penetración.** Es la etapa en la cual la espora germinada, penetra mediante una hifa a través de los estomas (bien formados) de la hoja, hasta la cámara subestomática (Silva *et al.*, 2008). La penetración requiere de un estoma foliar bien formado (McCain y Hennen, 1984): esto permite explicar las razones por las cuales las hojas jóvenes con maduración de estomas incompleta son menos receptivas que las hojas adultas (Kushalappa, 1989).

**Etapa de invasión.** Ésta se realiza por medio de hifas a una cámara subestomática, se produce un grupo de células esporógenas o protosoros. Algunas emergen por la apertura del estoma y producen un esporóforo. Cada grupo emergido de un estoma constituye un soro o pústula que produce uredosporas (McCain y Hennen 1984).

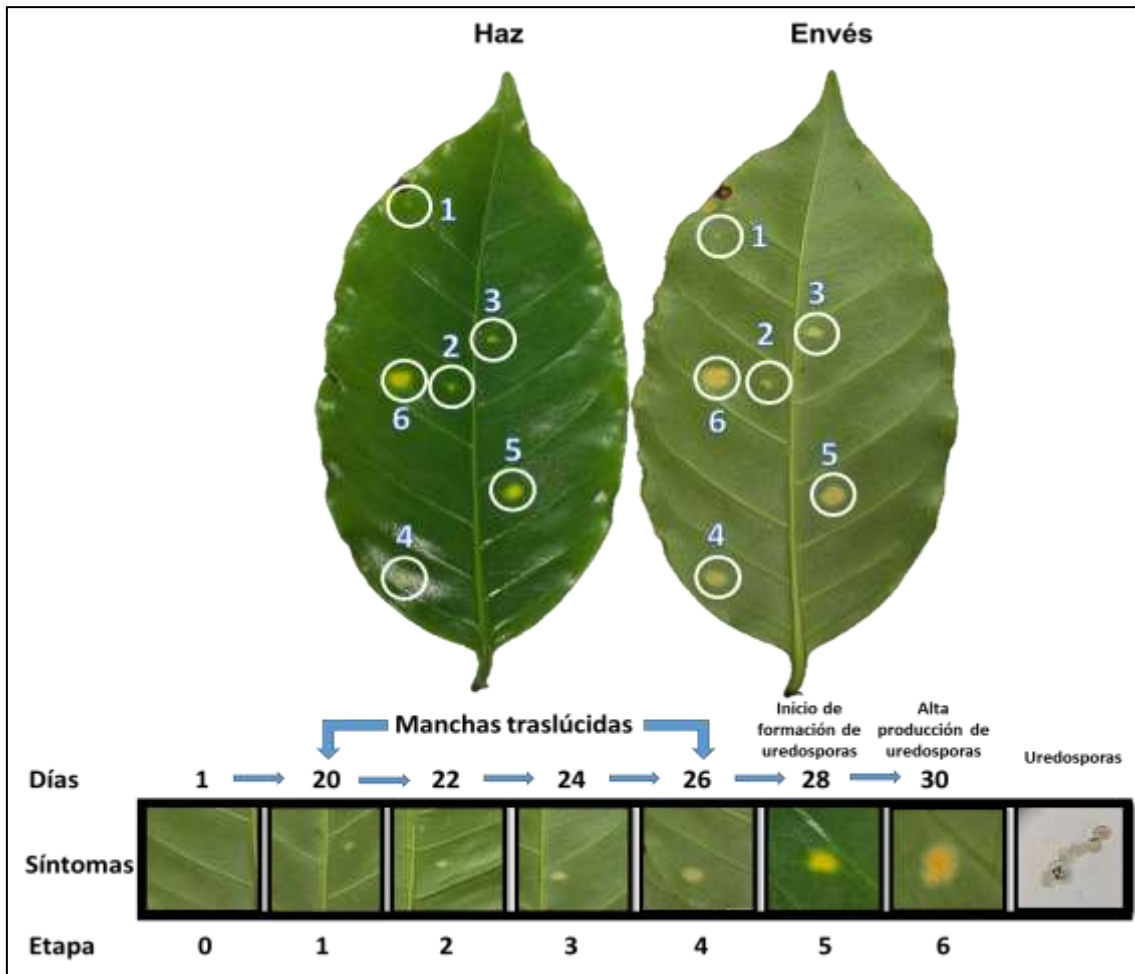
**Etapa de colonización.** En la colonización, el hongo en el interior de la hoja crece intercelularmente y desarrolla haustorios para extraer los nutrientes para su crecimiento (Rivillas *et al.*, 2011), provocando zonas cloróticas en la hoja, en esta etapa la espora germinada, penetra mediante una hifa a través de los estomas (bien formados) de la hoja, hasta la cámara subestomática (Silva *et al.*, 2008), esta etapa de colonización de

la hoja por las hifas del hongo, se presenta la formación de los primeros síntomas en el haz (lesiones amarillentas) (Villareyna, 2016).

**Etapa de reproducción.** Luego de transcurridos una media de 30 días, después de la llegada del inóculo, el hongo está lo suficientemente maduro como para diferenciarse en estructuras llamadas soros, que son las encargadas de producir nuevas uredosporas, a razón de 1.600 por mm<sup>2</sup> de hoja (Rivillas *et al.*, 2011), por un período de 4 a 5 meses (Campos, 2015); serán dispersadas para iniciar el nuevo ciclo (Rivillas *et al.*, 2011).

**Supervivencia.** *H. vastatrix* sobrevive principalmente como micelio en los tejidos vivos del huésped y, puesto que las hojas infectadas caen prematuramente, esto elimina eficazmente una enorme cantidad de inóculo potencial de la epidemia (Armeson, 2000). La roya del café desarrolló y conservó únicamente una entidad de reproducción, la uredospora, de paredes gruesas, la cual es adaptada para la supervivencia (Avelino y Rivas, 2013). Algunas hojas verdes siempre persisten durante la estación seca y las uredosporas secas pueden sobrevivir alrededor de 6 semanas, por lo que siempre hay un poco de inóculo viable para infectar a las hojas recién formadas al inicio de la temporada lluviosa (Arneson, 2000).

**Etapa de diseminación.** Según Investigadores del Departamento Nacional de Meteorología de Brasil han informado que corrientes de aire con velocidad de 20 Km/h pudieron haber traído las esporas de la roya desde África hasta las Costas de Brasil en 15 días en el año 1970 (Bowden *et al.*, 1971; Gutiérrez, 2019). La diseminación de la roya del café se realiza por medio de uredosporas que, producidas en grandes cantidades, forman el polvillo amarillo que observamos en el envés de la hoja (Rivillas *et al.*, 2011). La etapa de diseminación se divide en una fase de liberación, en la cual la uredospora se despega del esporóforo (abandona la lesión), una fase de dispersión y otra de depósito de la espora sobre la hoja nueva (Silva *et al.*, 1999). Los uredosporas se pueden dispersar por el viento, la lluvia, insectos y el humano (Arneson, 2000). En la figura 6, se puede observar el progreso de infección provocada por la roya del café, según Barquero (2013) del Instituto del Café de Costa Rica-ICAFFE.



**Figura 6.** Progreso y etapas de infección de *Hemileia vastatrix*. (Elaboración y fotografías propias con información de Barquero, 2013, ICAFE).

#### 1.2.4. Síntomas y daños de la roya del café

Los primeros síntomas de la enfermedad pueden observarse en el envés de la hoja, por donde penetra el hongo. Se manifiesta como pequeñas lesiones de color amarillento, que posteriormente se desarrollan y producen las uredosporas con el color anaranjado que las caracteriza (Kolmer *et al.*, 2009). En variedades susceptibles de *C. arabica* L., si no se aplican medidas de control apropiadas, la roya causa severos daños en la estructura del cafeto, provocando fuerte caída de hojas, que afecta su proceso de fotosíntesis, debilitándolas y dando lugar al ataque de otras enfermedades. Con índices altos de incidencia y severidad, la roya afecta el proceso fisiológico de llenado y maduración de frutos, causando pérdidas económicas considerables (Campos, 2015), hasta de un 30% de reducción en la producción (Oliveira *et al.*, 2014), principalmente en el año siguiente a la afectación (Kolmer *et al.*, 2009). En la figura 7, se puede observar

algunas lesiones iniciales, la producción de uredosporas y algunas lesiones avanzadas provocadas por la roya del café.



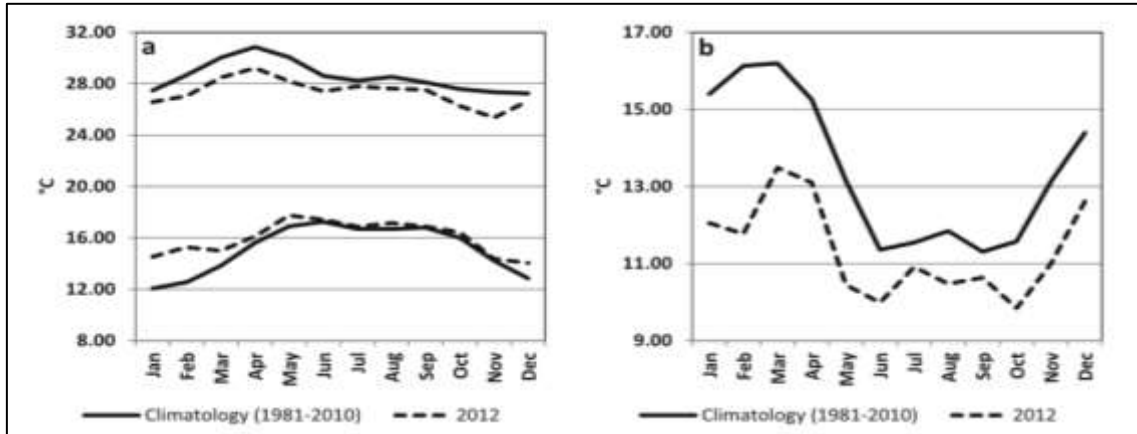
**Figura 7.** A) Lesión inicial en el haz de la hoja. B) Inicio de producción de uredosporas en el envés. C) Lesión avanzada de roya del café y D) uredosporas (Elaboración y fotografías propias).

#### **1.2.5. Condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de la roya**

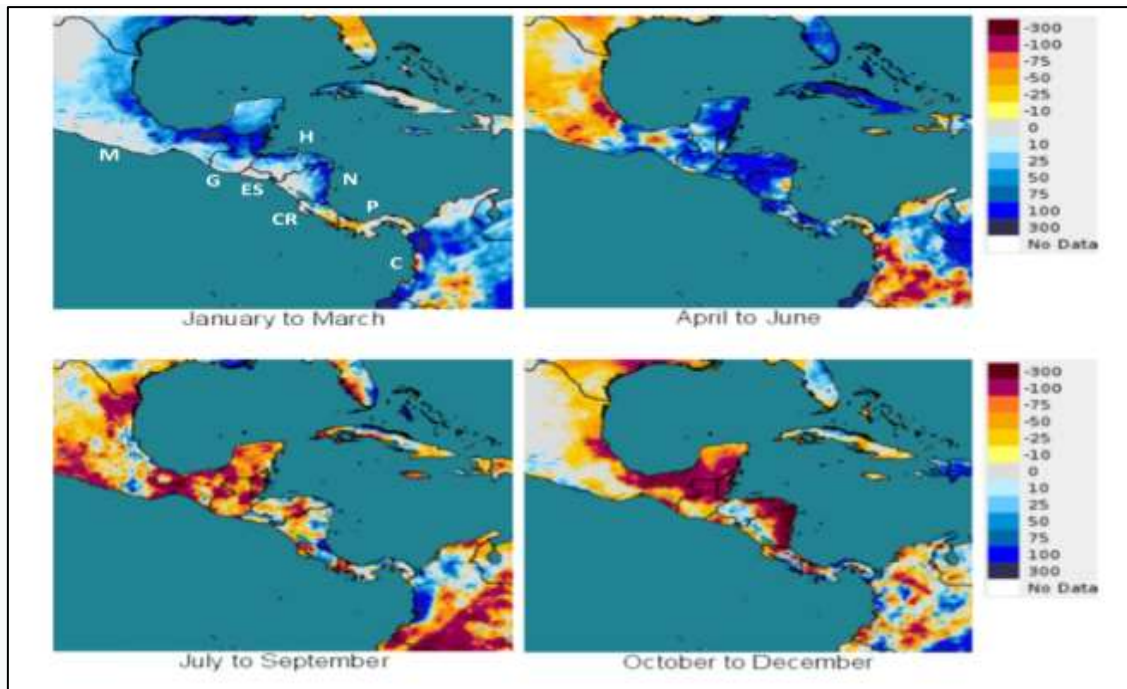
El hongo requiere de condiciones climáticas especiales para su reproducción, como la salpicadura de lluvia que favorece su dispersión, mojado en el envés de hojas para su germinación y baja intensidad de brillo solar (Rivillas *et al.*, 2011); además de temperaturas en un rango entre los 21 y 25 °C y humedad relativa >85% (Pérez, 2022). En regiones con presencia de lluvias, especialmente en horas de la tarde o noche acompañadas de periodos de nubosidad que evitan la ocurrencia de temperaturas muy altas después de mediodía, o de temperaturas muy bajas en horas de la madrugada, son propicias para el desarrollo de epidemias fuertes de roya (Campos, 2015).

Hay ciertos datos que pueden explicar ese desarrollo explosivo en Centroamérica años después de su introducción. Durante 2008–2013, se registraron anomalías en varios parámetros climáticos (temperatura, lluvia y duración del sol) en América Central y Colombia. Aunque la temperatura media anual para 2012 en Centroamérica estuvo cerca del valor medio a largo plazo (1981-2010), se observó una menor variabilidad diurna de las temperaturas. Para Guatemala en 2012, las temperaturas mínimas diarias aumentaron 0,9 °C, mientras que las temperaturas máximas diarias disminuyeron 1,2 °C en promedio (Avelino *et al.*, 2015). También se informaron anomalías para la precipitación media y la variabilidad de la temporada de lluvias de 2012, con menores cantidades de lluvia. En la figura 8, con datos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología-INSIVUMEH de Guatemala, Avelino *et al.*, 2015, se presentan los datos climatológicos de los años 1981-2010 en

comparación con algunas variables como la temperatura y amplitudes térmicas observadas, así como algunas anomalías de precipitación (mm) presentadas en 2012 a nivel de toda Centroamérica (figura 9).



**Figura 8.** Datos climatológicos (1981-2010) en comparación con las temperaturas diarias máximas y mínimas (a) y las amplitudes térmicas (b) observadas en Guatemala en 2012 (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: Avelino *et al.*, e INSIVUMEH, 2015. Food Security).



**Figura 9.** Anomalías de precipitación (mm) en 2012 en comparación con el clima (1981-2010) para Centroamérica (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: Avelino *et al.* e INSIVUMEH, 2015. Food Security).

Se ha observado que *H. vastatrix* podría expandir su rango altitudinal debido al cambio climático, lo que tendría consecuencias adversas. Por esta razón, Parada *et al.*, (2020) de estudiaron el impacto del cambio climático en la incidencia de la roya, utilizando datos de la zona cafetalera de Coatepec, Veracruz, México y analizando las tendencias de temperatura y extremos climáticos entre 1961 y 2010. Se encontró un aumento en la temperatura máxima (0,2 °C por década) y mínima (0,3 °C por década), así como un incremento en la precipitación y su intensidad diaria. Estos cambios han aumentado la susceptibilidad a la roya del café y otras enfermedades fúngicas en la zona.

### ***1.2.6. Epidemiología***

Reportes indican que el periodo de latencia de la roya, que comprende el tiempo que transcurre desde el momento de la infección hasta la producción de esporas, puede durar de 34 a 37 días al sol y entre 31 y 35 días a la sombra (Campos, 2015). Los ciclos secundarios de infección se producen de forma continua durante un clima favorable y el potencial de epidemias explosivas es enorme (Arneson, 2000). El ciclo de vida del hongo se alcanza a repetir muchas veces en un cultivo durante el mismo periodo de cosecha, por lo que se considera a la roya del cafeto como una enfermedad policíclica (Campos, 2015).

Existen 3 etapas de progreso de la enfermedad/epidemia de *H. vastatrix*, establecidas en procesos policíclicos que se presenta en una curva de progreso en las dimensiones de tiempo y espacio (Barquero, 2013; Campos, 2015).

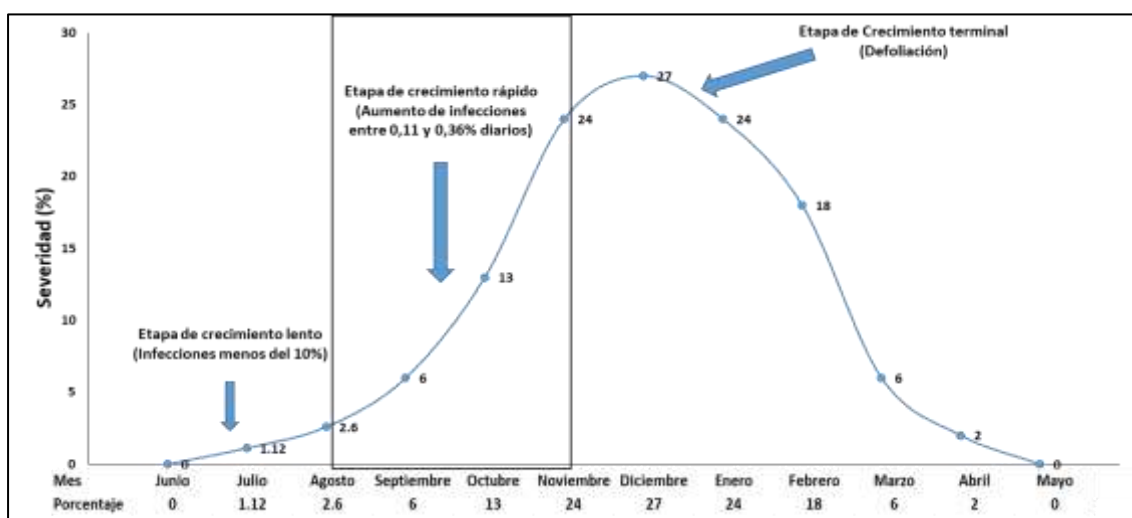
**Etapa de crecimiento lento.** La primera etapa se caracteriza por un lento aumento de la enfermedad, casi imperceptible, que coincide con el inicio del periodo lluvioso y con el crecimiento vegetativo de los cafetos. La incidencia presente en los cafetos o plantaciones corresponde al inóculo residual de la roya que se encuentra en el tejido infectado que permaneció en la planta luego de la época seca, el cual al cabo de un mes provocará el surgimiento de nuevas lesiones en hojas enfermas o bien en hojas sanas (Barquero, 2013). Durante esta fase las infecciones se aprecian en menos del 10% de las hojas (Rivillas *et al.*, 2011). En esta etapa, las manchas apenas inician la producción de esporas por lo que el surgimiento de nuevas manchas en hojas sanas es lento. El surgimiento de nuevas hojas enfermas se equilibra con la formación de hojas nuevas sanas en el cafeto (Barquero, 2013).

**Etapa de crecimiento rápido.** En esta etapa los cambios en la cantidad de enfermedad de un mes a otro son muy rápidos. Información recopilada en Costa Rica indica que la incidencia de la Roya del Cafeto puede aumentar entre 0,11 y 0,36% por día, de acuerdo a los estudios realizados sobre la tasa aparente de infección (Barquero, 2013).

El momento de inicio del incremento acelerado de la roya, dependerá de la cantidad de enfermedad formada en la primera etapa de la curva de progreso de la roya (etapa de crecimiento lento) y de las condiciones climáticas existentes y ocurrirá a partir de una incidencia de 10-15% (Barquero, 2013). Luego de 2 a 3 semanas la enfermedad puede alcanzar a un 30% o más de las hojas de la planta (Rivillas *et al.*, 2011).

**Etapa de crecimiento terminal.** Consiste en la etapa donde se alcanza el máximo nivel de la enfermedad y ocurre una caída de hojas importante. En esta etapa, el aumento de la enfermedad es lento porque la superficie de hojas sanas por infectar es muy reducida. Coincide con la etapa final de maduración de los frutos y con la etapa de mínimo crecimiento vegetativo del cafeto (Barquero, 2013).

En la figura 10 se presenta el progreso típico de la roya del café, con algunas modificaciones, dónde se presenta el desarrollo lento, rápido o terminal de la enfermedad, según el espacio y la infección.



**Figura 10.** Progreso típico de la roya del café (Elaboración propia con información de Rivillas *et al.*, 2011 y Barquero, 2013).

**Modelos epidemiológicos.** Los modelos epidemiológicos son especialmente útiles para la predicción de la enfermedad, el establecimiento de los periodos de infección y la determinación de los momentos de tratamiento (Segarra, 2002). Según Costa *et al.*, (2002), la epidemiología integra conocimientos acerca de los hospedantes, sus parásitos y las condiciones del ambiente físico en que se desenvuelven. Los modelos proporcionan el marco conceptual para la comprensión del patosistema y las directrices estratégicas del control de las enfermedades. Dentro de este grupo destacan las curvas de desarrollo/progreso por su amplia utilización en la comparación de epidemias y en el análisis del efecto de las medidas de control en el desarrollo epidémico.

Según Hernández *et al.*, (1986), epidemiológicamente la roya y el cafeto interactúan en íntima relación de compatibilidad bajo condiciones ambientales dadas para cada región. En Brasil se ha avanzado mucho en el estudio epidemiológico de la roya de café, desarrollando importantes parámetros para medir la incidencia, calcular y pronosticar epidemias y señalar las épocas de control (Hernández *et al.*, 1986). Montoya y Chávez (1974) indican que los factores condicionantes de la incidencia y severidad de la roya, cuando la temperatura no es limitante son: la distribución e intensidad de las lluvias, la cantidad del inoculo residual al final de la estación seca y el grado de follaje de la plantación. Con relación a la cuantificación de enfermedades y comportamientos de epidemias, Van der Plank (1963) sugirió el modelo logístico para el cálculo de las curvas de progreso de la enfermedad, pero hay otros modelos que pueden explicar mejor determinados tipos de epidemias, mediante las funciones denominadas: exponencial, monomolecular, y Gompertz, entre otras (Costa *et al.*, 2002; Madden *et al.*, 2007).

**Modelo exponencial.** Es de los dos primeros el modelo más simple empleado para el estudio del aumento de poblaciones. Puede ser descrito como:

$$dx/dt = r_E x$$

donde  $r_E$  es la tasa de aumento específico para este modelo. La interpretación biológica de la ecuación indica que la velocidad de aumento de la enfermedad:  $dx/dt$ , también llamada tasa absoluta de aumento de enfermedad, es proporcional a la propia cantidad de enfermedad. A pesar de la simplicidad puede ser usado para las fases iniciales de la epidemia, cuando la cantidad de la enfermedad no excede el 5 %.

**Modelo logístico** Este modelo ha sido el más empleado para describir el progreso de la enfermedad para patógenos policíclicos. La ecuación diferencial para este modelo puede ser descrita como:

$$dx/dt = r_L \times (1-x)$$

donde  $r_L$  es la tasa de aumento específico para este modelo y 1 es la cantidad máxima de la enfermedad. El factor de corrección  $(1-x)$  representa la cantidad de tejido sano. La interpretación biológica indica que una velocidad de aumento de enfermedad es proporcional a la propia cantidad de enfermedad y la cantidad de tejido sano disponible. Para cantidades pequeñas de enfermedad (debajo de 5 %) el modelo logístico se confunde con el exponencial. Graficando  $x$  respecto del tiempo, se origina una curva sigmoide, conocida como curva logística, simétrica en torno de  $x = 0,5$ .

**Modelo Gompertz.** La ecuación puede ser descrita:

$$dx/dt = r_G \times [-\ln(x)]$$

donde  $r_G$  es la tasa específica para este modelo. El gráfico de  $dx/dt$  (respecto del tiempo), como acontece con el modelo logístico, muestra incrementos crecientes hasta que se alcanza el punto de inflexión, seguido de incrementos decrecientes que tienden a cero. El punto de inflexión, diferente del logístico, ocurre en el punto  $x = 0,37 (1/e)$ , resultando un curva  $dx/dt$  asimétrica inclinada hacia la izquierda. El gráfico de  $x$  respecto del tiempo, origina una curva también sigmoide pero se diferencia de la logística por su crecimiento más acentuado en el inicio. Este modelo, así como el logístico, es especialmente útil para describir enfermedades policíclicas (que presentan más de un ciclo infeccioso por ciclo del cultivo).

**Modelo monomolecular.** En este modelo la velocidad de aumento de la enfermedad es proporcional al inóculo inicial y la tasa, ambos supuestos constantes. La ecuación que describe el modelo es:

$$dx/dt = r_M (1-x)$$

donde  $r_M$  es la tasa específica para este modelo ( $r_M = \text{inóculo inicial} \times \text{tasa}$ ) y  $(1-x)$  representa el tejido sano. El gráfico de  $dx/dt$  (respecto del tiempo) muestra que los incrementos son siempre decrecientes y que se aproximan a cero, en la medida que se agotan los tejidos sanos, originando una curva cóncava en relación a la abscisa, aproximándose asintóticamente a la cantidad máxima de enfermedad. Este modelo es

especialmente útil para describir enfermedades monocíclicas (que presentan sólo un ciclo infeccioso por ciclo del cultivo).

**Modelos en café.** La epidemia de roya del café ha sido objeto de estudio por varios investigadores; a partir de modelos simples se han ido diseñando modelos complejos para la predicción. Pinto *et al.*, (2002) emplearon modelos de redes neuronales artificiales, mientras que Meira *et al.*, (2008) optaron por utilizar árboles de decisión. En una investigación posterior, Meira *et al.*, (2009) desarrollaron modelos de alerta en árboles de decisión para determinar la tasa de avance mensual de la roya del café en cultivos con alta carga de fruto pendiente. Cintra *et al.*, (2011) también contribuyeron a este campo con modelos de alerta en árboles de decisión difusos. Además de estas aproximaciones, se han empleado otras técnicas, como las redes neuronales artificiales difusas desarrolladas por Alves *et al.*, (2010), las máquinas de vectores de soporte inducidas por Luaces *et al.*, (2011), los bosques aleatorios, también mencionados por Cintra *et al.*, (2011), y las redes bayesianas generadas por Pérez *et al.*, (2012).

#### **1.2.7. Medidas de control**

La gestión integrada de *H. vastatrix* se debe hacer mediante el uso conjunto de variedades resistentes, organismos de control biológico (biofungicidas), prácticas culturales y fungicidas (Obando *et al.*, 2013). El control con fungicidas de síntesis química es uno de los más eficaces para el control de la roya, seguido del uso de productos derivados del cobre; sin embargo, los distintos problemas derivados de ese empleo en agricultura así como el alto costo de las aplicaciones y el riesgo de desarrollo de resistencias a productos de síntesis, ha provocado que esta estrategia no se considere como la solución ideal para resolver este problema; por ello, en cumplimiento de las directrices de la Gestión Integrada de Plagas se han buscado alternativas viables que garanticen la sostenibilidad en la producción agrícola tanto en plantaciones intensivas como en las tradicionales.

**Control cultural.** El manejo cultural del cafetal consiste en mantener un buen programa de fertilización, encalado de los suelos, uso y manejo de la sombra, así como uso de distancias de siembra apropiadas y poda, y puede ayudar a mantener bajo control las enfermedades como la roya del café (Julca *et al.*, 2013).

**Distanciamiento de plantación.** Las altas densidades de plantaciones del café tienden a favorecer la roya en condiciones de carga fructífera homogeneizada (López *et al.*, 2012). El aumento de las densidades de siembra implica un mayor auto-sombreamiento entre los cafetos y, por lo tanto, produce efectos similares a los de la sombra. Bajo esta condición, se ha observado un incremento de la severidad y de la incidencia en un 88% y 84% respectivamente, con densidades de 10.000 plantas con respecto a 2500 plantas por ha (Avelino *et al.*, 2004).

**Fertilización.** Para el caso de la roya del café, se ha observado en Honduras que la incidencia de la enfermedad es menor en parcelas fertilizadas comparado con parcelas no fertilizadas (Avelino *et al.*, 2006). Los fuertes impactos de la roya anaranjada en los años 2008-2011 en Colombia fueron atribuidos, en parte, al menor uso de fertilizantes, lo cual condujo a un crecimiento y una recuperación de las plantas deficiente (Cristancho *et al.*, 2012). Dado que la susceptibilidad de la planta se ve marcadamente afectada por su estado nutricional, el agotamiento de los nutrientes por un alto rendimiento en una temporada determinada puede aumentar la gravedad de la roya, no solo en esa temporada, sino también en los años siguientes, a menos que se realicen los ajustes apropiados en los nutrientes. La fertilización con nitrógeno (N) y fósforo (P) tiende a reducir la susceptibilidad a la roya y el exceso de potasio (K) aumenta la susceptibilidad (Arneson, 2000).

**Sombra.** Tradicionalmente, en Guatemala el café se ha cultivado bajo sombra, por lo que debe considerarse su manejo en forma apropiada, con el fin de lograr un balance de luminosidad, tomando en cuenta que tanto el uso de sombra muy densa como el exceso de radiación solar, tiene efectos negativos en la producción sostenible (Campos, 2015). La sombra intercepta la radiación y disminuye la receptividad de la hoja de café; también se ha comprobado que las plantaciones de café bajo sombra favorecen el desarrollo y esporulación del hongo *Lecanicillium lecani*, el cual es un micoparásito de la roya del café (Avelino *et al.*, 2004). Un nivel de sombra entre un 30 y 40 % es

considerado adecuado para mantener el equilibrio entre plagas y enfermedades (entre estas la roya del café), conservando a la vez una productividad razonable (Villareyna, 2016).

La densidad de árboles de sombra está condicionada por la mayor o menor intensidad de luz predominante en el área de cultivo; en ese sentido, en zonas de producción ubicadas abajo de los 458 m sobre el nivel del mar (msnm) se recomiendan distanciamientos de 6 x 8 m; para altitudes entre los 459 – 916 msnm se sugieren distanciamientos de 8 x 10 m, mientras que para alturas mayores a los 916 msnm los distanciamientos sería de 12 x 12 metros (Campos, 2015).

Se utilizan 3 tipos de árboles como sombra (provisional, temporal o semipermanente y permanente).

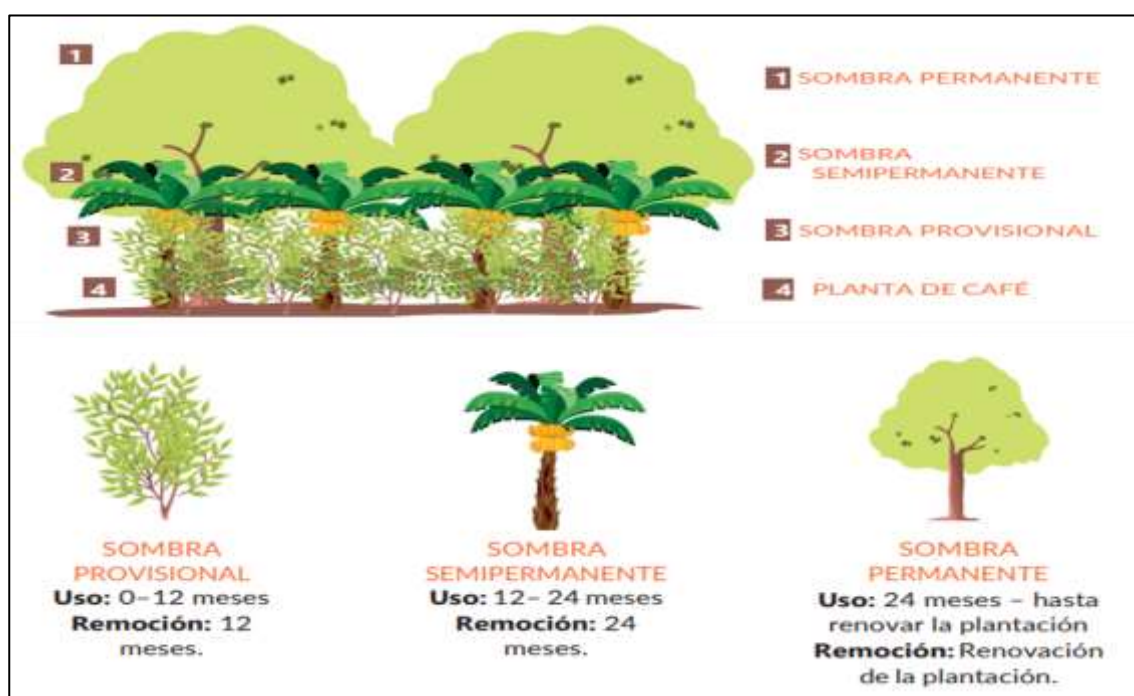
**Sombra provisional.** Se utiliza para proteger las plantas cuando se siembran áreas nuevas y su durabilidad es de un año, la sombra provisional debe mantenerse y/o renovarse hasta que la sombra semipermanente haya alcanzado las condiciones adecuadas, también se utiliza cuando se renuevan cafetales agotados. Son plantas de poca duración y rápido crecimiento como: Crotalaria (*Crotalaria vitellina*), Gandul (*Cajanus cajan*) y Tefrosia (*Tephrosia candida*) (Proyecto Maximizando Oportunidades en Café y Cacao en las Américas-MOCCA, 2021).

**Sombra temporal o semipermanente.** Sustituye la sombra provisional y mantiene el microclima, brindando protección hasta que se desarrolle la sombra permanente; son plantas de buen desarrollo y longevidad, con resistencia a las fluctuaciones de temperatura y humedad y de rápido crecimiento, con capacidad de conformar una copa extendida y que permita una buena filtración y distribución de luz entre 12 a 24 meses. Para tipo de sombra temporal se utilizan especies como: higuierillo (*Ricinus comunis*), cuernavaca (*Solanum wrightii*), banano (*Musa sapientum*) y plátano (*Musa paradisiaca*) (MOCCA, 2021).

**Sombra permanente.** Son árboles de fácil manejo y rápida capacidad de regeneración, resistentes a los vientos, con buen desarrollo y longevidad, los cuales acompañarán y protegerán a las plantas de café contra las fluctuaciones de temperatura y humedad. Estos árboles permiten una buena filtración y distribución de la luz, con raíces profundas para que no compitan con el cafeto y tengan un sólido anclaje al suelo, y rápida capacidad de regeneración (MOCCA, 2021).

En Guatemala las especies de árboles más comunes utilizados como sombra semipermanente y permanente son: Cuje (*Inga spp.*), Caspirol (*Mimosa fagifolia*), Pito (*Erythrina standleyana*), Madre cacao (*Gliricidia sepium*) y Roble (*Gravilea robusta*).

En la figura 11, se presenta un esquema de una plantación de café con diferentes tipos de sombra.



**Figura 11.** Esquema de plantación de café con diferentes tipos de sombra (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: Departamento de Agricultura de EE. UU., 2012, MOCCA).

**Podas.** Algunas prácticas culturales como las podas (eliminación de partes improductivas) disminuyen también la cantidad de inóculo al eliminar las hojas enfermas (Avelino y Rivas, 2013). Por eso se ha comprobado la presencia de una menor incidencia de la roya en los tratamientos que incluyen un manejo agronómico con podas de los cafetales (Obando *et al.*, 2013). La poda y deshije (eliminación de exceso de brotes) de los cafetos se han considerado por años como prácticas de manejo importantes para mejorar la productividad de plantaciones fuertemente agotadas, ya sea por excesos de producción, edad, afectaciones de plagas y enfermedades, entre otros. Se ha determinado que su implementación en el momento oportuno y de la forma adecuada, en combinación con otras prácticas de manejo puede disminuir en un 35 % la incidencia de roya del café

(Villareyna, 2016). La poda se debe realizar al finalizar el corte del fruto debido a que la planta de café tiene su mayor desarrollo vegetativo durante el período de marzo a mayo para obtener una excelente regeneración de tejido nuevo; en el caso de las “recepas” (podas bajas aproximadamente 0,30 m de altura), se obtiene buena emisión y desarrollo de los brotes que dan origen a las nuevas plantas (Velásquez, 2015), tal como se presenta en la figura 12.



**Figura 12.** Recepa con altura del corte 0,30 m.

**Control botánico.** Estudios realizados en condiciones de invernadero y laboratorio han indicado el potencial de productos orgánicos formulados a partir de citronela (*Cymbopogon nardus*), zacate limón (*Cymbopogon citratus*), eucalipto limón (*Corymbia citriodora*), neem (*Azadirachta indica*), árbol de clavo (*Syzygium aromaticum*) (Borges *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2014).), canela (*Cinnamomum zeylanicum*), árbol de té (*Melaleuca alternifolia*), tomillo (*Thymus vulgaris*), (Borges *et al.*, 2012), hojas de vernonia (*Vernonia polysphaera*) cordia (*Cordia verbenácea*), higuerrillo (*Ricinus communis*), pimienta negra (*Piper hispidinervum*) y bulbos de ajo (*Allium sativum*) para el control de *H. vastatrix* (Silva *et al.*, 2014).

Según Borges *et al.*, (2012), todos los aceites esenciales inhibieron la germinación de uredosporas y promovieron el control parcial de la roya del café en invernadero. Sin embargo, mencionan que los aceites de tomillo, clavo y citronela fueron los más efectivos para el control de la enfermedad. Además, se logró demostrar que las uredosporas expuestas a los aceites de calvo, citronela y tomillo, promovieron la

desorganización celular y la vacuolización citoplasmática, que fue más pronunciada en las uredosporas expuestas al aceite de citronela. Por otro lado, Silva *et al.*, (2014), indican que los extractos de plantas más eficaces contra el crecimiento micelial y la germinación de conidias fueron las hojas de vernonia, árbol de clavo y los bulbos de ajo, por lo que este tipo de productos representan una alternativa de manejo para la producción de café orgánico, el cual es valorado a nivel mundial.

**Control biológico.** Dentro de las estrategias de control biológico de fitopatógenos, una de las opciones es el uso de microorganismos que tienen la capacidad de sobrevivir a expensas de hongo afectando las estructuras reproductivas del patógeno, lo cual limita su desarrollo y diseminación (Barros *et al.*, 1999).

Entre los hongos que ejercen un efecto de control sobre *H. vastratix*, está el género: *Lecanicillium* que produce decoloración de uredosporas, formación de micelio blanco sobre ellas o necrosamiento (James *et al.*, 2016). La bacteria *Bacillus subtilis* ha sido utilizada para el control biológico de *H. vastatrix* (Ramírez *et al.*, 2020). Existen insectos micófagos como las larvas de *Mycodiplosis hemileiae* (Diptera: Cecidomyiidae) que se alimentan de esporas de la roya del café, por lo que es un agente de control biológico potencial de *H. vastatrix* en Latinoamérica y el Caribe (Hajian *et al.*, 2016).

### **Resistencia genética**

**Las variedades de café y su tolerancia a la roya.** Una de las principales inversiones que han hecho los países centroamericanos, incluso desarrollando alianzas entre ellos, es el mejoramiento genético del café. Dentro de las etapas de selección de variedades se da con un fuerte impulso para encontrar una mezcla entre calidad, alta producción y el gen de tolerancia a la roya. La tolerancia a la roya fue encontrada en lo que se conoce como el “Híbrido de Timor”, que es un híbrido natural entre un arábigo (*C. arabica*) y el robusta (*C. canephora*). A las variedades comerciales generadas con tolerancia a la roya se les llamó “Catimores” (Hernández y Velázquez, 2016).

En Guatemala se cultivan variedades como Caturra, Catuaí, Borbón, y Mundo Novo, entre otras, todas susceptibles a la roya del cafeto. ANACAFE impulsa el uso de variedades derivadas del Híbrido de Timor (Velásquez, 2019).

Existen tres grupos de variedades resistentes creadas por cruzamiento de tres diferentes cafetos del Híbrido de Timor (resistentes a la roya) con variedades susceptibles de porte bajo (Caturra, Villa Sarchí y Caturra Amarillo). El resultado de los cruces son Timor\*Caturra = Catimor, Timor\*Villa Sarchi = Sarchimor y Timor\*Caturra amarillo = Colombia (Campos, 2015). Se han realizado evaluaciones de los derivados de estos cultivares y han tenido un resultado vigoroso y productivo. Existen otras variedades como Icatú y Catucaí, que presentan resistencia, pero actualmente no se cultivan en grandes extensiones por la calidad de taza que presentan la cual es menor a las variedades tradicionales como: Borbón, Caturra y Catucaí (Velásquez, 2019). Una taza de café de buena calidad es suave, limpia, tiene acidez agradable, amargo moderado y aromas intensos tostados, dulces, herbales o a frutas (Puerta, 2013). Entre los materiales resistentes se cuenta con los que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.** Característica de los materiales con resistencia genética a la roya del café (Elaboración propia con información de Campos, 2015 y Velásquez, 2019).

<b>VARIEDAD Y/O LÍNEA</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Sarchimor T-5296 (Cuscatleco) Variedad Parainema	Porte bajo, brote verde o bronceado o ambos, producción alta, adaptados en baja y media altura.
Catimor T-8667 Variedades Costa Rica y Lempira	Porte bajo, brote bronce, vigor y producción alta, bien adaptadas en zonas en media altitud y altura.
Catimor T-5269	Brote bronce, bien adaptadas a baja y mediana altitud, producción alta.
Catimor T-5175 (Anacafé 90, Ihcafé 90) Variedades Colombia Castillo Regionales	Alto vigor, mala calidad de taza en zonas altas, presencia de grano negro en zonas bajas. Porte bajo, vigorosa y productiva.
Iactú Anacafé 14	Porta alto, vigorosa y productiva. Cruzamiento natural de Pacamara y Catimor, alto vigor y producción.
Centroamericano (H) Milenio	Por tener a uno de los padres Sarchimor, tiene alta resistencia a roya, alta producción y excelente taza.
Tupi Geisha Marsellesa	Brote bronce, alta productividad, excelente calidad de bebida. Con cierta resistencia a la roya, porte alto, excelente taza. Planta con alta productividad, porte medio, entrenudos cortos.

**Control químico.** El control químico es uno de los componentes más sustanciales en el manejo integrado de la roya del café, cuando se tienen variedades susceptibles. El uso de fungicidas ayuda a mantener bajos los niveles de la enfermedad y, por lo tanto, reduce el impacto que ésta ocasiona en la producción. Este control químico está basado en el uso de productos de contacto, sobre todo cúpricos y productos sistémicos.

**Fungicidas de contacto a base de cobre.** Son productos de acción por contacto, con la particularidad de proteger a las plantas de las agresiones de los patógenos. Actúan formando una capa protectora en el envés de la hoja de café, evitando así la germinación de las esporas y su posterior invasión del tejido (Villareyna, 2016). Son los principales fungicidas utilizados tradicionalmente contra la roya: Caldo bordelés ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{CaSO}_4$ ), Hidróxido de cobre ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ), Óxido de cobre ( $\text{CuO}$ ) y Oxidocloruro de cobre ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ). A pesar de que las bondades del cobre han sido frecuentemente mencionadas y que los productos a base de cobre se siguen utilizando en países productores de café importantes como la India (Narayana, 2013), estos productos, poco a poco, han sido suplantados por productos de síntesis y acción sistémica debido a que los productos cúpricos como metales pesados son contaminantes del medio ambiente.

**Fungicidas sistémicos.** Los productos sistémicos más utilizados son los que pertenecen a la familia de los triazoles, que inhiben la biosíntesis del ergosterol en los hongos (Avelino y Rivas, 2013). Se suele recomendar la aplicación conjunta de productos a base de triazoles y estrobilurinas (Capucho *et al.*, 2013) las cuales inhiben la respiración mitocondrial (Barlett *et al.*, 2002) y tienen la propiedad de afectar a la fase de esporulación de la roya, al contrario que los triazoles. También se suele recomendar la mezcla o uso alternativo con productos de contacto para reducir el riesgo de resistencias. Se ha comprobado la eficiencia de diferentes materias activas como el triadimefon, el triadimenol, el cyproconazole, pero muchas materias activas se están prohibiendo en los países productores o en los importadores de café y por tanto urge tener alternativas.

#### **1.2.8. El silicio como alternativa al uso de fitosanitarios**

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la litosfera (27,7%) (Exley, 1998) solo superado por el oxígeno. Los minerales que contienen silicio constituyen cerca del 40 % de los minerales comunes, incluyendo más del 90% de los minerales que forman rocas volcánicas (Quiroga, 2016). Está presente en la solución del

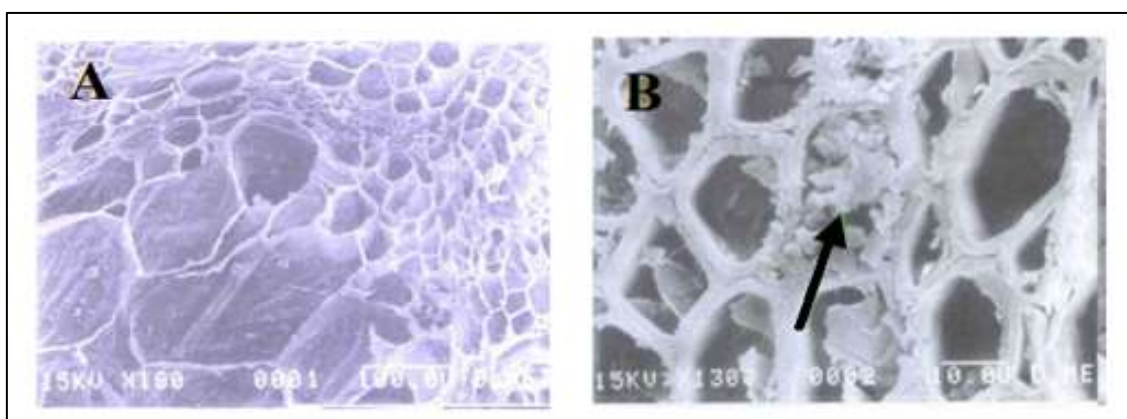
suelo en forma de ácido monomérico o monosilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) (Pozza *et al.*, 2015), como dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ); silicatos ( $\text{SiO}_{3-2}$ ); ácido silícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_2$ ) que es la forma asimilable por las plantas (Quiroga, 2016) y se absorbe fácilmente en el sistema radicular (Pozza *et al.*, 2015). Su acumulación varía entre especies en gran parte debido a fenómenos de absorción diferencial. La absorción y distribución de silicio es un proceso complejo que involucra la participación de tres transportadores (Lsi1, Lsi2 y Lsi6) (Seal *et al.*, 2018). Lsi1, un transportador de tipo canal, es una proteína acuaporina que pertenece a la subfamilia III de proteínas intrínsecas similares a Nod26 (NIP) que tiene permeabilidad al ácido silícico, mientras que Lsi2, un transportador de aniones de eflujo de silicio, transporta activamente el ácido silícico desde el simplasto al apoplasto hacia el xilema (Mitani, *et al.*, 2005). El transportador Lsi6 se expresa en la región inmadura cerca de la punta de la raíz y también en los brotes. Al igual que Lsi1, Lsi6 también pertenece a la nodulina-26 como la principal proteína intrínseca III (NIP III), subgrupo de acuaporinas y es un transportador de entrada de ácido silícico (Yamaji *et al.*, 2008) desde el xilema hasta las células del parénquima del xilema (Mitani, *et al.*, 2005).

En las plantas, el silicio tiende a polimerizarse en las paredes celulares, el lumen celular, los espacios intercelulares y en la capa subcuticular (Sangster *et al.*, 2001). Aunque abundante, el silicio siempre se combina en forma de óxidos y silicatos (Yamaji y Ma, 2011). Especies de las familias *Poaceae*, *Equisetaceae* y *Cyperaceae*, que presentan alta acumulación de silicio (>4 % de silicio en peso seco), absorben silicio de forma activa (Hodson *et al.*, 2005; Castellanos *et al.*, 2015). En este caso, el silicio es absorbido a través de proteínas específicas de membranas, garantizando la acumulación de silicio por la planta, independientemente del gradiente de concentración (Castellanos *et al.*, 2015). En función del contenido de silicio, Datnoff *et al.*, (2001) clasificaron las plantas en tres grupos: A. < 0,5% (no acumuladoras). B. Intermedio. C. Valores superiores a 1% (acumuladoras), ya que tienen la capacidad de tomar más rápido el silicio que el agua, como es el caso de las poáceas. Cuando el ácido silícico se concentra por encima de un nivel crítico (100 ppm a pH biológico), se polimeriza como fitolitos ( $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ ), que constituye la mayor parte del contenido de silicio de una planta (Jones y Handreck, 1967). Según Mitani y Ma (2005), las especies no acumuladoras, como el tomate, presentan un menor número de portadores de silicio del apoplasto al simplasto y un defecto en los portadores de silicio de las células corticales al xilema, lo que explica la mayor concentración de silicio en el sistema radicular en lugar de en el brote.

**Fuentes de silicio.** No se encuentra en la naturaleza en estado puro sino, generalmente, combinado con  $O_2$  formando óxidos de silicio ( $SiO_2$ , dióxido de silicio) y silicatos. Se encuentra muy extendido en formaciones geológicas de rocas, en formas como el cuarzo, coralina, ágata, jaspe, ópalo y pedernal. Por último, debido a su bajo peso molecular, el  $SiO_2$  puede hidratarse y disolverse en agua parcialmente formando el ácido silícico ( $H_4SiO_4$ ) (Bogado, 2011). Existe una serie de fuentes sólidas y líquidas de silicio en el mercado, que son utilizados como enmiendas de suelo o fertilizantes, como diatomita, silicato de calcio, metasilicato de sodio, silicato de potasio, silicato de magnesio, ácido ortosilícico, dióxido de silicio hidratado, metasilicato de calcio (Ferreira, 2017) y arcilla silicatada (Godoy *et al.*, 2012).

**Acción antifúngica del silicio.** Epstein (1994) indica que el silicio se deposita en las células del lumen, espacios intracelulares o capas externas, lo cual concuerda con Tubaña y Heckman (2015), quienes señalan que una vez absorbido el ácido silícico ( $H_4SiO_4$ ), es transportado por el xilema y depositado preferentemente en las células abaxiales de la epidermis como sílica-gel inmóvil. Es allí donde puede ejercer algunos de los efectos que se han mencionado como benéficos para las plantas como la resistencia a los procesos de infección de los patógenos (Han *et al.*, 2016).

En la figura 13, podemos observar a nivel de microscopio las acumulaciones de silicio que presentan las plantas asperjadas y sin aspersión de silicio durante unas evaluaciones realizadas por el grupo de investigación de Gómez *et al.*, (2006).



**Figura 13.** Fotografía al microscópico electrónico de barrido. A) Acumulación no se presenta en el testigo. B) Acumulación de silicio en xilema de plantas asperjadas con silicio (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: Gómez *et al.*, 2006, Revista Chapingo).

La mayoría de las especies absorben Si por difusión pasiva, según Fawe *et al.*, (2001); en su movimiento ascendente, a través del apoplasto, desde las raíces a las hojas; el silicio sufre polimerización en los espacios extracelulares de las paredes de células epidérmicas de hojas y vasos de xilema. El silicio se absorbe por las raíces, en forma de ácido monosilícico, y se transporta pasivamente a través de la corriente de transpiración y se deposita debajo de la cutícula, formando una doble capa de cutícula-sílice (Sangster *et al.*, 2001). Es allí donde puede ejercer algunos de los efectos que se han mencionado como benéficos para las plantas, como la resistencia, afectando los procesos de infección de los patógenos (Han *et al.*, 2016).

El suministro de silicio a las plantas ya sea a través de suelo, solución nutritiva o foliar, ha resultado en un control satisfactorio de varias enfermedades, en plantas monocotiledóneas, incluyendo poáceas, por la facilidad de asimilación, translocación y acumulación de las mismas. Datnoff *et al.*, (2001) y Bélanger *et al.*, (2002) reportan la reducción en la severidad de enfermedades fúngicas como *Blumeria graminis* en cebada y trigo; en arroz, se asoció con menor incidencia y severidad a *Pyricularia oryzae*, *Bipolaris oryzae* y *Rhizoctonia solani* (Prabhu *et al.*, 2012) y en caña de azúcar, menor incidencia de *Puccinia melanocephala* (Naidoo *et al.*, 2009). En dicotiledóneas, Carré- Missio *et al.*, (2014) han encontrado resultados prometedores en la reducción de la intensidad de la enfermedad en varios patosistemas, incluyendo *Erysiphe cichoracearum* en pepino, melón y calabaza donde el silicio se incrementa en la planta y se traduce en resistencia a la enfermedad (Quiroga, 2016). En plantas de tomate tratadas con silicio, se encontró una reducción del 47% en la severidad de *Fusarium oxysporum* y el incremento en la actividad enzimática de la polifenoloxidasasa (PPO) (Morato y Cardona, 2021). Algunos pepinos (*Cucumis sativus* L.) inoculados con *Podosphaeria fuliginea* y cultivados en una solución nutritiva suplementada con silicato de sodio mostraron menos colonias por hoja, área de colonias más pequeña y reducción en el poder de germinación de los conidios en comparación con aquellos en los que no se agregó silicio a la solución nutritiva (Menzies *et al.*, 1991).

***El silicio en la estimulación de defensas.*** Muchos autores como Datnoff *et al.*, (2001), Fauteux *et al.*, (2006), Caicedo y Chavarriaga (2007) y Amaral *et al.*, (2008) mencionan que el primer mecanismo del silicio en la protección en las plantas contra los patógenos, es la de la formación de una doble capa protectora. Pero existe un segundo mecanismo propuesto y es que el silicio soluble induce en la planta un aumento en la

producción de metabolitos secundarios como fenoles y fitoalexinas, lo cual activa mecanismos de defensa en la planta (Tubaña y Heckman, 2015) por regulación diferencial de genes (Fauteux *et al.*, 2006). Las aplicaciones de silicio actúan sobre la resistencia de la planta, disminuyendo la severidad e incidencia de enfermedades; hay estudios que demuestran la reducción en la propagación de conidios con aplicaciones continuas de silicio (Quiroga, 2016). Los efectos benéficos del silicio han sido demostrados en varias especies de plantas, proveyendo resistencia al ataque de organismos patógenos (hongos, bacterias, nematodos y virus) (Castellanos *et al.*, 2015). Se ha demostrado que el silicio, después de una infección por hongos, estimula la actividad de la quitinasa y activa rápidamente las peroxidasas (Debona *et al.*, 2013), flavonoides, ácidos fenólicos (Shetty *et al.*, 2011), fitoalexinas, glucanasas (Wang *et al.*, 2017) y polifenoxidasas, compuestos que tienen propiedades antifúngicas (Chérif *et al.*, 1994). De acuerdo con el concepto de que el silicio media los mecanismos de defensa activos algunos autores demostraron que en la interacción pepino-*Pythium*, el suministro de silicio mejoró las actividades de quitinasas, peroxidasas, polifenoloxidasas, flavonoides y fenoles (Fawe *et al.*, 1998).

**Fenoles.** La distribución y ubicación de los fenoles en las plantas no se conocen claramente; sin embargo, la cantidad de fenoles varía según el órgano de la planta, la edad, la etapa fenológica y las condiciones climáticas (Rodrigues *et al.*, 2008). Se ha demostrado que el tratamiento de algunas plantas con silicio trae como consecuencia cambios bioquímicos, como la acumulación de compuestos fenólicos (Da Cunha *et al.*, 2008).

Los carbohidratos se utilizan normalmente durante el crecimiento vegetativo de las plantas y la formación de granos y. Sin embargo, pueden ser desviados de su ruta metabólica principal hacia el mecanismo de defensa de la planta que produce compuestos fenólicos. Los años altamente productivos pueden representar altas demandas de carbohidratos, lo que pondría en peligro no solo el crecimiento vegetativo, sino también la síntesis de compuestos fenólicos por la falta de fotoasimilados en el metabolismo secundario (Rodrigues *et al.*, 2008).

Los compuestos fenólicos en hojas de café juegan un rol como mecanismo de defensa contra factores externos, resistencia a infecciones por patógenos e infestación de plagas, estados fenológicos y crecimiento de plantas (Campa *et al.*, 2012). En estudios realizados por Segheto *et al.*, (2018), se indica que el contenido de fenoles totales en

extractos de hoja sanas de café está entre los rangos de 16,5 a 206 mg de ácido gálico/g de extracto. Así mismo, en investigaciones realizadas por Rodrigues *et al.*, (2008), los contenidos de fenoles totales en hojas jóvenes de plantas productoras fueron 174 mg·g<sup>-1</sup> y en plantas no productoras 186,5 mg·g<sup>-1</sup>, mayores que las cantidades encontradas en las hojas maduras, cuyos contenidos oscilaban de 138,9 y 127,6 mg·g<sup>-1</sup>, respectivamente. Sin embargo en estudios realizados por Luján *et al.*, (2020), sobre el contenido de fenoles totales (FT) en hojas de plantas de café infectadas con roya, las concentraciones de FT eran dobles que las hojas sin infección; pero en ese estudio dichos contenidos estuvieron por debajo de los 7 mg·g<sup>-1</sup>.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El café es el producto agrícola tropical más comercializado en todo el mundo y su consumo sigue creciendo año tras año. El uso inadecuado y excesivo de fungicidas de síntesis para controlar la roya del café, ha aumentado los costos de producción y el riesgo el desarrollo de resistencia de fungicidas al patógeno debido a que es la principal medida de control de este hongo. La reducción en la disponibilidad de sustancias activas fungicidas eficaces aprobadas por las preocupaciones ambientales y de salud, ha hecho necesario intensificar la investigación para el desarrollo de soluciones alternativas novedosas, eficaces, de bajo costo y sostenibles para el control de esta enfermedad. Hoy en día los caficultores bajo una producción convencional invierten cantidades enormes de dinero con el objetivo de prevenir cualquier pérdida de rendimiento debido al ataque de la roya, por eso se buscan alternativas que ayuden a minimizar el impacto ocasionado por este patógeno, sin reducir la producción y buscando alternativas de comercialización que garanticen la estabilidad económica de los productores dedicadas a la producción de este cultivo.

En América Latina se han realizado varias investigaciones sobre el impacto del silicio en el desarrollo y producción del cultivo de café, desde el vivero hasta la producción, con resultados muy positivos y consistentes en todos los estados fenológicos. Pozza *et al.*, (2004), para las condiciones de Brasil, encontraron que la aplicación de silicato de calcio en plantas de almácigo redujo la incidencia de *Cercospora coffeicola* y se confirmó la presencia del silicio en el tejido foliar mediante las técnicas de microscopía de barrido electrónico y microanálisis de rayos.

En una investigación realizada en roya del café por Pereira *et al.*, (2009), las hojas con aplicaciones foliares de silicato de potasio a pH 5,5 y 10,5 fueron eficaces en reducir la severidad, especialmente cuando el pH era más ácido. Pozza *et al.*, (2004) relataron que plántulas del cultivar Catuaí cultivadas en sustrato con silicato de calcio, presentaron una reducción del 63,2% en el porcentaje de hojas lesionadas y del 43% en el total de lesiones de la planta, en relación con las plantas testigo. Las observaciones al microscopio de barrido junto con el microanálisis de rayos X indicaron que en las hojas de las plantas de ese cultivar suministradas con silicio, este elemento se distribuyó uniformemente en toda la superficie abaxial de las hojas. Además, la cutícula era más gruesa y la capa epicuticular de cera estaba más desarrollada en la superficie abaxial de las hojas de las plantas alimentadas con silicio, lo que hacía que la superficie fuera más

hidrófoba, dificultando la formación de una película de agua importante para la germinación de conidias de *C. coffeicola*. En las hojas de las plantas que no recibieron silicio, rara vez se observó la deposición de silicio y no hubo un cambio perceptible en la capa de cera. Botelho *et al.*, (2005) también informaron sobre el control de la misma enfermedad en plántulas del café del cultivar Catuaí IAC99 cultivadas en sustrato que contenía dosis crecientes de silicato de calcio y silicato de sodio.

Martinati *et al.*, (2008) probaron el efecto de diferentes fuentes de silicio, aplicadas al suelo, en la resistencia fisiológica de plantas de café, las cuales fueron inoculadas. Estos autores encontraron que el número de lesiones de roya se reducía de hasta un 66% en las plantas que recibieron dosis de 5 $\mu$ M de silicio con respecto al testigo sin aplicación.

En etapa productiva Figueiredo (2007), reporta un efecto significativo de las aplicaciones de silicio (silicato de calcio y magnesio) vía foliar en la reducción de la incidencia de *Hemileia vastatrix*, así como un marcado impacto en las características organolépticas de la bebida, mejorando significativamente la acidez, balance y cuerpo del café en la variedad Mundo Novo. Este hallazgo cobra mayor vigencia debido a la tendencia actual de comercialización de café en el mundo en base a producción de cafés especiales, diferenciados por su calidad en taza.

A pesar de que el dióxido de silicio ha sido investigado por su potencial para mejorar la resistencia de las plantas a diversas enfermedades, su uso en aplicaciones foliares para el control de la roya del café no ha sido ampliamente adoptado. Aunque algunos estudios indican que el silicio puede fortalecer las paredes celulares de las plantas y aumentar su resistencia a los patógenos, la evidencia específica de su efectividad contra la roya del café aún es limitada y no concluyente. Por lo tanto, se busca evaluar esta formulación sólida, distinta de las tradicionalmente usadas (líquidas), y verificar su efecto sobre el daño causado por la roya del café, con el objetivo de presentarla como una alternativa ecológica para la protección contra este patógeno.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

- Estudiar el efecto de la aplicación foliar de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) sobre la incidencia, severidad y defoliación por la roya y sobre la producción y la calidad del fruto.

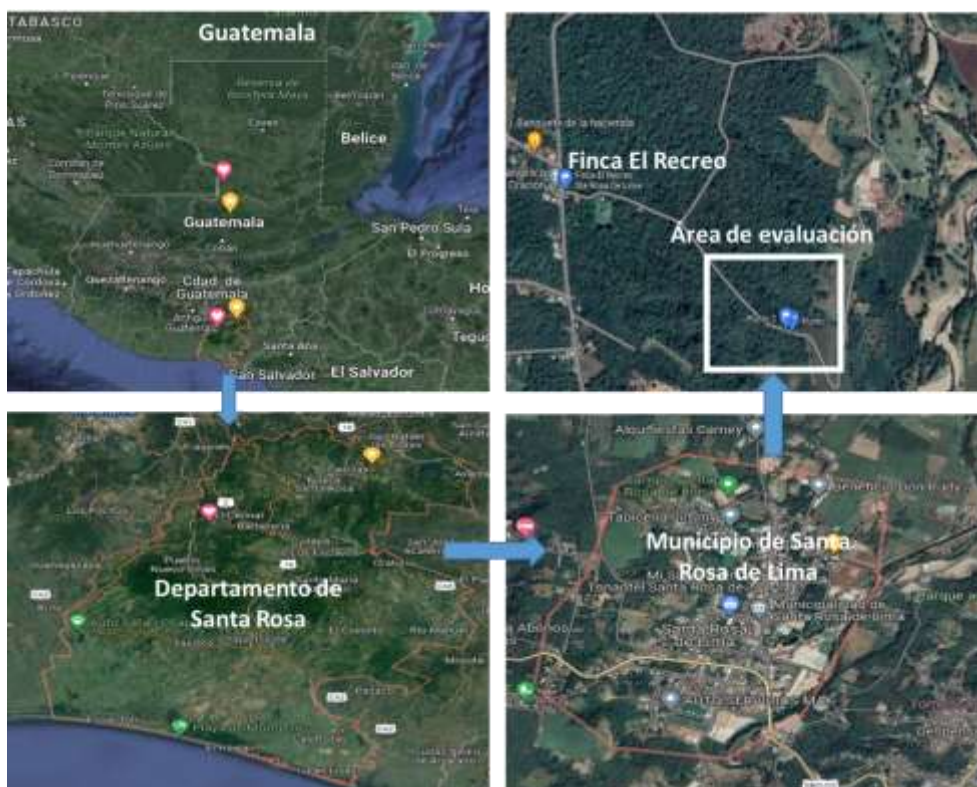
#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comprobar si el silicio es acumulativo en las plantas de café y determinar si existe alguna relación positiva entre la acumulación de este elemento con la incidencia y severidad de la roya del café.
- Determinar si en las plantas tratadas con  $\text{SiO}_2$  aumenta el contenido en fenoles totales y si hay alguna relación positiva entre la acumulación de este elemento con la incidencia y severidad de la roya del café.
- Profundizar en el estudio de la evolución de las epidemias de roya en la zona y condiciones del ensayo: velocidad de avance, curvas de progreso de la enfermedad y modelos epidemiológicos que mejor las describen.
- Verificar el efecto de la roya y los tratamientos evaluados sobre la producción y calidad de taza del grano de café.
- Determinar los días control sobre la enfermedad ejercidos por cada uno de los tratamientos en 2021.
- Analizar el costo de los días control de los tratamientos evaluados.
- Realizar un análisis económico de los tratamientos evaluados.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. LOCALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

Esta investigación se realizó en la Región IV de ANACAFE, Finca El Recreo, Municipio de Santa Rosa de Lima, Departamento de Santa Rosa, Guatemala, ubicada en las siguientes coordenadas geográficas latitud 9°17'55,2" E, longitud 14°24'59,6" N y con una altitud sobre el nivel del mar de 1001,25 msnm, temperaturas promedio anual durante los últimos 10 años de 24,68 °C, precipitaciones de 1960,76 mm anual y humedad relativa promedio de 77,95%. En la figura 14, se presenta el mapa de ubicación de la finca donde se realizaron las evaluaciones respectivas.



**Figura 14.** Ubicación del área de la evaluación (Elaboración propia a partir de imágenes de Google Earth).

### 4.2. HISTORIAL CLIMÁTICO EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN (2009-2018)



A continuación, se presenta el historial de las condiciones climáticas presentadas durante los últimos 10 años en el área de investigación (Santa Rosa); en la

tabla 5 podemos observar las temperaturas promedio, en la tabla 6 la precipitación y en la tabla 7, la humedad relativa promedio.

**Tabla 5. Historial de temperatura diaria promedio (°C) del 2009 al 2018 de la estación meteorológica Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa.**

Temperatura media (°C)														
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media	DT
2009	23,56	24,03	24,17	25,99	24,94	24,69	24,89	25,43	25,15	25,04	24,16	24,11	24,68	0,69
2010	23,45	25,16	26,04	26,45	21,22	24,77	24,37	23,98	23,56	24,44	24,06	22,93	24,20	1,39
2011	24,44	24,20	24,62	25,54	25,89	24,46	24,48	23,63	24,19	23,01	24,33	24,20	24,42	0,75
2012	16,45	24,74	25,31	25,84	24,95	24,41	25,61	24,41	24,60	24,47	24,40	24,58	24,15	2,47
2013	24,75	25,03	25,77	26,58	24,99	24,67	24,66	24,36	23,13	24,01	24,09	23,89	24,66	0,90
2014	23,48	24,32	25,66	26,03	24,99	24,43	26,03	24,85	23,82	23,72	24,47	23,93	24,64	0,88
2015	24,05	24,20	25,03	26,22	25,34	25,44	25,63	25,78	24,58	24,35	24,40	25,12	25,01	0,70
2016	24,48	24,91	26,16	26,89	26,35	24,80	25,23	24,97	24,25	24,81	24,55	24,83	25,19	0,83
2017	23,73	24,49	25,68	26,67	25,33	24,11	25,34	24,99	24,18	23,97	24,68	24,23	24,78	0,85
2018	23,80	24,89	25,98	25,91	25,38	24,21	26,27	25,35	24,65	24,21	25,38	24,55	25,05	0,79
<b>Promedio</b>	<b>23,22</b>	<b>24,60</b>	<b>25,44</b>	<b>26,21</b>	<b>24,94</b>	<b>24,60</b>	<b>25,25</b>	<b>24,78</b>	<b>24,21</b>	<b>24,20</b>	<b>24,45</b>	<b>24,24</b>	<b>24,68</b>	<b>0,75</b>
<b>DT</b>	<b>2,42</b>	<b>0,40</b>	<b>0,65</b>	<b>0,42</b>	<b>1,38</b>	<b>0,37</b>	<b>0,65</b>	<b>0,68</b>	<b>0,59</b>	<b>0,57</b>	<b>0,38</b>	<b>0,60</b>		

Nota: DT (desviación típica) Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología-INSIVUMEH, (2022).

**Tabla 6. Historial de precipitación mensual (mm) del 2009 al 2018 de la estación meteorológica Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa.**

Precipitación (mm)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
2009	0,04	5,80	0,70	48,00	349,90	380,70	168,70	155,50	287,10	134,10	103,80	18,80	1653,14
2010	0,00	0,60	9,90	135,80	498,60	432,00	493,90	556,80	563,60	68,80	1,70	0,00	2761,70
2011	0,00	44,80	28,60	22,60	228,00	607,40	361,90	364,80	202,60	789,00	15,00	0,00	2664,70
2012	0,00	21,40	6,40	53,00	426,50	256,50	113,60	478,40	219,40	247,00	5,80	0,20	1828,20
2013	0,13	0,00	58,30	5,70	223,60	285,90	207,40	448,40	361,00	290,90	35,10	15,30	1931,73
2014	0,79	1,90	4,00	52,20	326,70	382,40	33,40	226,90	355,00	301,40	40,20	0,00	1724,89
2015	0,00	0,00	36,20	58,60	229,40	159,30	184,70	138,40	243,00	429,90	97,00	17,40	1593,90
2016	0,00	0,00	10,50	25,20	675,30	392,60	214,90	231,20	389,60	226,20	23,50	25,00	2214,00
2017	0,11	0,00	36,10	56,10	223,20	332,90	171,30	211,00	389,60	149,30	4,60	6,00	1580,21
2018	0,01	6,80	0,00	25,50	347,90	473,00	42,50	230,60	274,30	236,30	17,20	1,00	1655,11
<b>Promedio</b>	<b>0,11</b>	<b>8,13</b>	<b>19,07</b>	<b>48,27</b>	<b>352,91</b>	<b>370,27</b>	<b>199,23</b>	<b>304,20</b>	<b>328,52</b>	<b>287,29</b>	<b>34,39</b>	<b>8,37</b>	<b>1960,76</b>
<b>DT</b>	<b>0,24</b>	<b>14,48</b>	<b>19,61</b>	<b>35,57</b>	<b>147,46</b>	<b>123,52</b>	<b>139,41</b>	<b>146,68</b>	<b>107,61</b>	<b>202,89</b>	<b>37,02</b>	<b>9,73</b>	

Nota: DT (desviación típica) Fuente: INSIVUMEH, (2022)

**Tabla 7. Historial de humedad relativa diaria promedio (%) del 2009 al 2018 de la estación meteorológica Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa.**

Historial de humedad relativa diaria promedio (%) últimos 10 años														
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media	DT
2009	72,65	67,11	67,26	70,00	80,94	82,50	79,71	85,16	85,97	85,10	81,60	81,19	78,27	7,04
2010	74,48	75,36	76,39	76,13	76,36	83,93	83,90	87,13	88,53	80,13	77,33	74,81	79,54	5,04
2011	70,55	71,89	67,23	79,33	76,77	81,07	83,00	84,94	84,70	87,03	78,10	74,97	78,30	6,25
2012	62,14	72,21	68,97	74,07	83,77	84,23	79,42	82,90	81,63	82,84	75,97	76,26	77,03	6,83
2013	68,16	68,29	62,03	68,53	81,74	83,10	82,65	82,94	87,67	85,97	80,80	76,81	77,39	8,44
2014	72,68	72,79	72,16	73,13	81,84	84,73	74,84	80,16	85,77	84,29	73,90	70,61	77,24	5,66
2015	65,48	67,64	69,77	73,00	77,77	79,67	78,00	77,23	83,03	86,13	83,37	81,13	76,85	6,57
2016	73,74	64,31	73,00	73,30	79,71	84,77	80,58	82,55	85,27	82,29	78,07	74,48	77,67	6,11
2017	73,10	72,18	70,48	69,63	81,32	86,47	81,00	84,16	86,67	87,42	79,13	74,74	78,86	6,61
2018	71,48	72,21	72,06	74,97	83,10	85,63	76,29	82,10	84,40	85,26	78,83	73,55	78,32	5,54
<b>Promedio</b>	<b>70,45</b>	<b>70,40</b>	<b>69,94</b>	<b>73,21</b>	<b>80,33</b>	<b>83,61</b>	<b>79,94</b>	<b>82,93</b>	<b>85,36</b>	<b>84,65</b>	<b>78,71</b>	<b>75,86</b>	<b>77,95</b>	<b>5,81</b>
<b>DT</b>	<b>4,00</b>	<b>3,37</b>	<b>3,93</b>	<b>3,25</b>	<b>2,59</b>	<b>2,08</b>	<b>2,93</b>	<b>2,77</b>	<b>2,06</b>	<b>2,29</b>	<b>2,75</b>	<b>3,25</b>		

Nota: DT (desviación típica) Fuente: INSIVUMEH, (2022)

### 4.3. MATERIAL EXPERIMENTAL

#### 4.3.1. Catuaí rojo.

La plantación en la que se realizaron las evaluaciones es de *C. arabiga* cv Catuaí. Esta variedad es el resultado del cruzamiento artificial de las variedades Mundo Novo y Caturra, realizado en Brasil por el Instituto Agronómico (IAC) en el año 1949 (Word Coffee Research-WCR, 2019). La introducción del cv Catuaí a Guatemala se realizó alrededor de 1970. Se adapta bien en altitud de 609 a 1371 msnm en la Boca Costa; de 1067 a 1675 msnm en la zona central, oriental y norte del país. Catuaí es una variedad de porte bajo, pero un poco más alta que Caturra, con una altura promedio de 2,25 metros, las ramas laterales forman un ángulo cerrado de 45 grados con el tallo principal, con entrenudos cortos (Velásquez, 2019). Las hojas nuevas o brotes son de color verde claro, las hojas adultas tienen una forma redondeada y de color verde oscuro. Es una variedad muy vigorosa, que desarrolla mucho crecimiento lateral con ramas secundarias, conocidas como “palmillas”. Esta variedad produce frutos de color rojo, tamaño de grano mediano, tiene alta capacidad de producción. En condiciones óptimas de clima y suelo, podría llegar a producir 3591 kg·ha<sup>-1</sup> de café pergamino. La maduración de los frutos es tardía y no se desprenden fácilmente de las bandolas, lo que es una ventaja para las zonas donde la maduración coincide con períodos de lluvias intensas. Produce una excelente calidad de

bebida. Requiere de una gestión adecuada y oportuna de las diferentes actividades agronómicas (Velásquez, 2019). Esta variedad puede tener una densidad promedio por hectárea de 5000 a 6000 plantas, su primera producción se da a los 3 años después de ser establecida en campo, es susceptible a nematodos (*Meloidogyne* sp.), antracnosis (*Colletotrichum kahawae*) y roya del café (*Hemileia vastatrix*) (WCR, 2019).

La plantación que se utilizó era de 7 años de edad, con un distanciamiento de 1 m entre plantas y 2 m entre calles (5000 plantas·ha<sup>-1</sup>). Se había realizado en 2018 una recepa o poda baja de aproximadamente 0,30 m de altura, cuyo objetivo fue renovar el material vegetativo; al momento de iniciar los ensayos, en 2019, las plantas tenían 1 año de haberse realizado la poda respectiva. La parcela de ensayo está establecida bajo un sistema de producción con sombra de aproximadamente 50-60%; dentro de las especies establecidas está el banano (*Musa sapientum*) como sombra temporal con un distanciamiento de plantación de 6 m x 6 m y plantas de sombra permanente conocidas como cuje (*Inga* spp) con distanciamiento de 12 m x 12 m. El tipo de suelo es franco arcilloso, un porcentaje de materia orgánica de 4,34%, un pH de 6,08 y con bajos contenidos de fósforo, magnesio, azufre y boro, según los análisis de suelo realizados por los laboratorios de ANACAFE.

#### **4.3.2. Productos fitosanitarios**

**Cobre (Cu).** El producto comercial utilizado fue Oxicob 50 WP, un fungicida-bactericida clásico a base de oxiclورو de cobre (Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl); de acción preventiva, amplio campo de actividad y buena persistencia

**Silicio (Si).** El producto comercial utilizado fue Botrysec/Silisec 98 WP, un compuesto natural 100% a base de dióxido de silicio micronizado (SiO<sub>2</sub>). El tamaño de las partículas es de 7-9 μm.

**Epoxiconazole (Epoxi).** El producto comercial utilizado fue Opus 12,5 EC. El epoxiconazole (Fungicide Resistance Action Community-FRAC code 3) es un fungicida sistémico que pertenece a la familia de los triazoles. Tiene acción protectora y erradicante; inhibe la biosíntesis del ergosterol de los hongos ascomicetos y basidiomicetos.

En la tabla 8, se presenta un resumen con la descripción de los tratamientos evaluados, sus nombres comerciales, los ingredientes activos, las concentraciones de los mismos y su dosis respectiva.

**Tabla 8.** Descripción de los tratamientos y dosis evaluados.

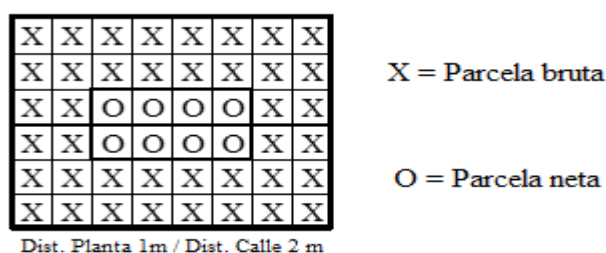
Nombre del Producto	Ingrediente Activo	Abrev.	Conc.	Casa Comercial	Dosis·ha <sup>-1</sup>
Oxicob 50 WP	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl	Cu	50%	Adama	2 kg
Botrysec/Silisec 98 WP	SiO <sub>2</sub>	Si	98%	AGRI-nova	0,5 – 1 kg
Opus 12,5 SC	Epoxiconazole	Epoxi	12,5%	BASF	0,5 L

#### 4.4. Métodos

##### 4.4.1. Diseño de los ensayos

Cada una de las repeticiones de cada unidad experimental contó con 48 plantas de café, de las cuales únicamente se tomaron datos de las 8 plantas centrales durante toda la evaluación para evitar el efecto borde; el resto fueron tratadas, pero no se tomaron datos, tal como se muestra en la figura 15.

Área: 120 m<sup>2</sup>



**Figura 15.** Diseño de la unidad experimental.

**Ensayos del Año 2019.** El diseño de parcelas de ensayo se hizo en bloques completamente al azar con 3 tratamientos y un testigo tratado con agua, cada tratamiento contó con 5 bloques. Se realizaron 3 aplicaciones con intervalos de 30 días entre cada aplicación, tomado en cuenta que el ciclo vida del patógeno es de unos 30 días y que se realiza la última aplicación al menos un mes antes de iniciar la cosecha del fruto. Las aplicaciones de los tratamientos fueron realizadas en los meses de septiembre, octubre y noviembre ya que en el primer año tras la poda de rejuvenecimiento no hay cosecha. En la tabla 9, se presentan los datos meteorológicos presentados durante la evaluación del año 2019.

**Tabla 9.** Datos meteorológicos medios en la estación Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa (año 2019).

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	24,26	25,02	25,97	25,96	25,64	25,57	25,65	24,64	24,02	23,71	24,83	24,49
Precipitación (mm)	0,00	44,00	0,00	36,70	184,70	149,40	146,50	252,70	468,10	256,70	22,80	9,10
Humedad relativa (%)	71,90	71,50	69,87	74,40	82,00	81,50	81,39	84,23	87,40	90,35	83,70	80,16

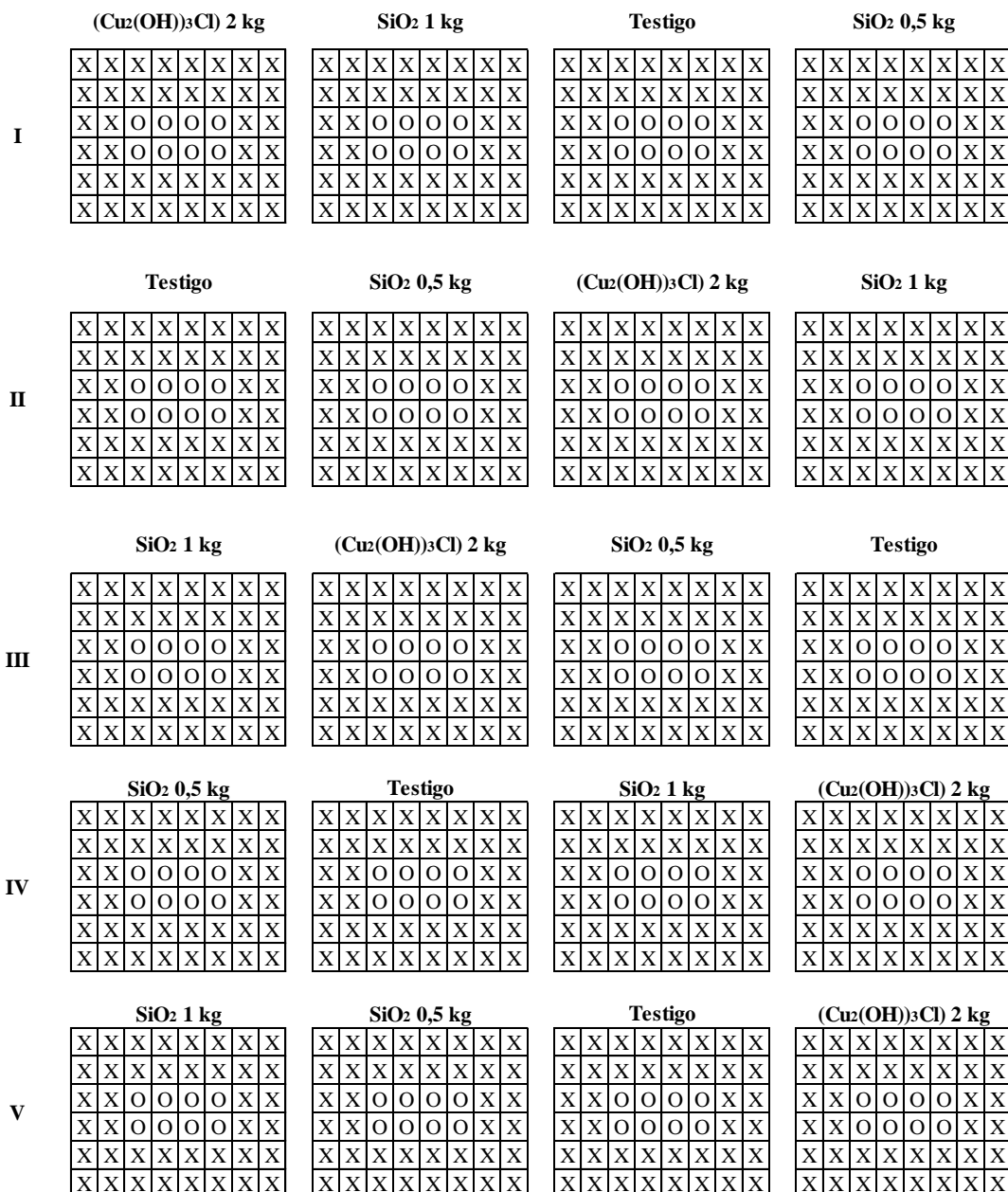
Fuente: INSIVUMEH, (2022)

En la tabla 10, se describen los tratamientos y dosis utilizadas durante la investigación realizada en el año 2019.

**Tabla 10.** Descripción de los tratamientos y dosis evaluados en 2019.

Tratamiento	Producto	Ingrediente activo	Dosis·ha <sup>-1</sup>	Abrev.
1	Testigo	Sin aplicación	-	-
2	Oxicob 50 WP	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl	2 kg	Cu2
3	Botrysec/Silisec 98 WP	SiO <sub>2</sub>	0,5 kg	Si05
4	Botrysec/Silisec 98 WP	SiO <sub>2</sub>	1 kg	Si1

En la figura 16, se presenta la forma como fueron distribuidas las unidades experimentales de cada tratamiento durante el año 2019.



**Figura 16.** Distribución de las unidades experimentales (año 2019).

**Ensayos del año 2020.** Durante este año se contó con 5 tratamientos y 4 repeticiones; sobre el mismo diseño de 2019 se sustituyó una repetición con los nuevos tratamientos. Se incluyó, por recomendación de ANACAFE, el fungicida de síntesis que mejores resultados ha dado para el control de la enfermedad, epoxiconazole, en combinación con SiO<sub>2</sub> a la dosis más baja, con el objetivo de reducir la cantidad de ingrediente activo por unidad de área. Al igual que el año anterior se realizaron 3 aplicaciones con intervalos de 30 días entre cada aplicación. Las aplicaciones de los

tratamientos fueron realizadas en los meses de julio, agosto y septiembre. En la tabla 11, se presentan los datos meteorológicos del año 2020.

**Tabla 11.** Datos meteorológicos medios de la estación Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa (año 2020).

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	24,48	25,50	26,60	27,96	26,04	24,53	24,73	24,69	23,92	24,81	23,81	24,36
Precipitación (mm)	00,00	00,00	0,60	20,60	284,80	333,33	281,10	362,40	367,10	319,90	98,30	0,10
Humedad relativa (%)	80,16	75,79	72,84	74,60	85,10	90,37	88,45	88,45	92,17	94,10	87,33	83,03

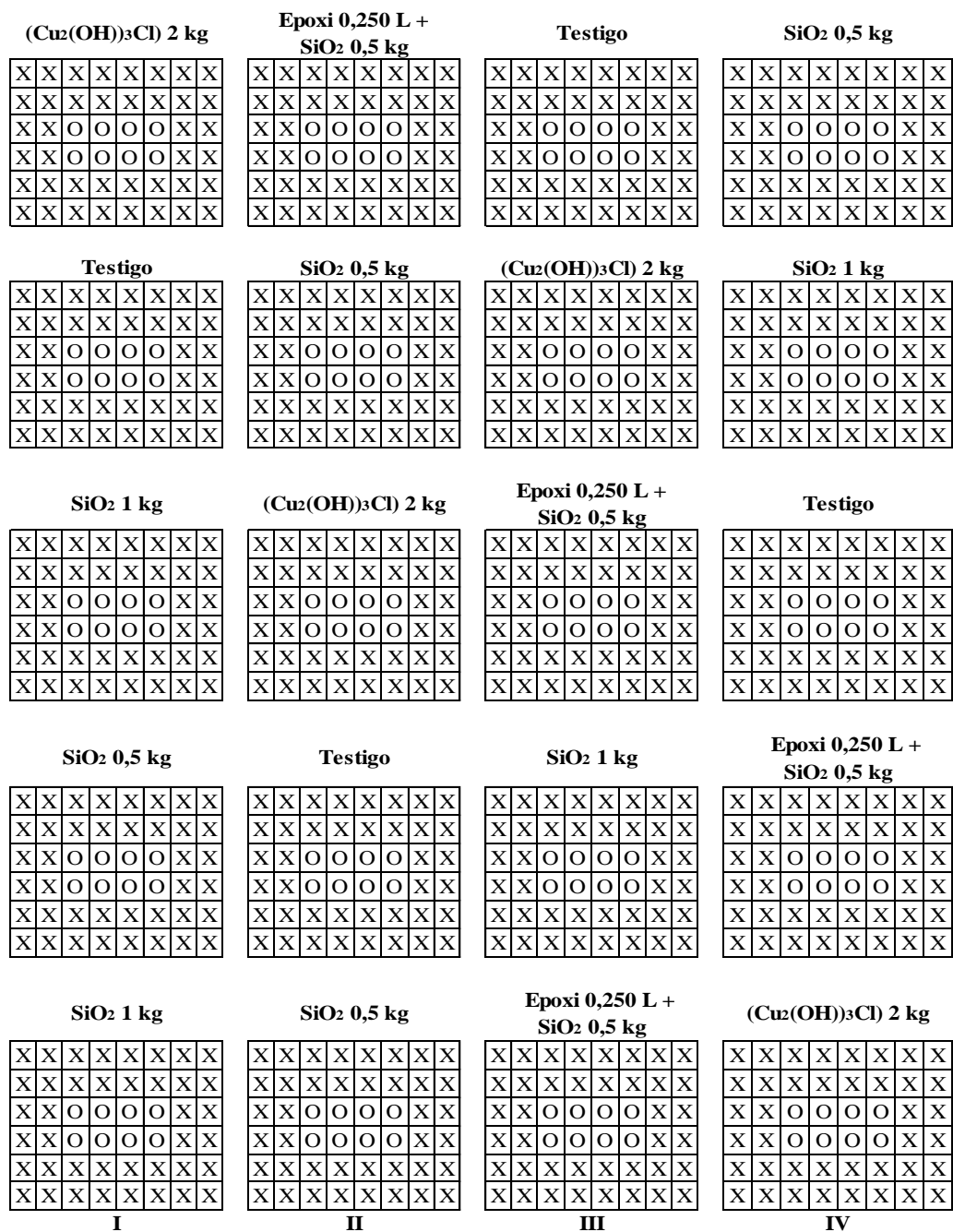
Fuente: INSIVUMEH, (2022)

En la tabla 12, se describen los tratamientos y dosis utilizadas durante la investigación realizada en el año 2020.

**Tabla 12.** Descripción de los tratamientos y dosis evaluados en 2020.

Tratamiento	Producto	Ingrediente activo	Dosis·ha <sup>-1</sup>
1	Testigo	Sin aplicación	-
2	Oxicob 50 WP	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl	2 kg
3	Botrysec/Silisec 98 WP	SiO <sub>2</sub>	0,5 kg
4	Botrysec/Silisec 98 WP	SiO <sub>2</sub>	1 kg
5	Opus 12,5 EC + Botrysec/Silisec 98 WP	Epoxiconazole + SiO <sub>2</sub>	0,250 L + 0,5 kg

En la figura 17, se presenta la forma como fueron distribuidas las unidades experimentales de cada tratamiento durante el año 2020, en el que, como se ve en la figura hubo un error en la adjudicación de las parcelas al nuevo tratamiento solicitado por ANACAFE (Botrysec 98 WP a 0,5 kg (SiO<sub>2</sub>) + Opus 12,5 EC a 0,250 L/Ha<sup>-1</sup> (epoxiconazole).



**Figura 17.** Distribución de las unidades experimentales (año 2020).

**Ensayos del año 2021.** En 2021 se hizo un nuevo complemento en el diseño del ensayo para verificar el efecto del SiO<sub>2</sub> en combinación con otros productos como el Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl y el fungicida sistémico de síntesis química, por lo que se establecieron 8 tratamientos distribuidos al azar en 3 bloques; además, este año, la primera aplicación se realizó al detectar presencia de inóculo en la plantación y la segunda cuando la plantación superó el umbral de daño establecido por ANACAFE (5% de

severidad), con esto se pretendía verificar los días control que los tratamientos podían ejercer en la evaluación. Las monitorizaciones en 2021 se realizaron con un intervalo de 7 días (19 en total), porque se quería verificar además a los cuántos días de aplicados los productos, estos producían variaciones en la cantidad de fenoles totales. La tercera aplicación se realizó con intervalo de 4 semanas. Las aplicaciones de los tratamientos fueron realizadas en los meses de julio, agosto y septiembre. En la tabla 13, se presentan los datos meteorológicos presentados durante la evaluación del año 2021.

**Tabla 13.** Datos meteorológicos medio de la estación Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa (año 2021).

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	24,27	24,25	25,33	26,40	25,31	24,04	25,02	24,38	24,24	25,33	24,06	24,78
Precipitación (mm)	16,30	5,70	3,20	103,50	292,60	389,10	183,40	382,60	376,70	285,80	21,50	8,37
Humedad relativa (%)	76,77	74,00	73,90	75,10	83,10	89,90	85,16	87,77	89,90	92,60	80,43	82,60

Fuente: INSIVUMEH, (2022)

En la tabla 14, se describen los tratamientos y dosis utilizadas durante la investigación realizada en el año 2021.

**Tabla 14.** Descripción de los tratamientos y dosis evaluados en 2021.

Tratamiento	Producto comercial	Ingrediente activo	Dosis·ha <sup>-1</sup>
1	Testigo	Sin aplicación	-
2	Oxicob 50 WP	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl	2 kg
3	Botrysec/Silisec 98 WP	SiO <sub>2</sub>	0,5 kg
4	Botrysec/Silisec 98 WP	SiO <sub>2</sub>	1 kg
5	Opus 12,5 EC + Botrysec/Silisec 98 WP	Epoxiconazole + SiO <sub>2</sub>	0,250 L + 0,5 kg
6	Opus 12,5 EC + Oxicob 50 WP	Epoxiconazole + Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl	0,250 L + 1 kg
7	Botrysec/Silisec 98 WP + Oxicob 50 WP	SiO <sub>2</sub> + Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl	0,5 kg + 1 kg
8	Opus 12,5 EC	Epoxiconazole	0,5 L

En la figura 18, se presenta la forma como fueron distribuidas las unidades experimentales de cada tratamiento durante el año 2021

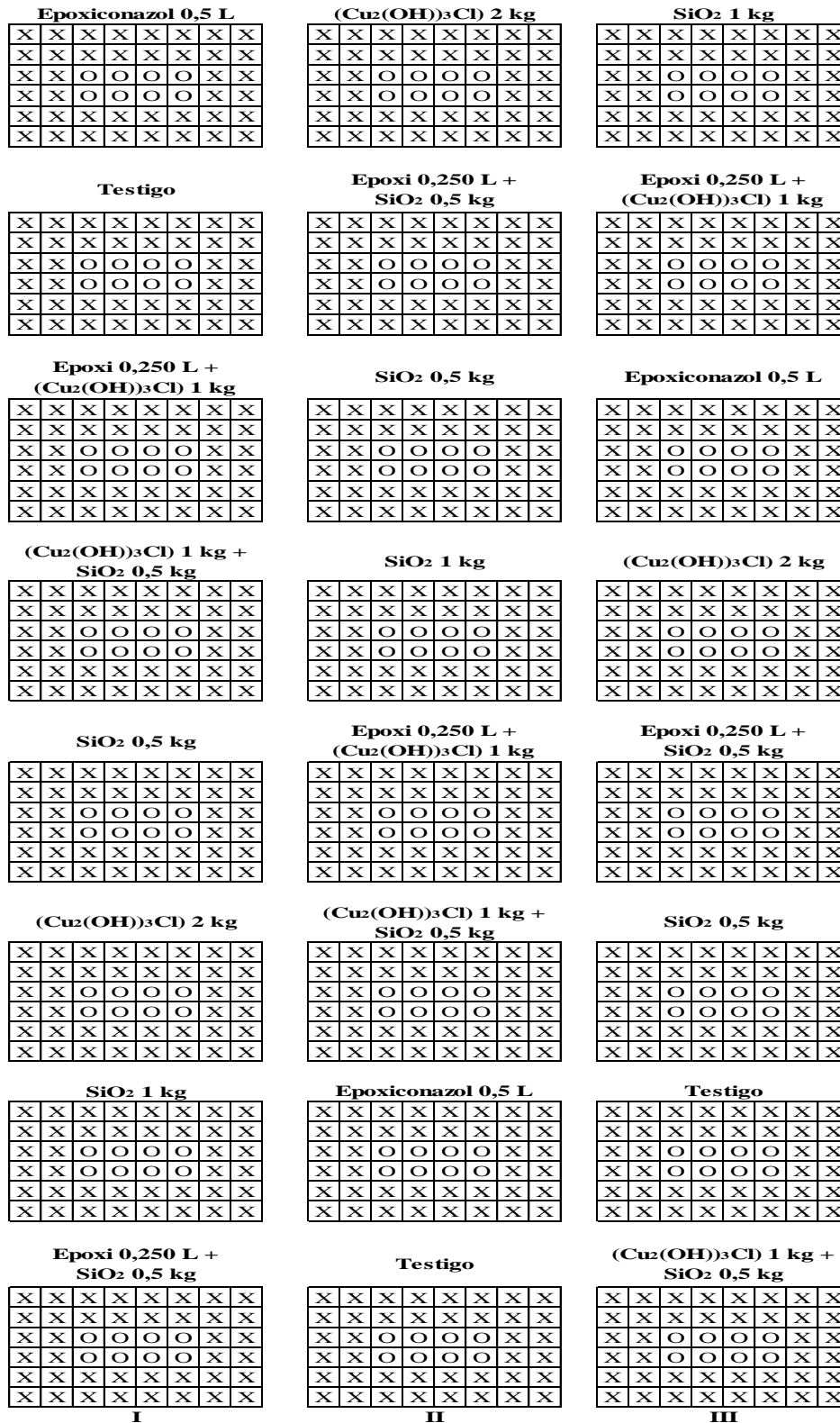


Figura 18. Distribución de las unidades experimentales (año 2021).

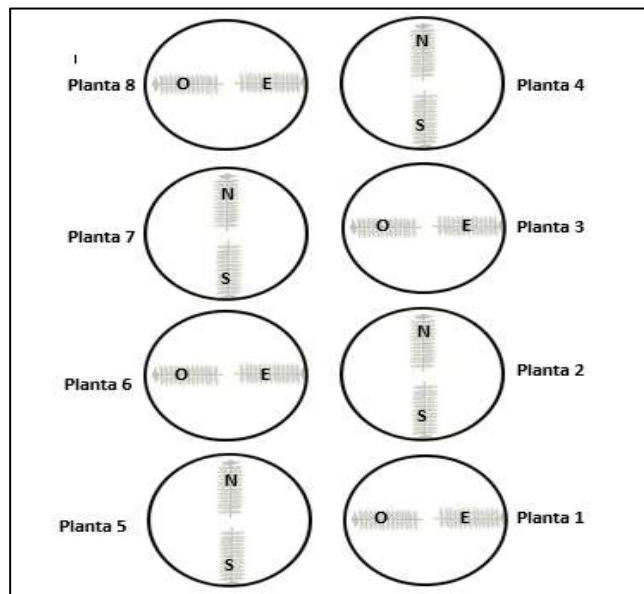
#### 4.4.2. Fase de campo

Se realizó una evaluación y toma de muestras antes de la primera aplicación para poder determinar la homogeneidad de la incidencia y severidad de la enfermedad antes de iniciar los tratamientos cada año y evaluaciones antes de cada nuevo tratamiento para registrar su efecto.

**Incidencia (%).** Para determinar la incidencia, se realizaron evaluaciones en el estrato medio de las 8 plantas que conforman la parcela neta, tal como se muestra en la figura 19, donde se seleccionaron 2 bandolas (ramas) por cada planta en dirección de los puntos cardinales (norte-sur y este-oeste), como se muestra en la figura 20.



**Figura 19.** Estrato medio de la planta de café donde se seleccionaron las bandolas para monitorización de roya del café.



**Figura 20.** Identificación de bandolas por planta para monitorización.

En cada planta se monitorizaron el total de hojas presentes en cada bandola seleccionada (16 bandolas). Para poder determinar la incidencia de la roya en la parcela experimental, se utilizó la siguiente fórmula (Brinate *et al.*, 2015):

$$\text{Incidencia (\%)} = \frac{\text{Total de hojas con roya}}{\text{Total de hojas en bandola}} \times 100$$

**Severidad (%).** El procedimiento de monitorización fue el mismo que en el caso anterior, pero para cada hoja con roya se evaluó la superficie afectada. Para analizar los datos recabados en el campo y la determinación de las variables del estudio, se utilizó la escala de severidad (figura 21), de la Dirección General de Sanidad Vegetal (DGSV)- Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria (SINAVEF) Laboratorio Nacional de Referencia Epidemiológica Fitosanitaria (LANREF) (2019).

Los datos para la severidad fueron procesados mediante la fórmula de Townsend y Heuberger (1943):

$$P = \left( \frac{\sum n * v}{CM * N} \right) * 100$$

Donde

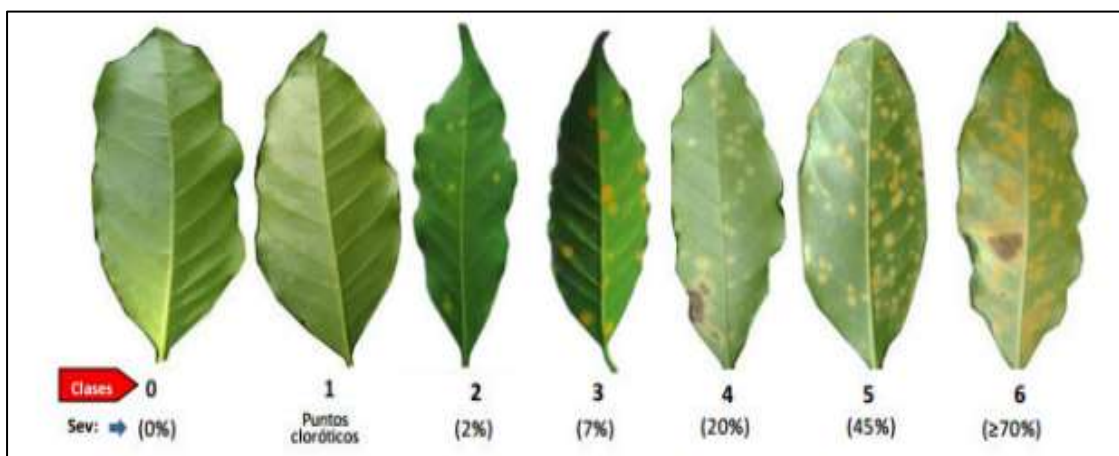
P- media ponderada de severidad

n – número de hojas por cada clase en la escala

v – Valor numérico de cada clase

N – número total de hojas en la muestra

CM – categoría mayor



**Figura 21.** Escala de severidad Roya de Café (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: DGSV-Sinavef-Lanref, 2019).

**Defoliación (%).** Para determinar este parámetro y excluir defoliación por otros motivos, en cada muestreo se realizó el cómputo total de hojas caídas de cada bandola que en el muestreo anterior estaban afectadas por la enfermedad, en todas las unidades experimentales establecidas durante cada año.

$$Defoliación (\%) = \frac{\text{Total de hojas defoliadas por roya}}{\text{Total de hojas en bandola}} \times 100$$

**Área bajo la curva del progreso de severidad de la enfermedad (ABCPSE).** Para comparar las diferencias entre los tratamientos a partir de los valores de severidad de la enfermedad, se realizó el cálculo de la ABCPSE. Este parámetro incorpora la velocidad de avance de la enfermedad y la severidad en un sólo valor (Simko y Piepho, 2012).

$$ABCPSE = \sum_{i=i}^{n-1} \frac{(Y_i + Y_{i+1})}{2} * (T_i + T_{i+1})$$

donde,

$Y_i$  - Proporción del tejido afectado en la observación  $i$

$T_{i+1}-T_i$  - Tiempo en días entre dos lecturas

$n$  - Número total de observaciones

#### ***4.4.3. Estudio epidemiológico.***

Para estudiar las epidemias de roya en esta zona y cómo las modifican los tratamientos evaluados, haremos uso de varios modelos empíricos basados en las curvas de crecimiento o avance de la enfermedad respecto al tiempo (tabla 15).

**Tabla 15.** Ecuaciones para la transformación de los datos básicos correspondientes a cada uno de los modelos epidemiológicos temporales.

<b>Función</b>	<b>Transformación</b>
Exponencial	$Y'_i = \ln Y_i$
Monomolecular	$Y'_i = \ln(1/(1-Y_i))$
Logística	$Y'_i = \ln(Y_i/(1-Y_i))$
Gompertz	$Y'_i = -\ln(-\ln(Y_i))$

Y<sub>i</sub>: tanto por uno incidencia para t=i

Los datos de las parcelas testigo para incidencia y severidad entre 2019 y 2021, se utilizarán para hacer una comparación del desarrollo de las epidemias en la parcela de estudio y ver si hay algún modelo epidemiológico que se ajuste mejor que otros y con cierta estabilidad independientemente del año. También se verá el efecto de los tratamientos en las CPE y en los modelos que mejor las describan.

La información utilizada para el ajuste a modelos epidemiológicos de los datos medios de incidencia y severidad de las parcelas testigo que aparecerán en resultados en las tablas 20, 22, 31, 33 y parte de las tablas 42 y 44. Los muestreos corresponden a julio, agosto, septiembre y octubre en 2020 y 2021 y a septiembre, octubre, noviembre y diciembre en 2019, año en el que al no haber cosecha se protegió la planta en época más tardía y con la infección ya declarada en un ambiente de máximo riesgo por lluvias.

**Tabla 16.** Resumen de datos utilizados para el ajuste de modelos epidemiológicos para el testigo en cada año (datos de las tablas 20, 22, 31, 33, 42 y 44 de resultados).

<b>Año</b>	<b>Medida</b>	<b>Incidencia%</b>	<b>Severidad%</b>
2019	Septiembre	14,96	2,47
	Octubre	29,4	7,71
	Noviembre	43,39	13,17
	Diciembre	51,32	18,8
2020	Julio	0,00	0,00
	Agosto	4,25	0,68
	Septiembre	11,18	2,02
	Octubre	43,48	10,73
2021	Julio	7,73	1,38
	Agosto	18,87	3,70
	Septiembre	44,96	8,55
	Octubre	64,54	12,93

En 2021 se tomaron datos de incidencia, y severidad y defoliación con mayor frecuencia, también entre tratamientos, por lo que se dispone de CPE con toma de datos semanal. Estos datos permiten comparar ajuste de modelos según frecuencias de muestreo: semanales, quincenales y mensuales lo que supone trabajar con 5, 10 o 19 datos.

**Tabla 17.** Valores de Severidad (S) e Incidencia (I) en 2021 (en tanto por 1) con datos de los muestreos entre julio y noviembre para los distintos tratamientos: mensuales (5 datos), quincenales (10 datos) y semanales (19 datos).

Tratamiento	Julio					Agosto				Septiembre				Octubre			Noviembre		
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19
Testigo	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,10	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18
Cu2	0,02	0,01	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	0,08	0,11	0,12	0,13	0,13	0,15	0,15	0,15	0,16	0,17
Si05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10
Si1	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,05	0,07	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14
Epoxi	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07

Tratamiento	Julio					Agosto				Septiembre				Octubre			Noviembre		
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	I19
Testigo	0,08	0,12	0,18	0,19	0,19	0,21	0,21	0,30	0,45	0,45	0,60	0,62	0,65	0,67	0,72	0,77	0,78	0,79	0,81
Cu2	0,08	0,05	0,15	0,15	0,12	0,15	0,19	0,30	0,37	0,42	0,57	0,60	0,64	0,69	0,74	0,73	0,77	0,79	0,80
Si05	0,08	0,06	0,09	0,09	0,05	0,06	0,04	0,11	0,23	0,30	0,33	0,36	0,39	0,42	0,46	0,50	0,52	0,54	0,56
Si1	0,01	0,02	0,05	0,04	0,04	0,05	0,10	0,21	0,31	0,41	0,48	0,50	0,52	0,55	0,56	0,58	0,60	0,62	0,62
Epoxi	0,06	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,08	0,19	0,25	0,26	0,34	0,36	0,36	0,37	0,38	0,39	0,41	0,41

#### 4.4.4. Estudio económico

Para evaluar el impacto económico de los tratamientos realizados se hizo un estudio de días control previo al estudio de costes y beneficios.

**Días control (DC).** Se contabilizaron los días en los que la plantación superó el umbral de daño establecido por ANACAFE (5% de severidad) en cada una de las repeticiones de cada tratamiento durante el ensayo en 2021. Las monitorizaciones se realizaron con un intervalo de 7 días y para determinarlos se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Días control} = \frac{\text{DCn1} + \text{DCn2} + \text{DCn3}}{\text{No. de bloques o repeticiones}}$$

Donde:

n=bloque o repetición

**Costo días control.** Para poder comparar el costo día control de cada uno de los tratamientos, se determinó el costo de cada uno de los fungicidas evaluados por hectárea. Para poder determinar este parámetro, se utilizó la siguiente formula:

$$\text{Costo días control} = \frac{\text{Costo tratamiento por hectárea}}{\text{total días control}}$$

**Análisis económico.** La viabilidad de cada uno de los tratamientos se determinó mediante un análisis de rentabilidad y beneficio/costo para la producción del año 2021, utilizando los gastos totales realizados e ingresos percibidos por la venta del grano del café. Para determinar la viabilidad de la evaluación, se determinaron los siguientes parámetros:

$$\text{Razón beneficio/costo: } \frac{\text{Beneficios netos}}{\text{Costos totales}}$$

$$\text{Rentabilidad: } \frac{\text{Ganancias}}{\text{Egresos}} \times 100$$

#### **4.4.5. Muestreos de suelo y hojas**

##### **4.4.5.1. Determinaciones a nivel de campo**

**Suelos.** En el año 2019, se realizó un análisis de suelo al inicio de la evaluación (9 de junio) para determinar los niveles de silicio presentes, se colectó una sub muestra de 200 gramos por cada unidad experimental a una profundidad de 0,30 m en cada una de ellas (5 en total), estas sub muestras se mezclaron entre sí para luego hacer una sola muestra unificada de 1 kg por cada tratamiento, dichas muestras fueron colocadas en sobre de papel y fueron enviadas a los laboratorios de la Asociación Nacional del Café, para el análisis del contenido de silicio a nivel de suelo antes de iniciar la evaluación.

**Hojas.** En el año 2019, se colectaron un total de 80 hojas al azar en bandolas que no habían sido seleccionadas para la toma de datos, este procedimiento se realizó en cada uno de los tratamientos (2 hojas por planta x 8 plantas x 5 repeticiones) las cuales fueron unificadas para hacer un solo análisis de laboratorio; del total de hojas colectadas, 40 fueron utilizadas para los análisis de contenido de silicio y las otras 40 para los análisis de contenido de fenoles totales, la toma de datos para este año se realizó en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre respectivamente.

En el año 2020, se realizó el análisis de contenido de silicio durante todo el año y el contenido de fenoles totales únicamente se verificó durante los meses que se realizaron las aplicaciones de los tratamientos, por lo que la toma de muestras se dividió en 2 partes.

- 1) Se colectaron un total de 32 hojas por cada tratamiento en los meses de enero a junio y de noviembre a diciembre, las cuales fueron unificadas para realizar los análisis de contenido de silicio respectivos (1 hoja x 8 plantas x 4 repeticiones).
- 2) En los meses de julio a octubre, meses en los que se realizó la aplicación de los tratamientos, se colectaron un total de 96 hojas por tratamiento (3 hojas por planta x 8 plantas x 4 repeticiones), las cuales fueron unificadas para realizar un solo análisis de laboratorio, del total de hojas, 48 hojas fueron utilizadas para los análisis de contenido de silicio y las otras 48 para los análisis de expresión de fenoles totales.

En el año 2021, el análisis de contenido de silicio únicamente se verificó al inicio y al final de la evaluación (1 muestra por repetición de cada tratamiento en cada muestreo) y para el análisis de fenoles totales se realizó una muestra por cada repetición de cada tratamiento (3 muestras por tratamiento), las cuales fueron analizadas individualmente, por lo que el muestreo se dividió en 2 partes:

- 1) Para el análisis de contenido de silicio se tomaron muestras en los meses de julio y noviembre, se realizó la colecta de 48 hojas totales (2 hojas por planta x 8 plantas x 3 repeticiones).
- 2) Para el análisis de contenido de fenoles totales los muestreos se realizaron en los meses julio a noviembre, con intervalo de 7 días después de cada aplicación (4 muestreos después de cada aplicación), para este caso se colectaron un total de 48 hojas por cada repetición de cada tratamiento (2 hojas por planta x 8 plantas x 3 repeticiones).

#### **4.4.5.2. Determinaciones a nivel de laboratorio.**

Las muestras colectadas en campo fueron almacenadas en una hielera y fueron movilizadas a los laboratorios de ANACAFE. De las muestras colectadas en campo, se pesaron 50 g. para ser procesadas en laboratorio, y se almacenaron en un refrigerador a una temperatura de 8 °C. Las muestras sobrantes se almacenaron a temperatura ambiente. Al momento del procesado, se realizó un lavado de las hojas con agua del grifo y luego se realizó un segundo lavado con agua desmineralizada para eliminar todo residuo que alterara los resultados; después se deshidrataron por 24 horas a una temperatura de 70 °C y una vez secas se trituraron en un molino de cuchillas con un tamiz No. 40 (mesh) para realizar los análisis de contenido de silicio presente e inducción de fenoles totales en las plantas de cada tratamiento.

**Determinación de silicio en tejido vegetal.** El análisis de acumulación de silicio se realizó por medio de la digestión ácida con HCL 37% (ácido hidrociorhídrico) y HF al 48% (ácido fluorhídrico) y determinación por espectrometría de emisión óptica (OES) de plasma acoplado inductivamente (ICP). La extracción de silicio implica la reacción con HF para formar el anión del ácido hexafluorosilícico ( $H_2SiF_6$ ). Este anión queda disuelto en equilibrio en la solución, lo que hace posible su análisis por ICP. Se pesan 0,30 gramos de cada una de las muestras, las cuales son secadas en un tubo de policarbonato. Para el análisis se utiliza una solución total de 500 mL compuesta por 360 mL de agua desmineralizada, 100 mL de ácido fluorhídrico y 40 mL de ácido hidrociorhídrico. Primero se colocan 360 mL de agua desmineralizada en el recipiente, luego 100 mL de ácido fluorhídrico y posteriormente los 40 mL de ácido clorhídrico. Se homogeniza la solución y se añaden 20 mL de la solución por cada una de las muestras con la ayuda de una pipeta y se pasan a cada uno de los recipientes (blanco, control y muestra) y se deja por un tiempo aproximado de 1 hora en el agitador orbital dentro de la campana a 125 rpm. Después de pasada la hora, el contenido se pasa a través de un filtro marca Whatman 540 en forma de embudo. Después del filtrado de cada una de las muestras, con la ayuda de una pipeta, se pasan 10 mL del contenido filtrado a unos viales de 14 mL. A cada una de las muestras se le determina la absorbancia mediante el espectrofotómetro marca Pekin, Modelo Óptima 7300 DV serie 077C1012404 con una longitud de onda de 251 nm. Estos análisis fueron realizados en los laboratorios de ANACAFE (ANALAB).

**Determinación de fenoles totales.** Los polifenoles son un gran grupo de compuestos químicos que poseen anillos aromáticos con sustituyentes hidroxilos; estos compuestos son en su mayoría potentes antioxidantes por su estructura química (donador de H<sup>+</sup> o electrones). La cuantificación realizada se basa en una reacción colorimétrica de óxido-reducción. El agente oxidante utilizado fue el reactivo de Folin-Ciocalteu. Para la prueba se pesó 1 g de cada muestra y se le agregaron 10 mL de agua, calentándose a 60°C por 5 minutos; posteriormente se filtró y se realizaron distintas diluciones para cada muestra. Para el análisis se tomaron 25 µL de muestra y se le agregaron 50 µL de reactivo de Folin-Coicalteu y 200 µL de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; para el blanco se realizó el mismo procedimiento con 25 µL de agua. Se agitó en un vortex para placas durante 30 segundos y luego se incubó a temperatura ambiente protegidos de la luz durante 2 horas. Finalmente se leyó en lector de microplacas de 96 pozos a una longitud de onda de 630 nm. Estos análisis fueron realizados en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Laboratorio de Investigación de Productos Naturales –LIPRONAT- de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) con el apoyo y validación de los laboratorios de la Asociación Nacional del Café de Guatemala (ANALAB).

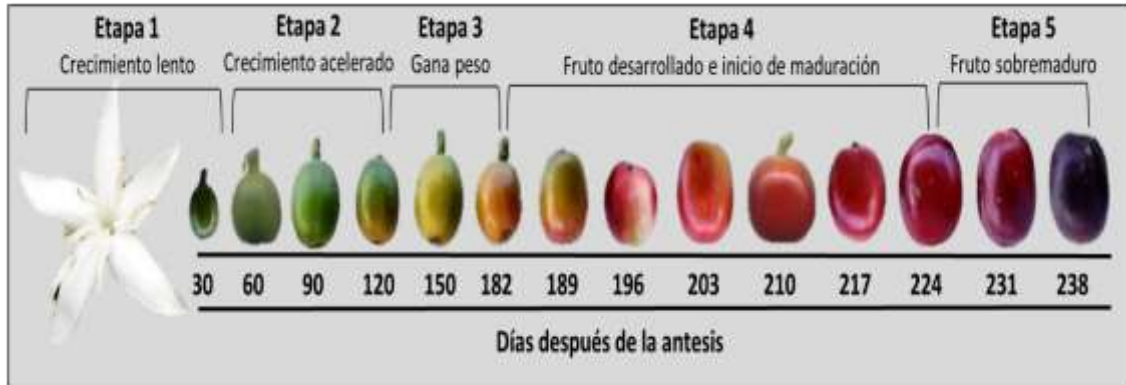
El cálculo de fenoles totales sería:

Concentración base curva (CBC)= Absorbancia – Intercepto/pendiente.

$$\text{mg equivalentes Ácido Gálico/g de material vegetal} = \frac{[(\text{CBC} * \text{Factor de dilución})]}{\text{Solución madre}}$$

#### **4.4.6. Producción**

La producción fue determinada al final del ciclo del cultivo. Se tomaron datos de producción en 2020 y 2021 porque en 2019, primer año tras la poda de rejuvenecimiento, no hay cosecha. Se realizaron 2 recolecciones de grano manualmente cuando el fruto alcanzó su nivel óptimo de maduración (desde 231 días después de la antesis) según la escala que se muestra en la figura 22. El valor de cosecha se expresa en kg·ha<sup>-1</sup>.



**Figura 22.** Grados de madurez del grano del café (Fotografías y elaboración propia con información de Carvajal *et al.*, 2011 y Arcila *et al.*, 2017).

#### 4.4.7. Calidad

La calidad del fruto fue determinada mediante un análisis organoléptico (perfil de taza y análisis de catación), según la escala de la Specialty Coffee Association of América (SCAA). Para analizar esta variable de estudio, se colectó 1 kg de granos de café maduro por cada tratamiento, los cuales fueron analizados en los laboratorios de ANACAFE. En tabla 18, se muestran las clasificaciones de calidad de taza de café según las puntuaciones obtenidas a nivel de laboratorio.

**Tabla 18.** Escala de clasificación del perfil de taza de grano de café.

Escala de Clasificación - Perfil de Taza		
Puntaje	Clasificación	Tipo
95-100	Sobresaliente	Especial
90-94		
85-89	Excelente	
80-84	Muy Bueno	
75-79	Usualmente de buena Calidad	No Especial
70-74	Calidad Promedio	
60-70	Rango Intercambio	
50-60	Rango Comercial	
40-50	Bajo Rango	
<40	Fuera de Rango	

#### 4.4.8. Análisis estadístico

Los datos de incidencia y severidad se sometieron a la comprobación de los supuestos de normalidad mediante la prueba de Kolmogorov – Smirnov (>50 datos). Al no resultar datos normales, los porcentajes de incidencia, severidad y defoliación fueron transformados mediante a formula de la  $\sqrt{(X + 0,5)}$  ; según Rojas (2022), ésta se utiliza cuando se poseen datos sesgados como los datos obtenidos en campo en nuestro caso, pues existen valores del 0% en las primeras fechas y por encima del 50% según avanzan la estación; después fueron sometidos a un análisis de varianza, para cada fecha de evaluación, para identificar las diferencias entre tratamientos y bloques, así como las interacciones entre éstas, mediante el Modelo Lineal General (MLG) Univariante, considerando como variables dependientes la incidencia, severidad y defoliación y como variables independientes los tratamientos y los bloques; en 2020 debido al error en la adjudicación de las parcelas, el tratamiento estadístico de ese año se hizo como si la asignación de tratamientos a las parcelas se hubiera hecho completamente al azar. Del mismo modo se analizaron los datos área bajo la curva del progreso de severidad de la enfermedad (ABCPSE) estimada a partir de los datos reales, y los datos de cosecha para el año 2021 y para los dos años en conjunto (2020-2021). En todos los casos de datos analizados mediante análisis de varianza (ANOVA), las medias de los tratamientos se separaron mediante la prueba de rango múltiple de Tukey b ( $p \leq 0,05$ ).

El programa de software EPIMODEL (Nutter *et al.*, 2014), ajusta los datos del progreso temporal de las enfermedades a cinco modelos de crecimiento de la población que se utilizan comúnmente en el análisis de epidemias de enfermedades de las plantas. Estos son los modelos Monomolecular, Exponencial, Logístico, Gompertz y también la regresión lineal con datos sin transformar. Los conjuntos de datos transformados según los modelos (tabla 15) se evalúan en base a los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y el error estándar para la estimación de y (EEEy) (Madden *et al.*, 2007). Las gráficas de residuos permiten detectar la presencia de patrones obvios, que identifican modelos que no explican adecuadamente la variación en los datos. Con toda esa información se estimará el modelo o modelos que mejor se ajusta/n a cada epidemia.

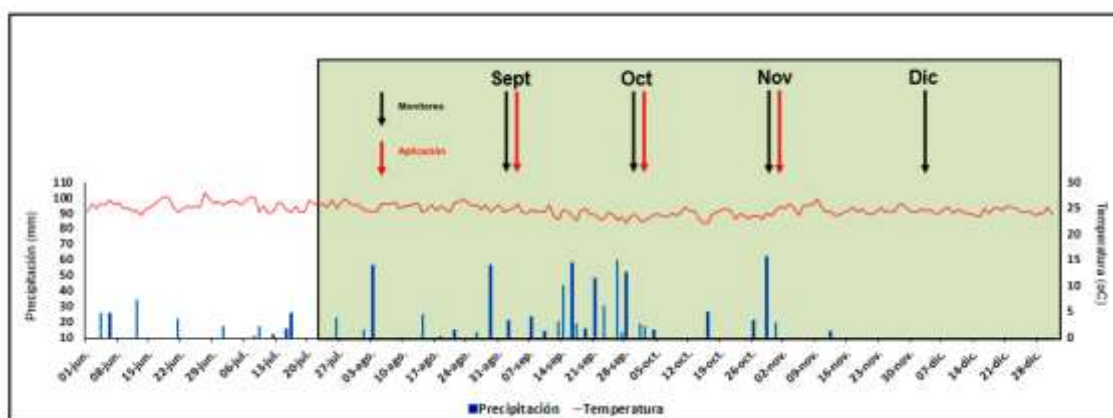
Para los análisis estadísticos se utilizó el software de dos paquetes estadísticos: SPSS (Statistical Package for Social Sciences) de IBM versión 27 e INFOSTAT v2018; y el programa EPIMODEL v3.4 (Nutter,*et al.*, 2014).

## 5. RESULTADOS

### 5.1. RESULTADOS ENSAYO AÑO 2019

#### 5.1.1 Condiciones meteorológicas

Durante la evaluación en el año 2019, el comportamiento de las condiciones climáticas presentó datos de temperatura muy similares al historial promedio registrado de los últimos 10 años anteriores a la evaluación (2009-2018), en agosto (24 °C), septiembre (24 °C), octubre (25 °C), noviembre (24 °C) y diciembre (24 °C), sin embargo la humedad relativa (>85%) y las precipitaciones (>1074,97 mm) estuvieron por arriba del historial promedio comparado con los meses de evaluación, dichas condiciones son ideales para el desarrollo de la roya del café. En la figura 23, se presentan el comportamiento de algunas condiciones climáticas como la temperatura y precipitación presentadas durante la evaluación en el año 2019.



**Figura 23.** Datos de precipitación (mm) y temperatura (°C) diarias en la segunda mitad de 2019 indicando fechas de evaluaciones y tratamientos en septiembre, octubre y noviembre (Elaboración propia con datos de INSIVUMEH).

#### 5.1.2. Incidencia



En la tabla 19, se presentan los resultados del análisis de varianza para la

**Tabla 19.** Análisis de varianza para incidencia de roya en el ensayo del año 2019.

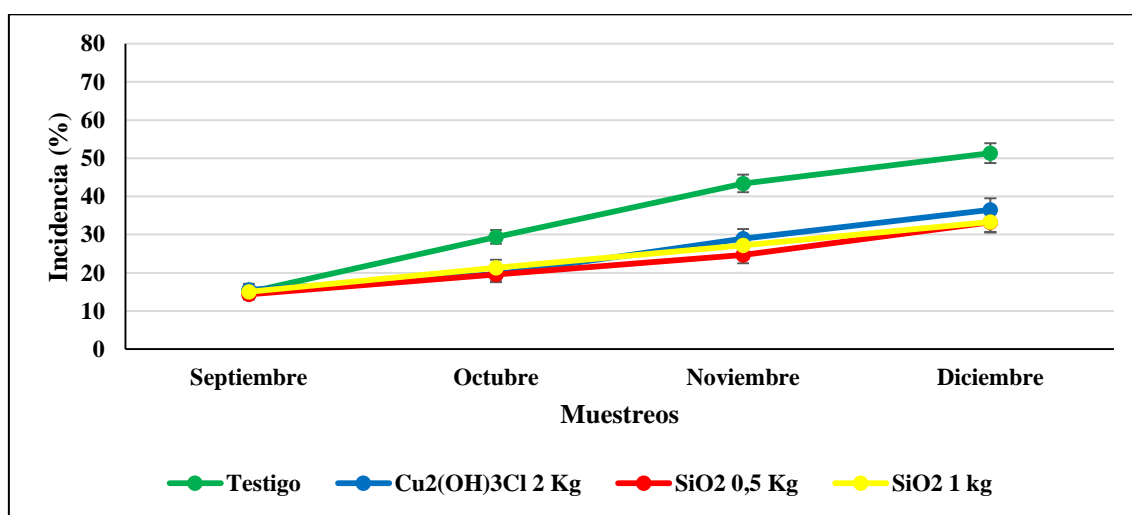
Fuente de variación	Df	Muestras				
		Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Tratamiento	3	F	0,101	7,037	15,589	12,741
		P<	0,959	0,000	0,000	0,000
Bloque	4	F	2,752	3,329	7,623	10,946
		P<	0,028	0,011	0,000	0,000
T*B	12	F	3,326	3,562	5,351	6,304
		P<	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabla 20.** Valores medios de incidencia de roya ( $\pm$ et) en el ensayo del año 2019.

Tratamiento	Incidencia (%) ( $\pm$ et)			
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Testigo	14,96 ( $\pm$ 1,25) a	29,40 ( $\pm$ 1,81) b	43,39 ( $\pm$ 2,30) b	51,32 ( $\pm$ 2,61) b
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	15,54 ( $\pm$ 1,58) a	19,62 ( $\pm$ 2,09) a	29,94 ( $\pm$ 2,54) a	36,52 ( $\pm$ 3,01) a
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	14,36 ( $\pm$ 1,33) a	19,59 ( $\pm$ 1,78) a	24,66 ( $\pm$ 2,16) a	33,26 ( $\pm$ 2,76) a
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	15,07 ( $\pm$ 1,35) a	21,34 ( $\pm$ 2,06) a	27,20 ( $\pm$ 2,54) a	33,34 ( $\pm$ 2,66) a
Coefficiente de variación (%)	9,44	11,82	13,20	14,25

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 24, puede observarse que, desde la evaluación tras el primer tratamiento, tanto Cu como las dos dosis de Si consiguen un control similar y significativo respecto al testigo. En la tercera y cuarta evaluación aumenta la diferencia con el testigo, pero los valores de incidencia final superan el 30%.



**Figura 24.** Incidencia (%) de roya ( $\pm$ et) en el ensayo de 2019.

### 5.1.3. Severidad

En la tabla 21, se presentan los resultados del análisis de varianza para la severidad en 2019.

**Tabla 21.** Análisis de varianza de los datos de severidad en el ensayo del año 2019.

Fuente de variación	df	Muestras				
		Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Tratamiento	3	F	1,865	18,391	30,539	26,719
		P<	0,135	0,000	0,000	0,000
Bloque	4	F	1,797	2,074	7,548	8,534
		P<	0,129	0,084	0,000	0,000
T*B	12	F	2,649	2,824	4,935	5,444
		P<	0,002	0,001	0,000	0,000

**Tabla 22.** Valores medios de severidad ( $\pm$ et) de los tratamientos en el ensayo del 2019.

Tratamiento	Severidad (%) ( $\pm$ et)			
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Testigo	2,47 ( $\pm$ 0,26) a	7,71 ( $\pm$ 0,57) b	13,17 ( $\pm$ 0,89) b	18,80 ( $\pm$ 1,10) b
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	3,37 ( $\pm$ 0,35) a	4,86 ( $\pm$ 0,55) a	8,45 ( $\pm$ 0,79) a	12,47 ( $\pm$ 1,13) a
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	2,19 ( $\pm$ 0,25) a	3,61 ( $\pm$ 0,43) a	4,88 ( $\pm$ 0,54) a	8,53 ( $\pm$ 0,94) a
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	2,24 ( $\pm$ 0,23) a	3,64 ( $\pm$ 0,39) a	6,01 ( $\pm$ 0,79) a	9,35 ( $\pm$ 0,96) a
Coefficiente de variación (%)	2,36	3,92	5,63	7,30

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 25, puede observarse un comportamiento similar al de la incidencia, con menor severidad en las plantas tratadas frente a la de testigo ya tras el primer tratamiento. Aunque no es estadísticamente significativo, hay una menor severidad en las parcelas tratadas con las dos dosis de Si frente a las tratadas con el tratamiento con Cu.

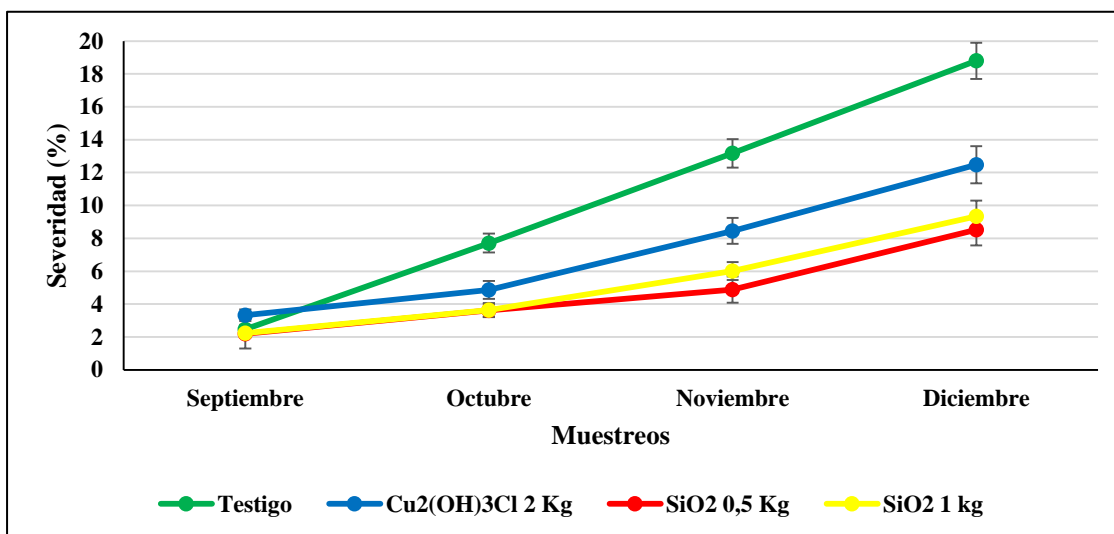


Figura 25. Desarrollo de la severidad (%) de roya ( $\pm et$ ) en el ensayo de 2019.

#### 5.1.4. ABCPSE 2019.

En la tabla 23, se presentan los resultados del análisis de varianza para el ABCPSE para cada tratamiento.

Tabla 23. Análisis de varianza de los datos de área bajo la curva del progreso de severidad de la enfermedad en el ensayo del año 2019.

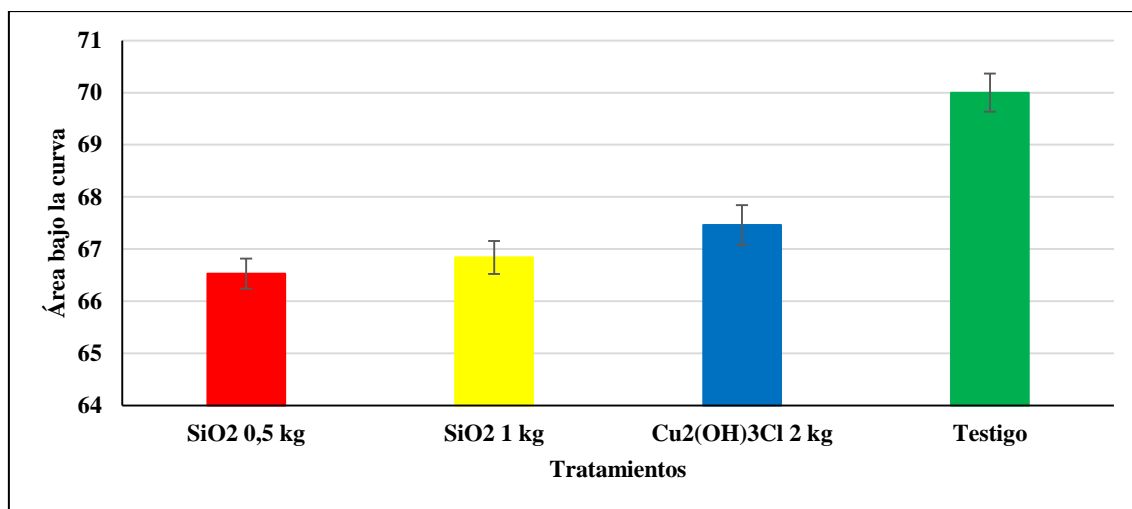
Fuente de variación	Df	F	ABCPSE
Tratamiento	3	F	25,22
		P<	0,000
Bloque	4	F	5,25
		P<	0,000
T*B	12	F	4,53
		P<	0,000

Tabla 24. Valores medios de ABCPSE ( $\pm et$ ) de los tratamientos en el año 2019.

Tratamiento	ABCPSE ( $\pm et$ )	Tukey b
Testigo	70,00 ( $\pm 0,36$ )	b
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	67,46 ( $\pm 0,38$ )	a
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	66,53 ( $\pm 0,29$ )	a
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	66,84 ( $\pm 0,32$ )	a
Coeficiente de variación (%)		4,15

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 26, puede observarse los valores del ABCPSE, con diferencias significativas de todos los tratamientos frente al testigo. Siendo el Si05 en tratamiento que presenta el mejor resultado.



**Figura 26.** Área bajo de la curva del progreso de la severidad de la enfermedad ( $\pm$  et) en el ensayo de 2019.

### 5.1.5. Defoliación

En la tabla 25, se presentan los resultados del análisis de varianza para la defoliación a partir del muestreo de noviembre.

**Tabla 25.** Análisis de varianza de los datos de defoliación en el ensayo del año 2019.

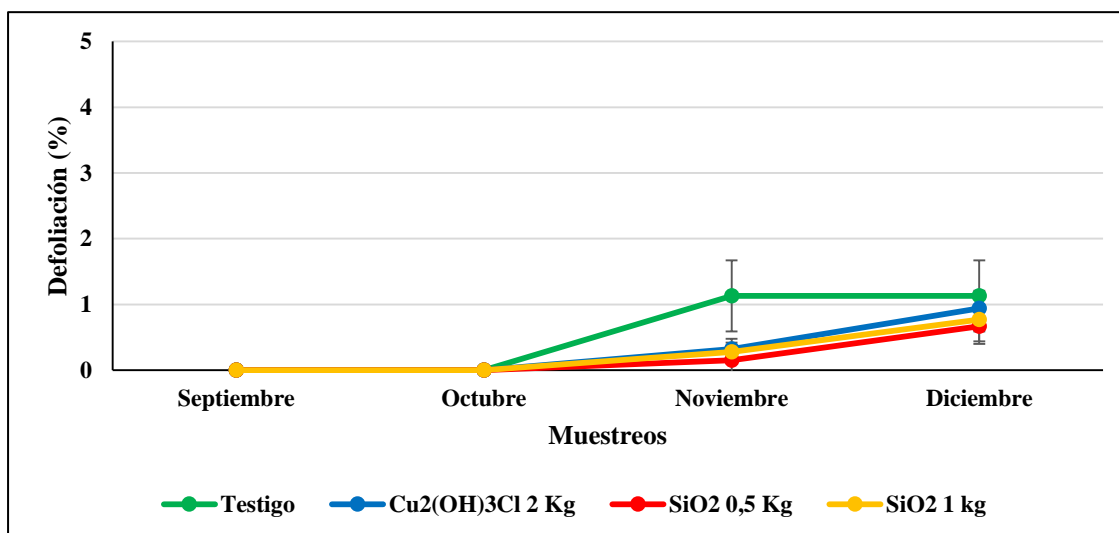
Fuente de Variación	df	Muestras	
		Noviembre	Diciembre
Tratamiento	3	F	1,832
		P<	0,141
Bloque	4	F	1,945
		P<	0,103
T*R	12	F	1,517
		P<	0,117

**Tabla 26.** Valores medios de defoliación ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2019.

Tratamiento	Defoliación (%)			
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Testigo	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,00 ( $\pm$ 0,00)	1,13 ( $\pm$ 0,54) a	1,13 ( $\pm$ 0,54) a
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,32 ( $\pm$ 0,16) a	0,94 ( $\pm$ 0,27) a
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,15( $\pm$ 0,22) a	0,67 ( $\pm$ 0,23) a
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,28 ( $\pm$ 0,14) a	0,77 ( $\pm$ 0,37) a
Coefficiente de variación (%)	0,00	0,00	2,52	3,03

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

A pesar de los valores de incidencia y severidad, la defoliación, durante el año 2019, presentó valores muy bajos y, aunque se inició algo antes en el testigo no hubo diferencias significativas respecto a las parcelas tratadas, tal como se puede observar en la figura 27.



**Figura 27.** Evolución de la defoliación (%) causada por la roya ( $\pm$ et) en el ensayo de 2019.

### 5.1.6. Contenido de silicio

Como se puede observar en la tabla 25, los valores de Si en el suelo son muy similares en toda la parcela, con rangos entre 20,4 y 23,1%, por lo que se considera que no afectan a los resultados de los contenidos a nivel foliar.

**Tabla 27.** Contenido de silicio en el suelo (%) pre-aplicación de los tratamientos del año 2019.

Tratamiento	Silicio (%)
Testigo	20,36
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 Kg	23,12
SiO <sub>2</sub> 0,5 Kg	22,27
SiO <sub>2</sub> 1 Kg	22,85

En la tabla 28, se observa que el contenido en Si en hoja en 2019 parece descender en las hojas de plantas testigo y las tratadas con Cu y en las tratadas con Si se mantienen prácticamente estable.

**Tabla 28.** Contenido de silicio en de hojas de café (%) de plantas tratadas con Cu y Si y en el testigo sin tratar del año 2019.

Tratamientos	Fechas de muestreos				Diferencia (D-S)
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Testigo	0,40	0,34	0,29	0,13	-0,27
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg	0,30	0,30	0,24	0,11	-0,19
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg	0,23	0,29	0,29	0,26	0,03
SiO <sub>2</sub> 1 kg	0,29	0,26	0,26	0,20	-0,09

### 5.1.7. Contenido de fenoles totales

En la tabla 29, se observa que en todos los tratamientos y en el testigo aumentaron ligeramente los niveles del contenido de fenoles totales en cada uno de los muestreos posteriores al primero, presentando una diferencia positiva entre el dato final e inicial para todos los tratamientos.

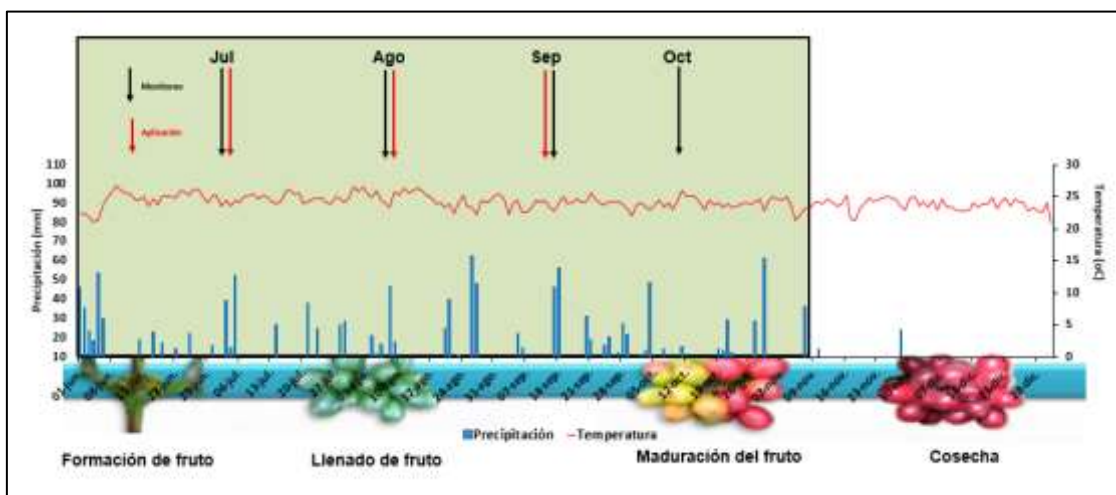
**Tabla 29.** Contenido de fenoles totales en hojas de café (mg de ácido gálico/g de tejido vegetal), año 2019.

Tratamientos	Fechas de muestreos				Diferencia (D-S)
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Testigo	2,08	3,69	2,42	4,43	2,35
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg	2,86	6,94	4,09	5,18	2,32
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg	3,25	7,23	3,03	5,61	2,36
SiO <sub>2</sub> 1 kg	2,46	5,83	4,31	5,38	2,92

## 5.2. RESULTADOS ENSAYO AÑO 2020

### 5.2.1 Condiciones meteorológicas

Durante la evaluación en el año 2020, el comportamiento de las condiciones climáticas presentó datos de temperatura muy similares al historial promedio registrado de los últimos 10 años anteriores a la evaluación (2009-2018) y muy similar al promedio de temperaturas registradas durante el año 2019, sin embargo la humedad relativa (>88%) y las precipitaciones (>1663,83 mm) estuvieron por arriba del historial promedio comparado con los meses de evaluación y con los meses de evaluación en 2019; dichas condiciones son ideales para el desarrollo de la roya del café. En la figura 28, se presentan el comportamiento de algunas condiciones climáticas como la temperatura y precipitación presentadas durante la evaluación en el año 2020.



**Figura 28.** Datos de precipitación (mm) y temperatura (°C) diarias en la segunda mitad de 2020 indicando fechas de evaluaciones y tratamientos en julio, agosto, septiembre y octubre (Elaboración propia con datos de INSIVUMEH).

### 5.2.2. Incidencia

En la tabla 30, se presentan los resultados del análisis de varianza para la incidencia. No se presenta análisis estadístico de datos del primer muestreo debido que cuando la evaluación se inició todavía no existía presencia de síntomas en las plantas (tabla 31).

**Tabla 30.** Análisis de varianza para los datos de incidencia en el ensayo del año 2020.

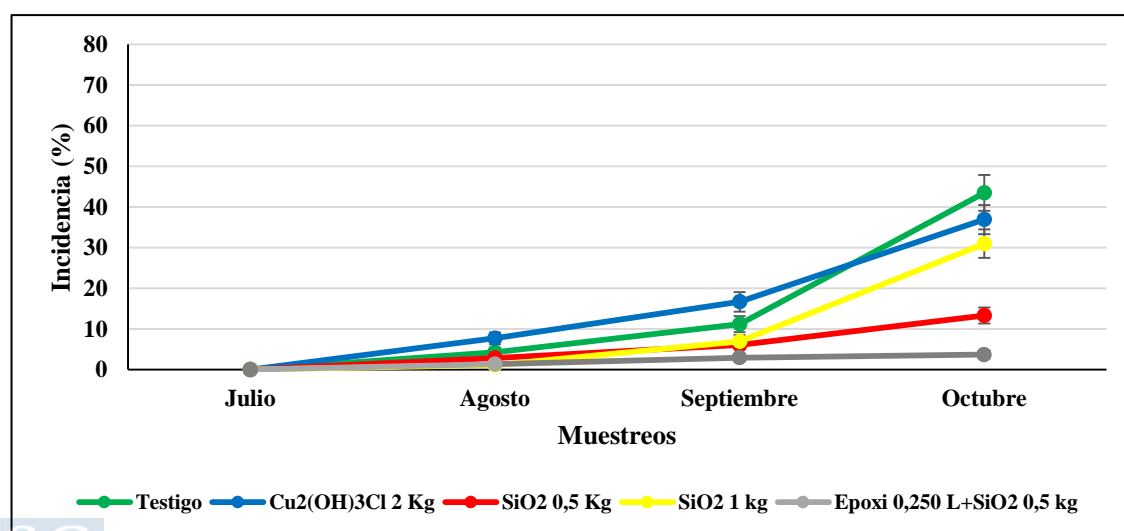
Fuente de variación	Df	Muestras			
		Agosto	Septiembre	Octubre	
Tratamiento	4	F	9,918	10,921	34,1604
		P<	0,001	0,001	0,001

**Tabla 31.** Valores medios de incidencia de roya ( $\pm et$ ) en el ensayo del año 2019.

Tratamiento	Incidencia (%) ( $\pm et$ )			
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Testigo	0,00 ( $\pm 0,00$ )	4,25 ( $\pm 1,09$ ) b	11,18 ( $\pm 1,98$ ) b	43,48 ( $\pm 4,38$ ) d
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	7,79 ( $\pm 1,45$ ) b	16,69 (2,42) c	36,92 ( $\pm 3,60$ ) cd
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	2,89 ( $\pm 0,78$ ) a	6,12 ( $\pm 1,12$ ) ab	13,33 ( $\pm 1,98$ ) b
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	1,09 ( $\pm 0,37$ ) a	6,94 ( $\pm 1,56$ ) ab	31,00 ( $\pm 3,48$ ) c
Epoxi 0,250 L + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	1,36 ( $\pm 0,41$ ) a	2,97 ( $\pm 0,73$ ) a	3,72 ( $\pm 0,94$ ) a
Coeficiente de variación (%)	0,00	6,36	10,40	15,95

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 29, puede observarse que ya a partir del segundo muestreo hay diferencias significativas entre tratamientos, aunque todos los valores de incidencia son bajos; en el tercero el cobre se separa de los otros tratamientos, pero al final del ensayo solo el Epoxi en mezcla con Si y el Si05, han mantenido una protección significativa y con niveles de incidencia muy bajos para el fungicida sistémico y próximos al 10% para el Si05 dos meses antes de cosecha.



**Figura 29.** Evolución de la incidencia (%) de roya ( $\pm et$ ) en el ensayo de 2020.

### 5.2.3. Severidad

En la tabla 32, se presentan los resultados del análisis de varianza para la severidad; no se presentan datos del primer muestreo debido a que la evaluación se inició cuando todavía no existía presencia de síntomas.

**Tabla 32.** Análisis de varianza para los datos de severidad en el ensayo del año 2020.

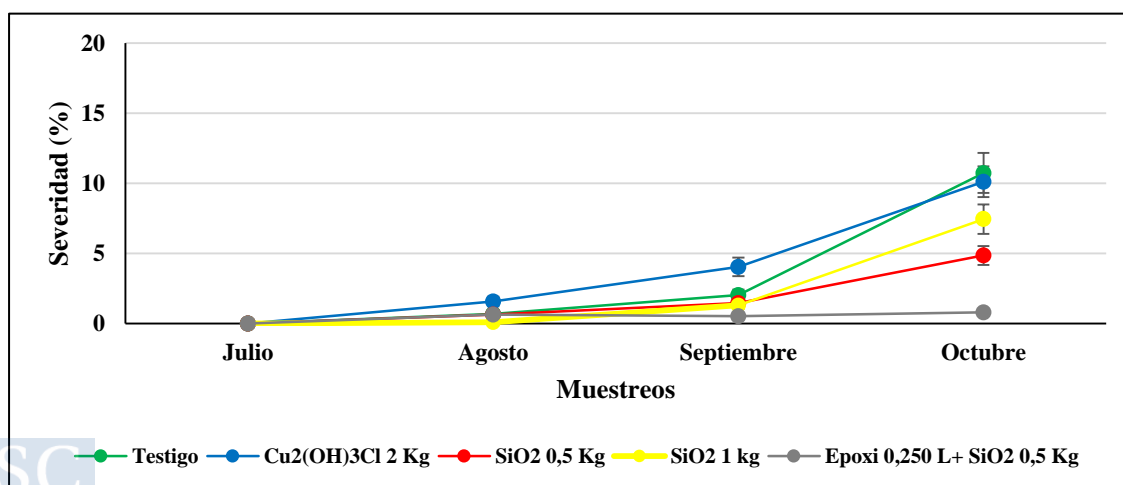
Fuente de variación	Df	Muestras			
		Agosto	Septiembre	Octubre	
Tratamiento	4	F	8,671	16,248	28,144
		P<	0,000	0,000	0,000

**Tabla 33.** Valores medios de severidad de roya ( $\pm et$ ) en el ensayo del año 2020.

Tratamiento	Severidad (%) ( $\pm et$ )			
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Testigo	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,68 ( $\pm 0,23$ ) a	2,02 ( $\pm 0,39$ ) b	10,73 ( $\pm 1,43$ ) c
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	1,58 ( $\pm 0,34$ ) b	4,04 ( $\pm 0,67$ ) c	10,11 ( $\pm 1,10$ ) c
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,65 ( $\pm 0,21$ ) a	1,46 ( $\pm 0,30$ ) ab	4,85 ( $\pm 0,68$ ) b
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,09 ( $\pm 0,04$ ) a	1,30 ( $\pm 0,26$ ) ab	7,44 ( $\pm 1,05$ ) c
Epoxi 0,250 L + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,64 ( $\pm 0,15$ ) a	0,53 ( $\pm 0,15$ ) a	0,80 ( $\pm 0,19$ ) a
Coefficiente de variación (%)	0,00	1,69	2,97	6,61

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 30, se puede observar que de nuevo el Cu no impide que aumente la severidad de la enfermedad ya desde el segundo muestreo, alcanzando niveles similares al testigo sin tratar; el Epoxi en mezcla con SiO<sub>2</sub> mantiene niveles muy bajos de severidad durante todo el ensayo y los dos tratamientos con SiO<sub>2</sub> consiguen un control intermedio.



**Figura 30.** Evolución de la severidad (%) de roya ( $\pm et$ ) en el ensayo de 2020.

#### 5.2.4. ABCPSE 2020.

En la tabla 34, se presentan los resultados del análisis de varianza para el ABCPSE que pone de manifiesto la existencia de diferencias significativas entre tratamientos.

**Tabla 34.** Datos de salida del ANOVA para el área bajo la curva de progreso de severidad de la enfermedad del año 2020.

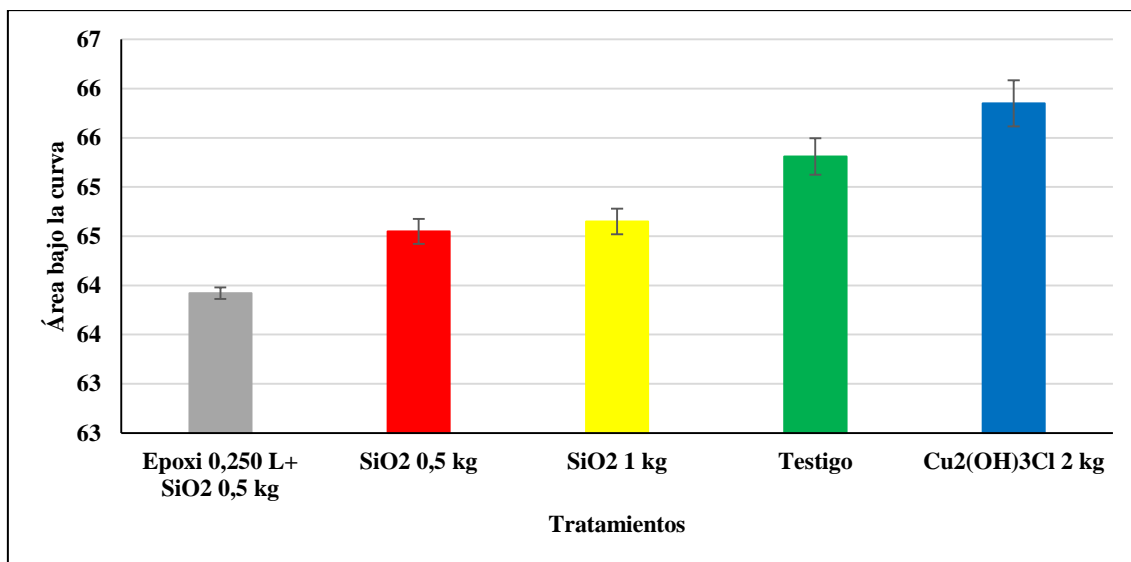
Fuente de variación	Df		ABCPSE
Tratamiento	4	F	26,869
		P<	0,000

**Tabla 35.** Valores medios de ABCPSE ( $\pm et$ ) de los tratamientos del año 2020.

Tratamiento	ABCPSE	Tukey b
Testigo	65,31 ( $\pm 0,19$ )	c
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	65,85 ( $\pm 0,23$ )	d
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	64,55 ( $\pm 0,13$ )	b
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	64,65 ( $\pm 0,13$ )	b
Epoiconazole 0,250 L + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	63,92 ( $\pm 0,06$ )	a
Coeficiente de variación (%)	1,54	

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 31, pueden observarse los valores del ABCPSE, y las diferencias entre tratamientos, siendo el Epoxi en mezcla con Si05 el que presenta los valores de severidad más bajos, seguidas de las aplicaciones de Si05, Si1 y el testigo, el tratamiento con Cu es el que presenta un valor más alto.



**Figura 31.** Área bajo de la curva del progreso de la severidad de la enfermedad ( $\pm$  et) del año 2020.

### 5.2.5. Defoliación

En la tabla 36, se presentan los resultados del análisis de varianza para la defoliación en 2020.

**Tabla 36.** Análisis de varianza para los datos de defoliación en el ensayo del 2020.

Fuente de variación	Df		Muestras		
			Agosto	Septiembre	Octubre
Tratamiento	4	F	1,000	1,711	1,634
		P<	0,408	0,147	0,166

**Tabla 37.** Valores medios de defoliación en porcentaje ( $\pm$ et) de los tratamientos.

Tratamiento	Defoliación (%)			
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Testigo	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,16 ( $\pm$ 0,16) a	0,16 ( $\pm$ 0,16) a	2,02 ( $\pm$ 0,61) a
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,00 ( $\pm$ 0,00) a	0,00 ( $\pm$ 0,51) a	1,83 ( $\pm$ 0,75) a
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,00 ( $\pm$ 0,00) a	0,43 ( $\pm$ 0,42) a	0,91 ( $\pm$ 0,54) a
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,00 ( $\pm$ 0,00) a	0,00 ( $\pm$ 0,00) a	0,74 ( $\pm$ 0,37) a
Epoxi 0,250 L + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm$ 0,00)	0,00 ( $\pm$ 0,00) a	0,12 ( $\pm$ 0,12) a	0,12 ( $\pm$ 0,12) a
Coeficiente de variación (%)	0,00	0,53	2,25	3,71

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

defoliación entre el tercer y cuarto muestreo, para todos los casos salvo el Si05 y Epoxi en mezcla con Si05.

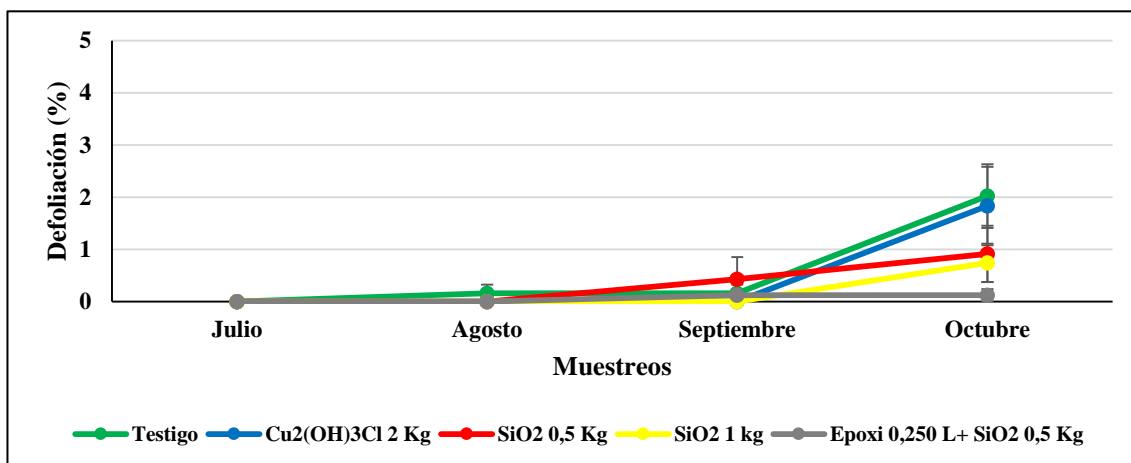


Figura 32. Defoliación (%) a causa de la roya ( $\pm$  et) en el ensayo del 2020.

### 5.2.6. Contenido de silicio

En la figura 33, se presenta el comportamiento del contenido de silicio durante los 12 meses de 2020. Hay una fluctuación en cada mes que es similar para cada uno de los tratamientos que no se había visto en los datos de 2019; no se detectan diferencias en los meses en los que se aplicó Si (julio, agosto y septiembre).

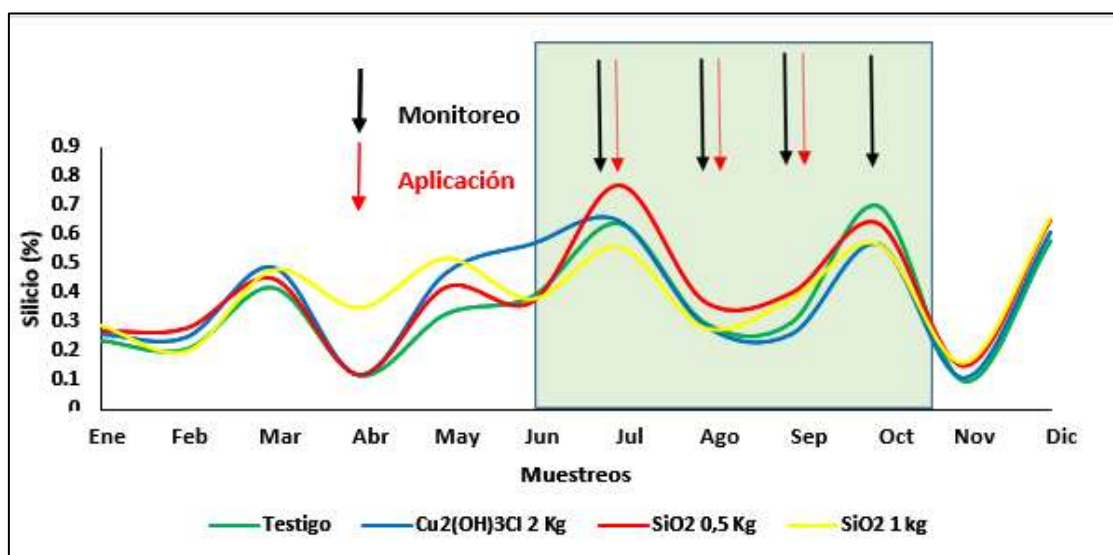


Figura 33. Curva de contenido del % de silicio en tejido vegetal (enero-diciembre 2020).

### 5.2.7. Contenido de fenoles totales

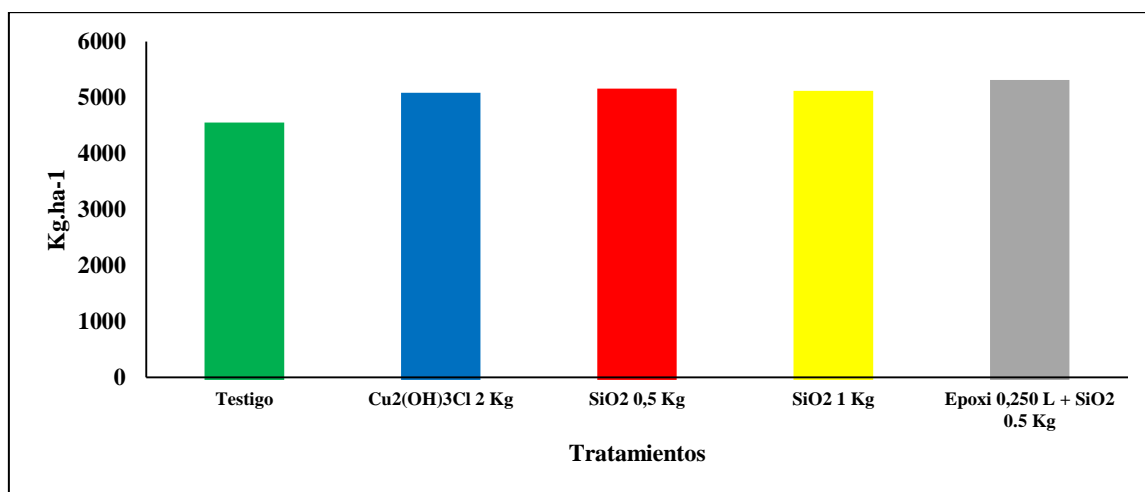
En la tabla 38, se presentan los contenidos de fenoles totales en los dos muestreos realizados (inicial y final), observándose que para los tratamientos con Si05 y Si1, así como el testigo sin aplicación hay un incremento similar que no se produjo en el caso del tratamiento con Cu2 porque el valor inicial fue más elevado ya al inicio. El incremento no parece estar relacionado con los daños producidos por la roya ni por la aplicación de Si.

**Tabla 38.** Contenido de fenoles totales en hojas de café (mg de ácido gálico/g de tejido vegetal), presentes en el año 2020.

Tratamientos	Fechas de muestreo		Diferencia
	Julio	Octubre	
Testigo	1,82	4,08	2,26
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 Kg	3,64	4,08	0,44
SiO <sub>2</sub> 0,5 Kg	1,84	4,40	2,56
SiO <sub>2</sub> 1 Kg	1,24	3,29	2,05

### 5.2.8. Producción

En la figura 34, se observa que los rendimientos de las plantas en el primer año de producción en la parcela experimental son similares, el testigo ligeramente menor.



**Figura 34.** Rendimiento de grano maduro de café (kg·ha<sup>-1</sup>) de los tratamientos del 2020.

### 5.2.9. Calidad

En la tabla 39, se presentan los valores del análisis organoléptico, observándose que todos los tratamientos se encuentran dentro del mismo rango de clasificación (80-84), de clasificación muy bueno y de tipo especial. Es considerado un café estrictamente duro debido a que es un grano bastante compacto y corrugado, con la

hendidura bastante cerrada y torcida, generalmente el color es verde azulado. La acidez es pronunciada, con fragancia y aroma muy intensos, dulzura y sabor pronunciados.

**Tabla 39.** Resultados del análisis organoléptico del grano de café (2020), según la escala de la Specialty Coffee Association of America (SCAA).

Repeticiones	Perfil de Taza	Clasificación	Tipo
Testigo	81,50	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg	81,67	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg	81,58	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
SiO <sub>2</sub> 1 kg	81,83	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
Epoxi 0,250 L+ SiO <sub>2</sub> 0,5 kg	81,92	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro

En la tabla 40, se pueden observar los valores de los resultados del perfil de taza obtenidos de los análisis de laboratorios realizados ANACAFE, donde los valores del aroma son similares para todos los tratamientos, pero para el caso de la acidez, el tratamiento con Si1, presenta el valor más bajo comparado con el resto de los tratamientos.

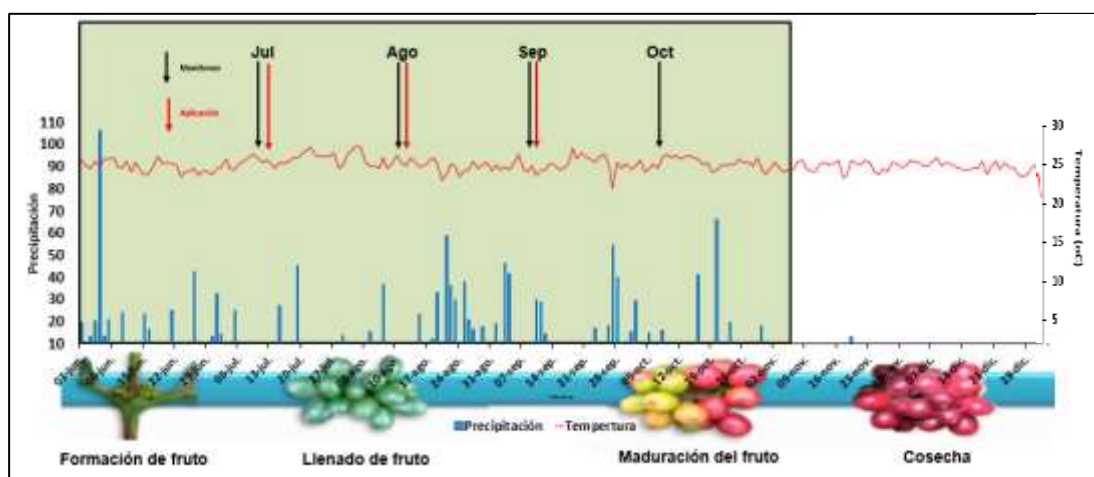
**Tabla 40.** Características de perfil de taza promedio 2020.

Características de Perfil de Taza 2020				
	Testigo	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>
<b>Aroma</b>	7,33	7,33	7,33	7,33
<b>Acidez</b>	7,50	7,42	7,42	7,33

## 5.3. RESULTADOS ENSAYO AÑO 2021

### 5.3.1. Condiciones meteorológicas

Durante la evaluación en el año 2021, el comportamiento de las condiciones climáticas presentó datos de temperatura muy similares al historial promedio registrado de los últimos 10 años anteriores a la evaluación (2009-2018) y muy similar al promedio de temperaturas registradas durante el año 2019 y 2020; sin embargo la humedad relativa (>89%) y las precipitaciones (>1617,60 mm) estuvieron por arriba del historial promedio y del año 2019, comparado con los meses de evaluación y muy similares a las condiciones del año 2020, dichas condiciones son ideales para el desarrollo de la roya del café. En la figura 35, se muestran las temperaturas y precipitaciones durante la evaluación en el año 2021.



**Figura 35.** Datos de precipitación (mm) y temperatura (°C) diarias en la segunda mitad de 2021 indicando fechas de evaluaciones y tratamientos en julio, agosto, septiembre y octubre (2021) (Elaboración propia con datos de INSIVUMEH).

### 5.3.2. Incidencia

En la tabla 41, se presentan los resultados del análisis de varianza para la incidencia que, muestran diferencias significativas entre los tratamientos en todos los muestreos.

**Tabla 41.** Análisis de varianza para los datos de incidencia en el ensayo del año 2021.

Fuente de variación	Df	Muestras				
		Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	
Tratamiento	7	F	2,343	10,916	8,273	10,751
		P<	0,024	0,000	0,000	0,000
Bloque	2	F	3,670	1,593	2,001	6,829
		P<	0,026	0,205	0,137	0,001
T*B	14	F	3,356	1,710	1,032	2,516
		P<	0,000	0,052	0,421	0,002

**Tabla 42.** Valores medios de incidencia ( $\pm et$ ) de los tratamientos del año 2021.

Tratamiento	Incidencia (%)			
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Testigo	7,73 ( $\pm 2,64$ )	ab 18,87 ( $\pm 3,19$ )	c 44,96 ( $\pm 02,60$ )	c 64,54 ( $\pm 2,47$ )
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	7,90 ( $\pm 1,44$ )	b 15,20 ( $\pm 2,63$ )	bc 37,02 ( $\pm 4,04$ )	bc 63,67 ( $\pm 3,16$ )
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	7,69 ( $\pm 2,16$ )	ab 9,31 ( $\pm 2,35$ )	ab 22,82 ( $\pm 2,94$ )	a 38,57 ( $\pm 3,53$ )
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	1,44 ( $\pm 0,52$ )	a 4,28 ( $\pm 1,03$ )	a 30,81 ( $\pm 3,70$ )	ab 52,18 ( $\pm 5,13$ )
Epoxi 0,250 L + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	5,52 ( $\pm 1,51$ )	ab 1,83 ( $\pm 0,86$ )	a 22,27 ( $\pm 2,78$ )	a 43,39 ( $\pm 3,49$ )
Epoxi 0,5 L kg·ha <sup>-1</sup>	5,83 ( $\pm 1,63$ )	ab 2,70 ( $\pm 1,17$ )	a 18,47 ( $\pm 2,58$ )	a 36,16 ( $\pm 3,60$ )
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup> + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	5,43 ( $\pm 1,24$ )	ab 8,47 ( $\pm 1,65$ )	ab 35,37 ( $\pm 3,30$ )	bc 59,27 ( $\pm 3,69$ )
Epoxi 0,250 L·ha <sup>-1</sup> Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup>	3,24 ( $\pm 0,98$ )	ab 4,31 ( $\pm 1,22$ )	a 24,91 ( $\pm 2,94$ )	ab 41,19 ( $\pm 3,38$ )
Coeficiente de variación (%)	9,19	10,43	13,72	13,30

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

Nota: Epoxi (epoxiconazole)

En el año 2021, la incidencia fue mayor que en años anteriores, tanto en el testigo como en los tratamientos y combinaciones; en julio, antes del primer tratamiento ya hay valores entre el 1 y el 9%. En la figura 36, se puede observar que existen dos grandes bloques, uno que agrupa testigo, Cu<sub>2</sub> y Cu<sub>1</sub> + Si<sub>05</sub> con incidencia igual o mayor al 60% y otro en el que estarían El Si<sub>05</sub> y las combinaciones que llevan Epoxi, todas en torno al 40%; el Si<sub>1</sub> estaría entre ambos grupos.

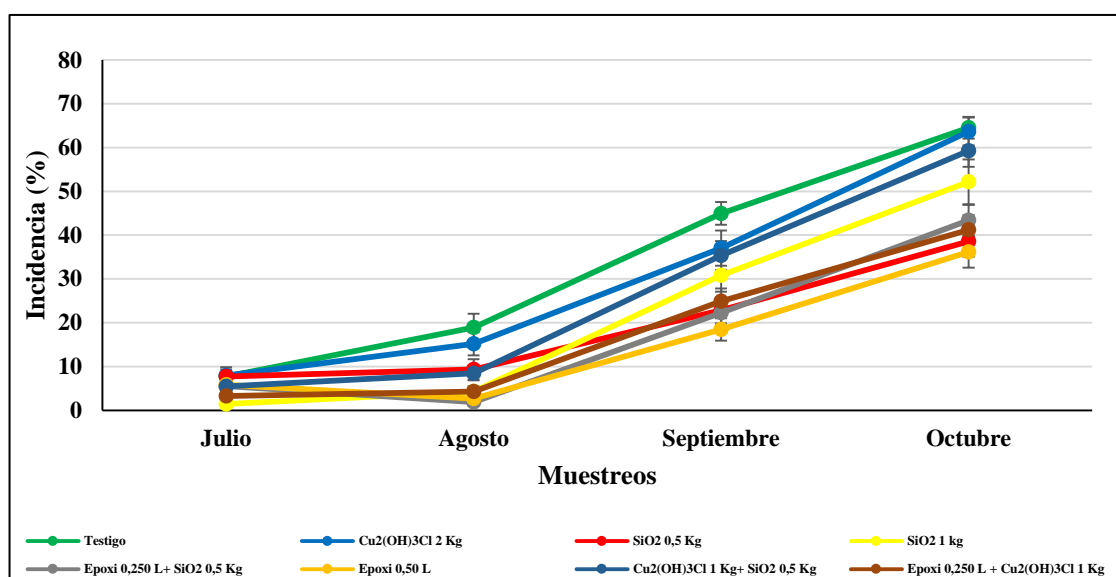


Figura 36. Incidencia (%) de roya ( $\pm$  et) en el ensayo de 2021.

### 5.3.3. Severidad

En la tabla 43, se presentan los resultados del análisis de varianza para la severidad.

Tabla 43. Análisis de varianza para los datos de severidad en el ensayo del año 2021.

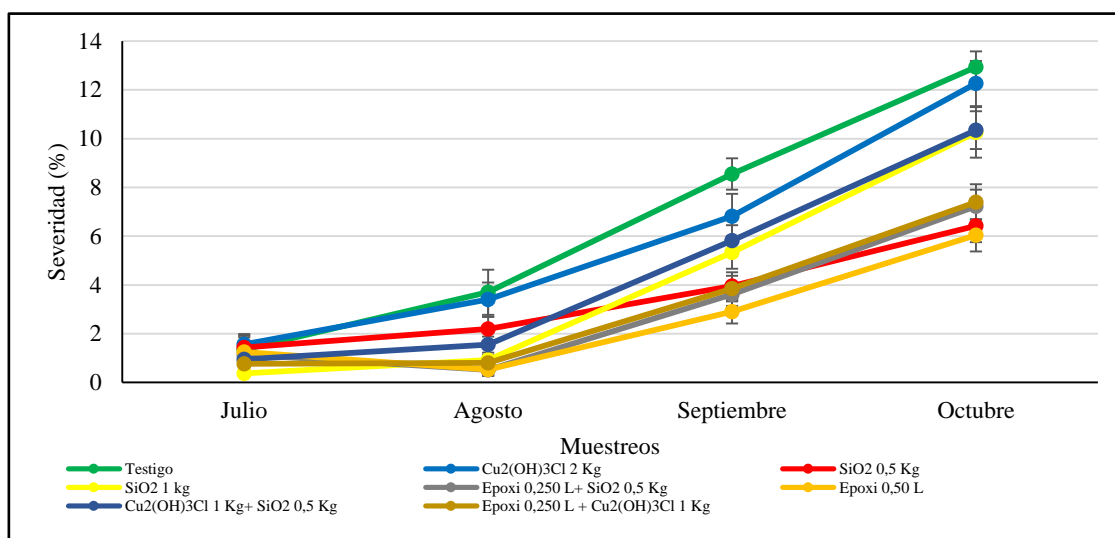
Fuente de variación	Df	Muestreos				
		Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	
Tratamiento	7	F	1,826	9,581	9,869	12,915
		P<	0,081	0,000	0,000	0,000
Bloque	2	F	2,991	1,455	0,176	2,348
		P<	0,052	0,235	0,839	0,097
T*B	14	F	2,784	1,286	0,782	1,740
		P<	0,001	0,213	0,689	0,046

Tabla 44. Valores medios de severidad ( $\pm$ et) de los tratamientos del año 2021.

Tratamiento	Severidad (%)			
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Testigo	1,38 ( $\pm$ 0,63) a	3,70 ( $\pm$ 0,93) c	8,55 ( $\pm$ 0,64) d	12,93 ( $\pm$ 0,65) c
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	1,56 ( $\pm$ 0,29) a	3,40 ( $\pm$ 0,70) bc	6,82 ( $\pm$ 0,92) cd	12,26 ( $\pm$ 0,93) c
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	1,44 ( $\pm$ 0,48) a	2,20 ( $\pm$ 0,49) ab	3,96 ( $\pm$ 0,56) ab	6,42 ( $\pm$ 0,66) a
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	0,37 ( $\pm$ 0,10) a	0,92 ( $\pm$ 0,21) a	5,34 ( $\pm$ 0,67) abc	10,26 ( $\pm$ 1,04) bc
Epoxiconazole 0,250 L + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	1,14 ( $\pm$ 0,33) a	0,52 ( $\pm$ 0,22) a	3,61 ( $\pm$ 0,47) a	7,23 ( $\pm$ 0,68) ab
Epoxiconazole 0,5 L kg·ha <sup>-1</sup>	1,25 ( $\pm$ 0,41) a	0,53 ( $\pm$ 0,26) a	2,90 ( $\pm$ 0,48) a	6,04 ( $\pm$ 0,66) a
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup> + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,95 ( $\pm$ 0,32) a	1,50 ( $\pm$ 0,33) a	5,82 ( $\pm$ 0,63) bcd	10,35 ( $\pm$ 0,78) bc
Epoxi 0,250 L·ha <sup>-1</sup> Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup>	0,76 ( $\pm$ 0,22) a	0,81 ( $\pm$ 0,27) a	3,85 ( $\pm$ 0,52) ab	7,40 ( $\pm$ 0,73) ab
Coefficiente de variación (%)	2,48	3,15	3,90	4,58

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 37, se observa que las diferencias iniciales en la severidad se van separando a partir del segundo muestreo, al final se puede ver que los tratamientos con Epoxi y SiO5 son los que ejercen la mayor protección contra el enfermedad, aunque estadísticamente no hay significancia entre estos comparados con la aplicaciones de Si1 y las mezclas de Epoxi + SiO5 y Epoxi + Cu, respectivamente. El Cu2 y el testigo sin aplicación presentan porcentajes más altos de severidad.



**Figura 37.** Evolución de la severidad (%) a causa de la roya ( $\pm$  et) en el ensayo del 2021.

### 5.3.4. Defoliación

En la tabla 45, se presentan los resultados del análisis varianza para la defoliación. La diferencia significativa se presenta en el tercer y cuarto muestreo; no se presentan datos de julio porque todavía no había defoliación.

**Tabla 45.** Análisis de varianza para los datos de defoliación en el ensayo del 2021.

Fuente de variación	Df	Muestreos			
		Agosto	Septiembre	Octubre	
Tratamiento	7	F	1,009	8,713	11,326
		P<	0,424	0,000	0,000
Bloque	2	F	0,662	0,379	1,984
		P<	0,517	0,685	0,139
T*B	14	F	1,188	1,858	1,738
		P<	0,282	0,030	0,047

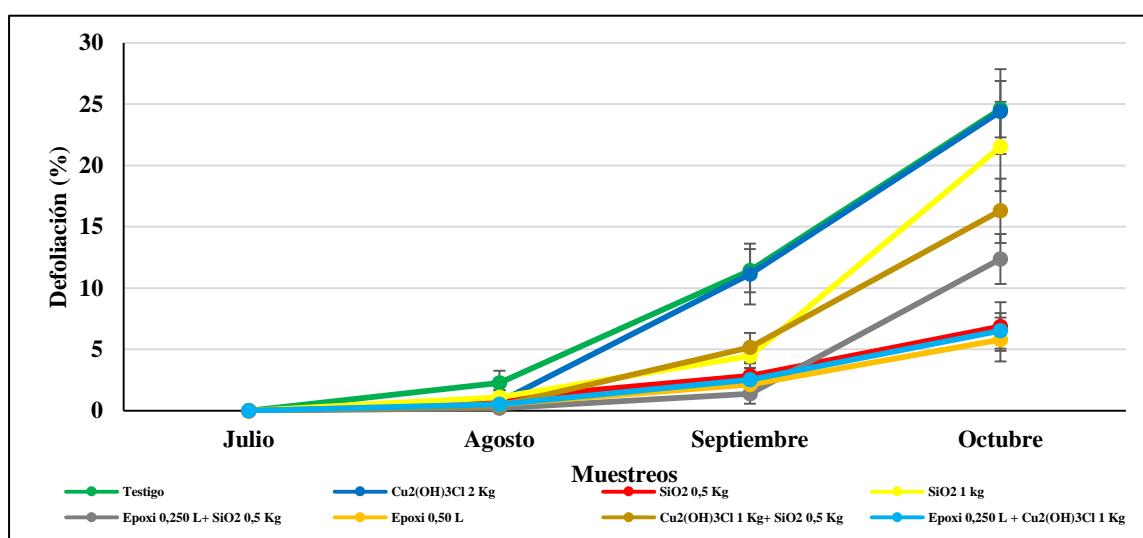
**Tabla 46.** Valores medios de defoliación ( $\pm et$ ) de los tratamientos del año 2021.

Tratamiento	Defoliación (%)			
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Testigo	0,00 ( $\pm 0,00$ )	2,27 ( $\pm 0,99$ ) a	11,42 ( $\pm 1,77$ ) b	24,59 ( $\pm 2,30$ ) d
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,73 ( $\pm 0,42$ ) a	11,14 ( $\pm 2,47$ ) b	24,39 ( $\pm 3,47$ ) d
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,98 ( $\pm 0,69$ ) a	2,84 ( $\pm 1,02$ ) a	6,87 ( $\pm 1,98$ ) ab
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	1,31 ( $\pm 0,59$ ) a	4,47 ( $\pm 1,01$ ) a	21,54 ( $\pm 3,64$ ) cd
Epoxi 0,250 L + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,40 ( $\pm 0,21$ ) a	1,37 ( $\pm 0,80$ ) a	12,36 ( $\pm 2,04$ ) abc
Epoxi 0,5 L kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,53 ( $\pm 0,36$ ) a	2,13 ( $\pm 0,83$ ) a	5,80 ( $\pm 1,78$ ) a
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup> + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,42 ( $\pm 0,41$ ) a	5,16 ( $\pm 1,18$ ) a	16,30 ( $\pm 2,63$ ) bcd
Epoxi 0,250 L·ha <sup>-1</sup> Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup>	0,00 ( $\pm 0,00$ )	0,51 ( $\pm 0,39$ ) a	2,52 ( $\pm 0,97$ ) a	6,52 ( $\pm 1,45$ ) ab
Coefficiente de variación (%)	0,00	3,51	7,94	12,65

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

Nota: Epoxi (epoxiconazole)

Al igual que la incidencia y severidad, la defoliación es mayor que en 2019 y 2020 (figura 38). El aumento de defoliación se produce desde el segundo muestreo para el testigo y en el cuarto el Epoxi evita en mayor grado la defoliación ocasionada por la roya, aunque estadísticamente no hay diferencia significativa con los tratamientos de Si05, Epoxi+Cu y Epoxi+Si05. El testigo el tratamiento con Cu son los que presentan los mayores porcentajes de defoliación.



**Figura 38.** Defoliación (%) a causa de la roya ( $\pm et$ ) en el ensayo del año 2021.

### 5.3.5. ABCPSE 2021.



En la tabla 47, se presentan los resultados del análisis de varianza para el ABCPSE, lográndose determinar que sí existe significancia entre los tratamientos; sin

embargo, entre las repeticiones y en la interacción entre tratamientos y repeticiones (T\*R), no se presenta diferencia significativa.

**Tabla 47.** Análisis de varianza para los datos de área bajo la curva de progreso de severidad de la enfermedad en el ensayo de 2021.

Fuente de variación	Df		ABCPSE
Tratamiento	7	F	18,441
		P<	0,000
Bloque	2	F	2,755
		P<	0,065
T*B	14	F	1,689
		P<	0,056

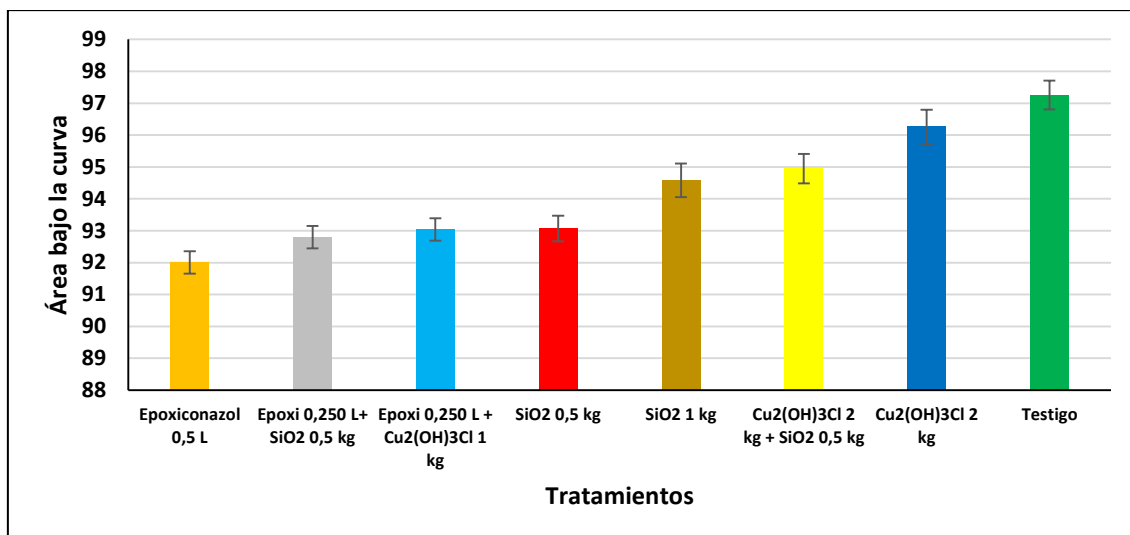
**Tabla 48.** Valores medios de ABCPSE ( $\pm et$ ) de los tratamientos del año 2021.

Tratamiento	ABCPSE	Severidad
Testigo	97,22 ( $\pm 0,46$ )	e
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	96,26 ( $\pm 0,54$ )	d
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	93,07 ( $\pm 0,40$ )	abc
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	94,58 ( $\pm 0,53$ )	bcd
Epoxi 0,250 L + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	92,80 ( $\pm 0,35$ )	ab
Epoxi 0,5 L kg·ha <sup>-1</sup>	92,01 ( $\pm 0,53$ )	a
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup> + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	94,95 ( $\pm 0,46$ )	d
Epoxi 0,250 L·ha <sup>-1</sup> Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup>	93,04 ( $\pm 0,35$ )	abc
Coeficiente de variación (%)	3,14	

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

Nota: Epoxi (epoxiconazole)

En la figura 39, puede observarse el área bajo la curva del progreso de severidad de la enfermedad para los 7 tratamientos y el testigo, con diferencias estadísticamente significativas entre el testigo y todos los tratamientos: El tratamiento con SiO<sub>2</sub> iguala los resultados de todos los tratamientos con Epoxi.



**Figura 39.** Área bajo de la curva del progreso de severidad de la enfermedad ( $\pm$  et) 2021.

### 5.3.6. ABCPSE 2019-2021.

En la tabla 49, se presentan los resultados del análisis de varianza para ABCPSE, para los tratamientos comunes en los tres años de evaluación, confirmando que sí hay diferencias altamente significativas ( $p < 0,001$ ) entre tratamientos.

**Tabla 49.** Análisis de varianza para los datos de área bajo la curva de progreso de severidad de la enfermedad en el ensayo para los 3 años (2019-2021).

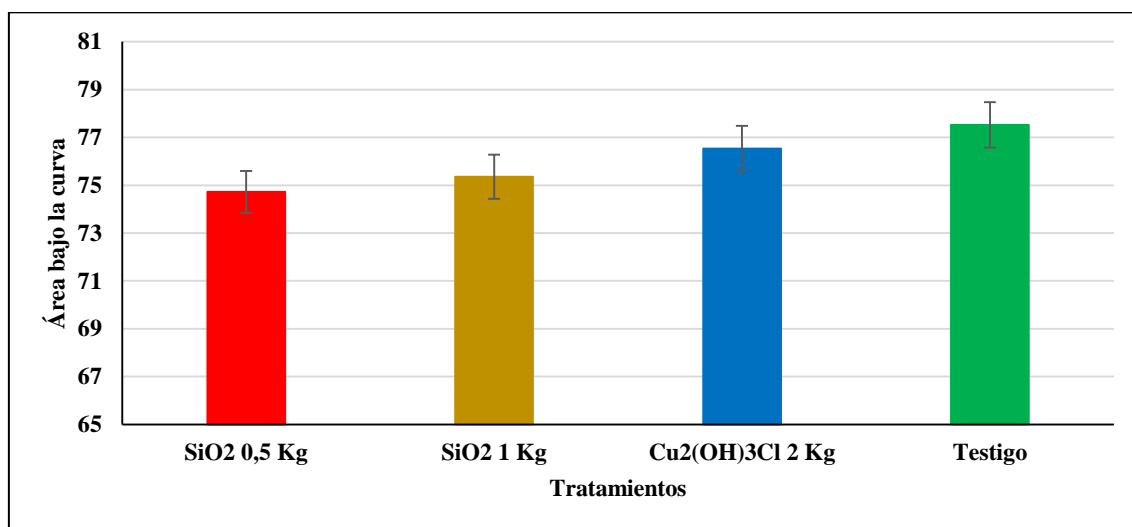
Fuente de variación	Df		ABCPSE
Tratamiento	3	F	38,50
		P<	0,000
Año	2	F	8099,00
		P<	0,000

**Tabla 50.** Valores medios de ABCPSE ( $\pm$ et) de los tratamientos del 2019-2021.

Tratamiento	ABCPSE	
Testigo	77,52 ( $\pm 0,95$ )	c
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	76,53 ( $\pm 0,95$ )	b
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	74,72 ( $\pm 0,88$ )	a
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	75,36 ( $\pm 0,92$ )	a
Coeficiente de variación (%)	3,69	

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 40, se puede observar el ABCPSE con diferencias estadísticamente significativas entre el testigo y la mayoría de los tratamientos. A lo largo de los 3 años, los tratamientos con SiO<sub>2</sub> confirmado su mejor efecto contra la roya frente al tratamiento estándar con Cu<sub>2</sub>.



**Figura 40.** Área bajo de la curva del progreso de severidad de la enfermedad ( $\pm$  et) 2019-2021.

### 5.3.7. Contenido de silicio

En la tabla 51, se observa que el rango de valores está entre 0,32% y 0,55% y siempre es igual o superior en el muestreo final, sin que haya información suficiente que relacione el dato con la aplicación de Si.

**Tabla 51.** Porcentaje del contenido de silicio en el tejido vegetal en hojas de café en el de parcelas sometidas a los distintos tratamientos en 2021.

Tratamientos	Fechas de muestreo		Diferencia
	Julio	Octubre	
Epoxiconazole 0,50 L	0,26	0,55	0,29
SiO <sub>2</sub> 0,5 Kg	0,28	0,49	0,21
Epoxiconazole 0,250 L + Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 Kg	0,22	0,46	0,24
SiO <sub>2</sub> 1 kg	0,33	0,39	0,06
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 Kg+ SiO <sub>2</sub> 0,5 Kg	0,30	0,37	0,07
Testigo	0,24	0,36	0,12
Epoxiconazole 0,250 L+ SiO <sub>2</sub> 0,5 Kg	0,29	0,35	0,06
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 Kg	0,31	0,32	0,01

En la tabla 52, se presentan los resultados del ANOVA para el contenido de silicio en el tejido vegetal, durante los tres años de evaluación para los tratamientos que se repiten los tres años.

**Tabla 52.** *Análisis de varianza para los datos del contenido de silicio en tejido vegetal en el ensayo para los 3 años (2029-2021).*

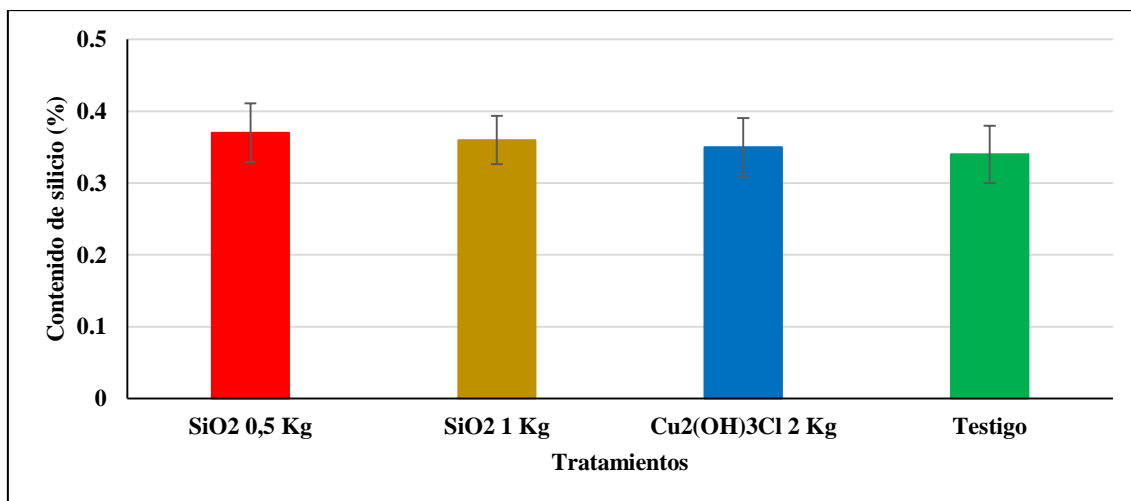
Fuente de variación	df		SILICIO
Tratamiento	3	F	0,18
		P<	0,9082
Año	2	F	3,10
		P<	0,0827

**Tabla 52.** *Valores medios de contenido de silicio ( $\pm$ et) de los tratamientos (2019-2021).*

Tratamiento	SILICIO	
Testigo	0,34 ( $\pm$ 0,95)	a
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	0,35 ( $\pm$ 0,95)	a
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	0,37 ( $\pm$ 0,88)	a
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	0,36 ( $\pm$ 0,92)	a
Coeficiente de variación (%)	45,66	

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

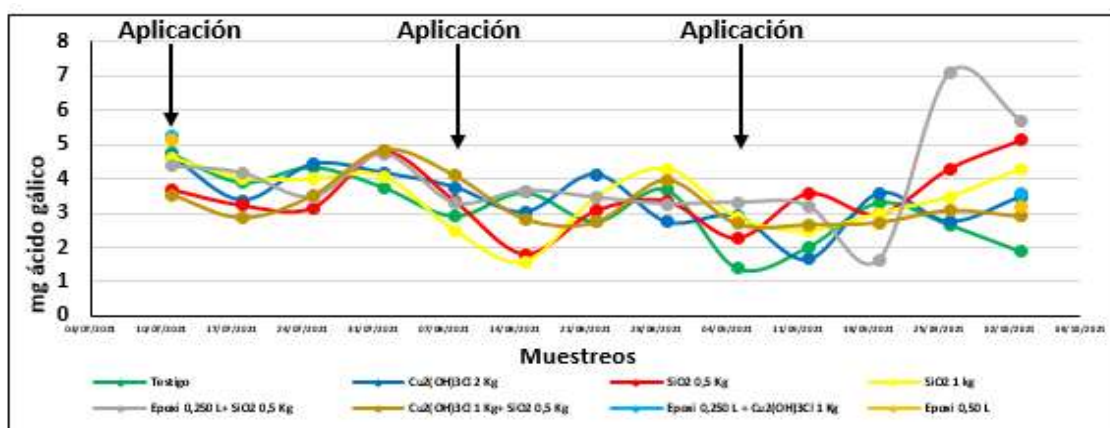
En la figura 41, se puede observar el contenido de silicio durante los 3 años para los tratamientos en evaluación, aunque el tratamiento con Si05 es el que posee el contenido más alto, comparada con el resto de los tratamientos evaluados, no existe diferencia significativa entre ellos.



**Figura 41.** Porcentaje promedio de contenido de silicio en tejido vegetal ( $\pm$  et) de los años 2019-2021.

### 5.3.8. Contenido de fenoles totales

En la figura 42, se observa la evolución del contenido de fenoles totales en el tejido vegetal durante el periodo de evaluación en 2021. Hay una fluctuación en cada semana que es muy similar para cada uno de los tratamientos y no se detectan diferencias en las fechas en las que se aplicó Botrysec 98 WP (SiO<sub>2</sub>) ni un efecto acumulativo. Tampoco la propia enfermedad parece activar la síntesis de fenoles, con valores similares para el testigo y los distintos tratamientos con o sin Si.



**Figura 42.** Curva de contenido de fenoles totales en tejido vegetal con muestreos cada 7 días (julio-octubre 2021).

**Tabla 53.** Análisis del contenido de fenoles totales (mg ácido gálico) en el ensayo para los 3 años (2019-2021).

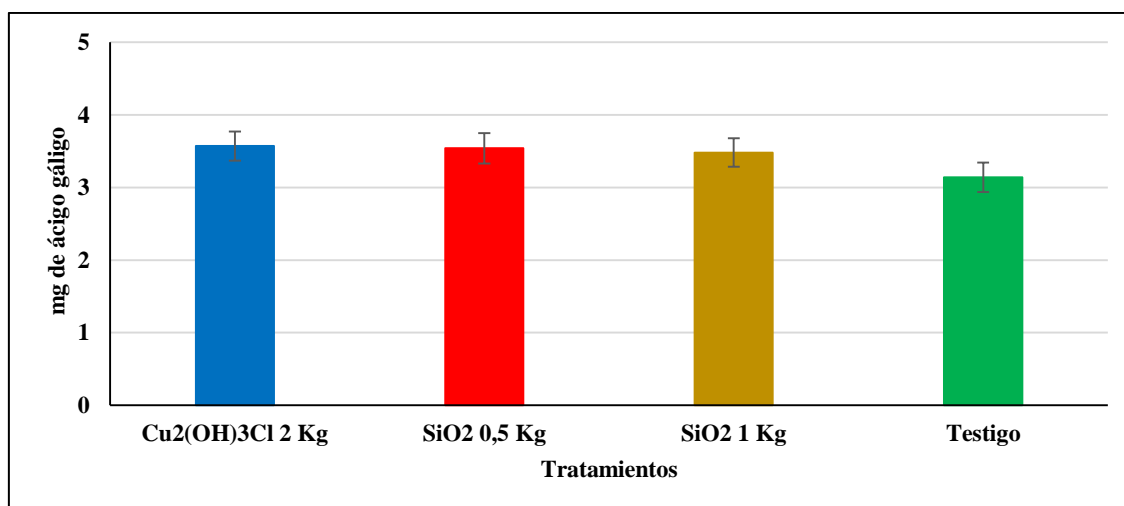
Fuente de variación	df		FENOLES
Tratamiento	3	F	0,96
		P<	0,4114
Año	2	F	5,26
		P<	0,0230

**Tabla 55.** Valores medios del contenido de fenoles ( $\pm$ et) de los tratamientos (2019-2021).

Tratamiento	FENOLES
Testigo	3,14 ( $\pm$ 0,20) a
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	3,57 ( $\pm$ 0,20) a
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	3,54 ( $\pm$ 0,21) a
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	3,48 ( $\pm$ 0,20) a
Coefficiente de variación (%)	39,54

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 43, se puede observar el contenido medio de fenoles totales, durante los tres años para los tratamientos comunes en evaluación.



**Figura 43.** Contenido medio de fenoles totales ( $\pm$  et) para el periodo 2019-2021.

### 5.3.9. Producción



En la tabla 56, se presentan los resultados del análisis de varianza para la producción de 2021.

**Tabla 56.** Análisis de varianza para los datos de producción en el ensayo del 2021.

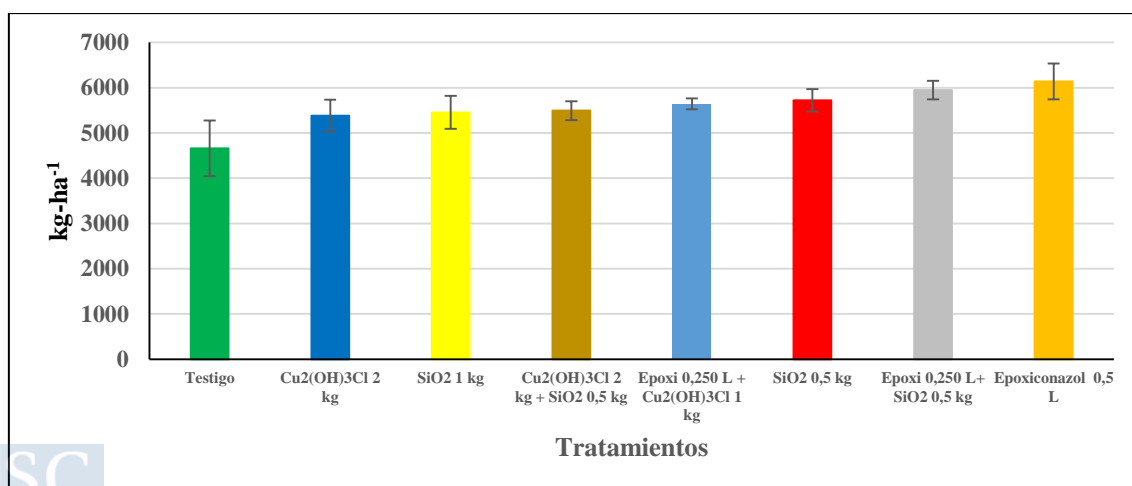
Fuente de variación	df		PRODUCCIÓN
Tratamiento	7	F	0,161
		P<	0,989
Bloque	2	F	0,053
		P<	0,948

**Tabla 57.** Valores de producción ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\pm\text{et}$ ) de los tratamientos del año 2021.

Tratamiento	PRODUCCIÓN	
Testigo	4659 ( $\pm 615,85$ )	a
$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ 2 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	5379 ( $\pm 353,53$ )	a
$\text{SiO}_2$ 0,5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	5455 ( $\pm 248,72$ )	a
$\text{SiO}_2$ 1 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	5492 ( $\pm 363,96$ )	a
Epoxiconazole 0,250 L + $\text{SiO}_2$ 0,5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	5644 ( $\pm 203,19$ )	a
Epoxiconazole 0,5 L $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	5720 ( $\pm 395,48$ )	a
$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ 1 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ + $\text{SiO}_2$ 0,5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	5947 ( $\pm 210,14$ )	a
Epoxiconazole 0,250 L $\cdot\text{ha}^{-1}$ $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ 1 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	6136 ( $\pm 120,42$ )	a
Coefficiente de variación (%)	32,32	

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p\leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 44, se observa que hay una cierta relación entre impacto de la roya y rendimiento de las plantas en el segundo año de producción, aunque las diferencias entre tratamientos no son estadísticamente significativas porque la variabilidad entre parcelas es muy alta, especialmente en el testigo. La diferencia entre la parcela testigo y las tratadas con Epoxi fue de más de 1477  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .



**Figura 44.** Rendimiento promedio de grano maduro de café ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) ( $\pm$  et) en las parcelas sometidas a los distintos tratamientos en 2021.

### 5.3.10. Calidad

En la tabla 58, se presentan los valores del análisis organoléptico, observándose que todos los tratamientos se encuentran dentro del mismo rango de clasificación (80-84) como “muy bueno y de tipo especial”.

**Tabla 58.** Resultados de los análisis organolépticos del grano de café (2021), según la escala de la Specialty Coffee Association of América (SCAA).

<b>Análisis Técnico y Perfil de Taza</b>			
<b>Tratamientos</b>	<b>Punteo</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Tipo</b>
Testigo	82,13	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg	81,63	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg	81,88	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
SiO <sub>2</sub> 1 kg	81,75	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
Epoxi 0,250 L+ SiO <sub>2</sub> 0,5 kg	82,25	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
Epoxi 0,250 L + Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg	81,75	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 Kg+ SiO <sub>2</sub> 0,5 kg	81,13	Muy bueno /especial	Estrictamente Duro

En la tabla 59, se pueden observar los valores de los resultados del perfil de taza obtenido en los análisis realizados en los laboratorios de ANACAFE, donde los valores del aroma son similares para todos los tratamientos, pero para el caso de la acidez, los tratamientos con Si, presentan los valores más bajos comparados con el Cu y el testigo sin aplicación.

**Tabla 59.** Características de perfil de taza promedio 2021.

<b>Características de Perfil de Taza 2021</b>				
	<b>Testigo</b>	<b>Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl 2 kg·ha<sup>-1</sup></b>	<b>SiO<sub>2</sub> 0,5 kg·ha<sup>-1</sup></b>	<b>SiO<sub>2</sub> 1 kg·ha<sup>-1</sup></b>
<b>Aroma</b>	7,50	7,50	7,50	7,50
<b>Acidez</b>	7,50	7,50	7,37	7,37

### 5.3.11. Días control de los tratamientos en 2021.

En las tablas 60 y 61, se presentan los resultados del análisis de varianza sobre los “días control” ejercidos por cada uno de los tratamientos sobre la enfermedad.

**Tabla 60.** Análisis de varianza para los días control en el ensayo de 2021.

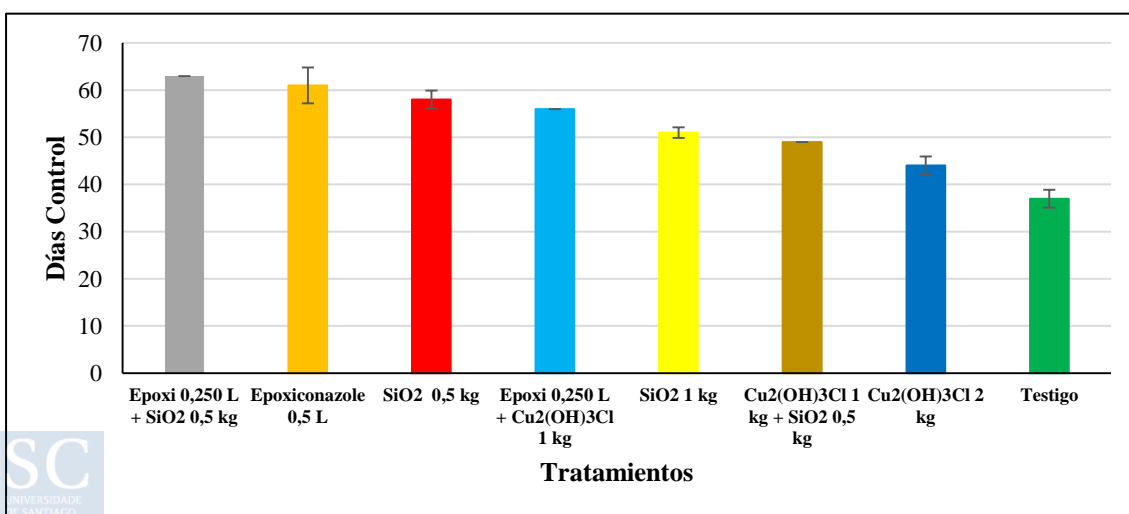
Fuente de variación	df		DÍAS CONTROL
Tratamiento	7	F	28,00
		P<	0,000
Bloque	2	F	9,000
		P<	0,003

**Tabla 61.** Valores medios de los días control ( $\pm et$ ) de los tratamientos en 2021.

Tratamiento	Días Control	
Testigo	37 ( $\pm 1,91$ )	e
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 2 kg·ha <sup>-1</sup>	44 ( $\pm 1,91$ )	de
SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	58 ( $\pm 1,91$ )	abc
SiO <sub>2</sub> 1 kg·ha <sup>-1</sup>	51 ( $\pm 1,91$ )	bcd
Epoxi 0,250 L + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	63 ( $\pm 0,00$ )	a
Epoxi 0,5 L kg·ha <sup>-1</sup>	61 ( $\pm 3,81$ )	ab
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup> + SiO <sub>2</sub> 0,5 kg·ha <sup>-1</sup>	49 ( $\pm 0,00$ )	cd
Epoxi 0,250 L·ha <sup>-1</sup> Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl 1 kg·ha <sup>-1</sup>	56 ( $\pm 0,00$ )	abc
Coeficiente de variación (%)	5,44	

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con  $p \leq 0,05$  según el test de Tukey b.

En la figura 45, se muestran los resultados sobre los días control promedio, ejercidos por cada uno de los tratamientos; el tratamiento con mezcla de Epoxi + SiO<sub>5</sub> es el que ejerce un mayor número de días control sobre la enfermedad, con el promedio de 63 días; el testigo es el que superó más rápidamente el umbral de severidad establecido por ANACAFE (5%), a los 37 días después de la primera aplicación. Cabe destacar que no hay diferencias significativas en días control entre el SiO<sub>5</sub> y los tratamientos con el fungicida sistémico.



**Figura 45.** Días control de los tratamientos ( $\pm et$ ) en el ensayo de 2021.

### 5.3.12. Costo días control de los tratamientos.

En la tabla 62, se presentan los resultados del análisis del costo de los días control ejercidos por cada uno de los tratamientos en 2021, donde claramente podemos observar que el tratamiento con aplicaciones de Si05 es el que presenta el costo más bajo con respecto al resto de los tratamientos. El control del Si05 tiene un costo por ha de \$12,82 USD y un promedio de 58 días control, traduciéndose en un costo promedio por día de \$0,22 USD y el tratamiento a base de Cu, es el que presenta el costo días control más elevado, con un valor de \$29,48 USD por hectárea y un promedio de 44 días control (\$0,67 USD costo por día).

**Tabla 62.** Análisis del costo sobre el promedio de días control en el ensayo del 2021.

Tratamiento	Tratamiento	Dosis·ha <sup>-1</sup>	Costo fungicida ha <sup>-1</sup>	Días Control	Costo día control
1	Testigo	-----	-----	37	-----
2	Cu2	2 kg	\$29,48	44	\$0,67
3	Si05	0,5 kg	\$12,82	58	<b>\$0,22</b>
4	Si1	1 kg	\$24,36	51	\$0,48
5	Epoxi + Si	0,250 L + 0,5 kg	\$21,79	63	\$0,35
6	Epoxi + Cu	0,250 L + 1 kg	\$23,72	56	\$0,42
7	Si+ Cu	1kg + 0,5 kg	\$27,56	49	\$0,56
8	Epoxi	0,5 L	\$17,95	61	\$0,29

En la tabla 63, se describe el análisis de la relación beneficio costo (RBC) y rentabilidad de cada uno de los tratamientos en comparación con el testigo, tomando como referencia la producción del año 2021 y los costos de venta en el mercado internacional para esa fecha, así como el costo total de producción de cada uno de los tratamientos. En dicha tabla podemos observar que el tratamiento con aplicaciones de Epoxi es el que presenta una rentabilidad mayor de 45,21% comparada con el testigo, seguida del tratamiento con aplicaciones en mezcla de Epoxi + Si con un 33,77% por arriba y la parcela con aplicaciones de Si05 con una rentabilidad de 31,34% por arriba comparada con el testigo sin aplicación. Las combinaciones que incluyen Epoxi + Si, ya sea en combinación entre sí o con otros elementos, son las más rentables según la RBC. Sin embargo, es importante considerar otros factores como la disponibilidad de recursos, la viabilidad técnica y el impacto ambiental antes de tomar una decisión final.

**Tabla 63.** Relación beneficio costo y rentabilidad de los tratamientos de control de roya para el año 2021 (USD)

Descripción	Testigo	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Epoxiconazole + SiO <sub>2</sub>	Epoxiconazole + Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl + SiO <sub>2</sub>	Epoxiconazole
	-----	2 kg	0,5 kg	1 kg	0,250 L + 0,5 kg	0,250 L + 1 kg	0,5 kg + 1 kg	0,5 L
Costo total de producción	\$813.08	\$936.08	\$883.22	\$918.80	\$910.15	\$918.79	\$927.44	\$901.49
Ingreso Bruto	\$1,956.78	\$2,259.18	\$2,402.40	\$2,291.10	\$2,497.74	\$2,370.48	\$2,306.64	\$2,577.12
Ingreso Neto	\$1,143.70	\$1,323.10	\$1,519.18	\$1,372.30	\$1,587.60	\$1,451.70	\$1,379.20	\$1,675.63
Relación beneficio costo	1,4066	1,4134	1,7200	1,4936	1,7443	1,5800	1,4871	1,8587
Rentabilidad	40,66%	41,34%	<b>72,00%</b>	49,36%	74,43%	58,00%	48,71%	<b>85,87%</b>

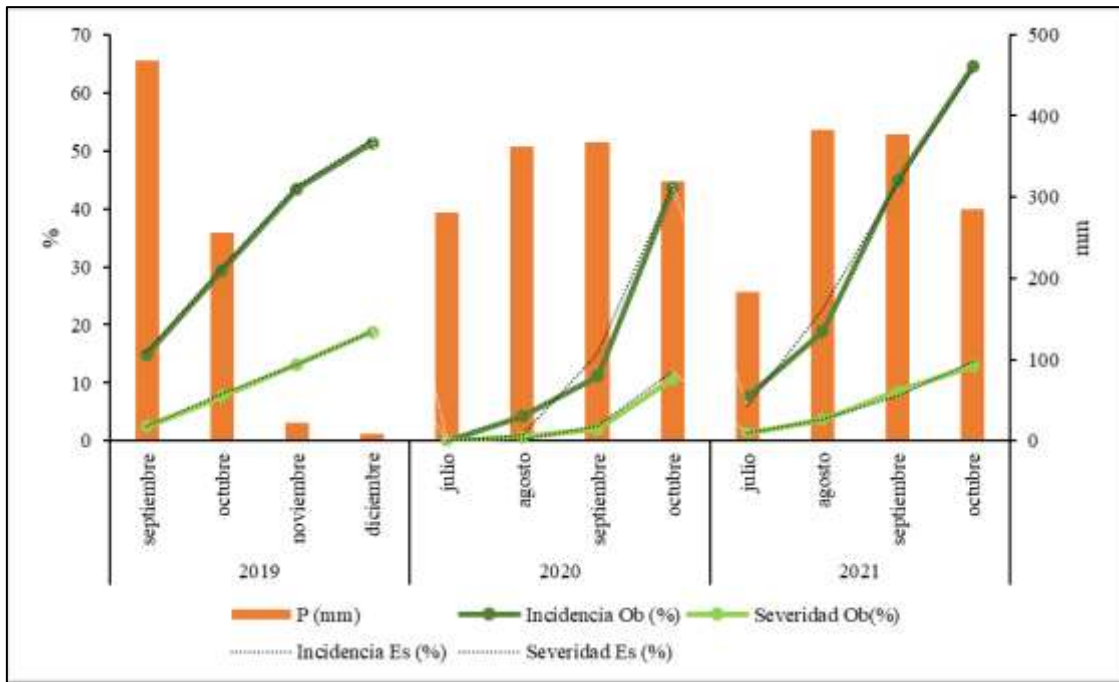
#### 5.4. ESTUDIO EPIDEMIOLOGICO

En la tabla 64, se muestra, para el testigo de cada año, los datos del modelo o modelos que mejor se ajustaron a los datos de incidencia y/o severidad de las epidemias en los tres años según interpretación del conjunto de datos proporcionados por el programa EPIMODEL. En la figura 46, se muestran las gráficas de incidencia y severidad para el testigo los tres años y también las curvas con los datos esperados de acuerdo con el modelo que mejor se ajustó a los datos observados; como se puede ver hay un muy buen ajuste para los modelos seleccionados. Los valores finales observados en octubre y los esperados para esa última evaluación son similares (tabla 64).

**Tabla 64.** Datos de los modelos epidemiológicos que mejor se ajustan a las CPE (incidencia y severidad) sin intervención (T) en los tres años de estudio. Porcentaje final de incidencia o severidad observada (Ob) y esperada (Es).

DPC	Intercepto	Pendiente	Modelo	<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	<sup>2</sup> SEEy	% final Ob	% final Es
T19_I	-0,04	0,123	Monomolecular	0,99	0,021	51,3	52
T19_S	-0,03	0,500	Lineal	0,99	0,001	18,8	18,9
T20_I	-3,10	0,820	Gompertz	0,96	0,268	43,5	44
T20_S	-2,85	0,520	Gompertz	0,96	0,173	10,7	12
T21_I	-1,60	0,600	Gompertz	0,99	0,093	64,5	64
T21_S	-1,69	0,250	Gompertz	0,99	0,035	12,9	13,8

<sup>1</sup> coeficiente de determinación <sup>2</sup> error típico para la estimación de y



**Figura 46.** CPE para incidencia y severidad (%) observadas (Ob) para el testigo los tres años y CPE con datos esperados (Es) según el modelo epidemiológico que mejor se ajustó a los datos observados (tabla 64).

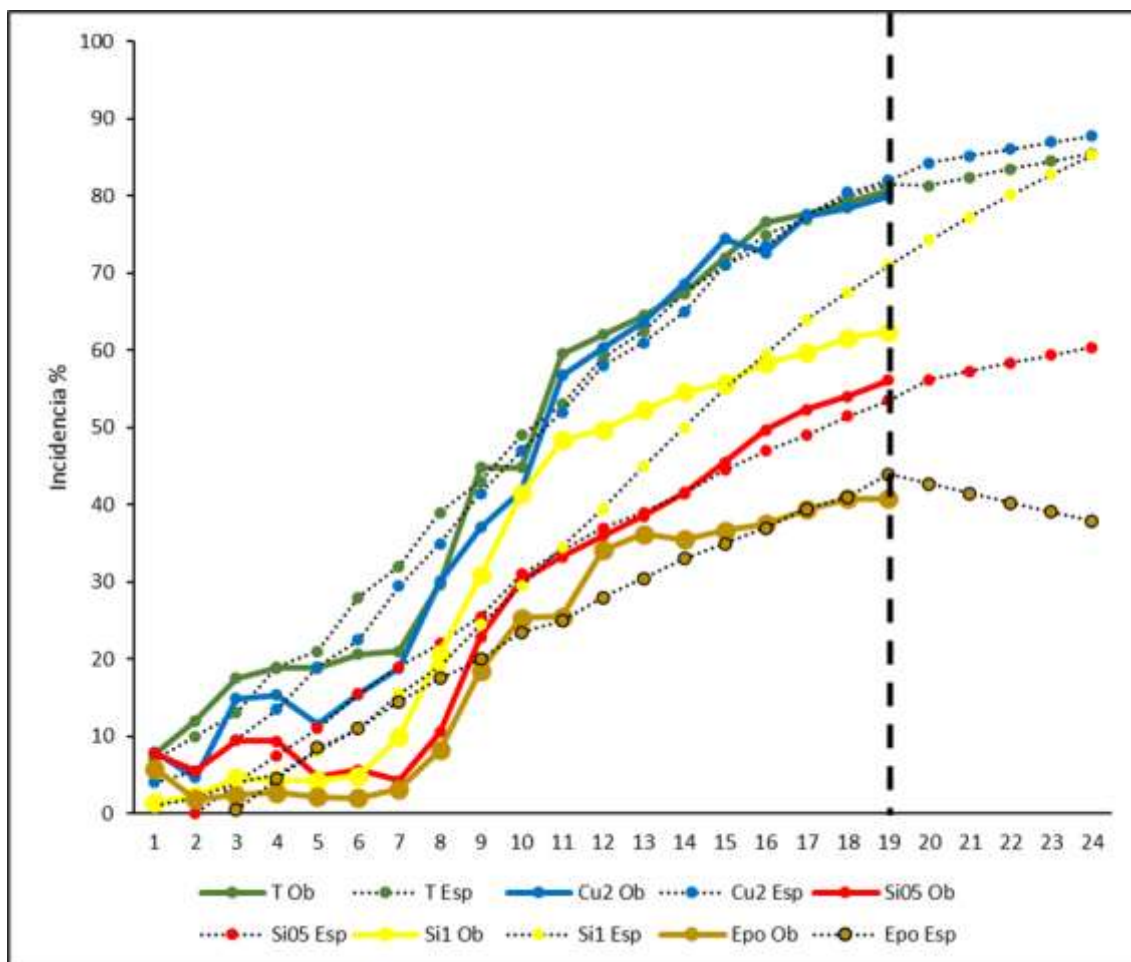
La comparación de las CPE con 5, 10 y 19 datos, para la severidad e incidencia en el testigo y los tratamientos no combinados en 2021 se presenta en las tablas 65 y 66. Para la incidencia el testigo tiene la CPE típica de un patógeno policíclico, pero con el punto de inflexión desplazado y por eso se ajusta mejor al modelo Gompertz que al Logístico; coincide con el modelo que mejor se ajustaba a los 4 datos, uno por mes, utilizados para 2021. Los tratamientos alteran claramente ese comportamiento típico, con mayor duración del retraso en la fase inicial de las epidemias para los tratamientos que mejor eficacia tuvieron en la reducción de la incidencia de roya.

**Tabla 65.** Selección de modelos epidemiológico que mejor se ajustan a las CP de la incidencia de la roya a partir de muestreos mensuales (m), quincenales (q) o semanales (s), para testigo y los tratamientos realizados en 2021. Valores de incidencia observados (Ob) y esperados (Es) al final del periodo de evaluación.

DPC	Nº datos	Intercepto	Pendiente	Modelo	<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	<sup>2</sup> SEEy	Ob %	Es %
Tm	5	-1,59	0,6	Gompertz	0,99	0,08		
Tq	10	-1,27	0,29	Gompertz	0,97	0,16		
<b>Ts</b>	<b>19</b>	<b>-1,15</b>	<b>0,15</b>	<b>Gompertz</b>	<b>0,97</b>	<b>0,14</b>	80,8	81,5
Cu2m	5	-1,73	0,61	Logístico/G*	0,98	0,19		
Cu2q	10	0,05	0,12	Monomolecular	0,76	0,31		
<b>Cu2s</b>	<b>19</b>	<b>-1,34</b>	<b>0,16</b>	<b>Gompertz</b>	<b>0,95</b>	<b>0,21</b>	80	82
Si05m	5	-0,11	0,12	Lineal	0,92	0,07		
Si05q	10	-0,15	0,09	Lineal/M*	0,91	0,09		
<b>Si05s</b>	<b>19</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,04</b>	<b>Monomolecular</b>	<b>0,84</b>	<b>0,12</b>	56,2	53,5
Si1m	5	-2,15	0,6	Gompertz	0,96	0,22		
Si1q	10	-1,73	0,28	Gompertz/M*	0,93	0,24		
<b>Si1s</b>	<b>19</b>	<b>-1,63</b>	<b>0,14</b>	<b>Gompertz/M*</b>	<b>0,94</b>	<b>0,21</b>	62,4	71
Epoxim	5	-0,14	0,13	Monomolecular/L*	0,89	0,08		
Epoxiq	10	-0,11	0,07	Monomolecular	0,90	0,07		
<b>Epoxi</b>	<b>19</b>	<b>-0,10</b>	<b>0,04</b>	<b>Monomolecular/L*</b>	<b>0,90</b>	<b>0,07</b>	40,8	44

\*Ajuste similar; L lineal, M Monomolecular, G Gompertz. <sup>1</sup> coeficiente de determinación <sup>2</sup> error típico para la estimación de y

En la figura 47, se presentan las CPE de datos observados para Incidencia y también los esperados según los modelos que mejor se ajustan para cada tratamiento cuando se utilizan todos los datos de los 19 muestreos (en negrita en la tabla 65). El valor final de incidencia en el último muestreo se predijo bien en la mayoría de los tratamientos y testigo, salvo en el caso de Si1, donde se sobreestima. En el Testigo y en los tratamientos con peor eficacia (Cu y Si1), el modelo más adecuado es Gompertz y sin embargo tanto Si05 como Epoxi, los más eficaces, son mejor descritos por un modelo Monomolecular e incluso Lineal. Los modelos con mejor ajuste se han utilizado para “predecir” el avance de la incidencia en las siguientes semanas posteriores a la última observación, hasta la semana 24 en la que se finalizará la cosecha, ya con tiempo seco (figura 47).



**Figura 47.** CPE semanal para incidencia en 2021 en base a datos observados (Ob) para los datos semanales (tabla 65), sin tratamientos combinados y CPE con datos esperados (Es) según el modelo epidemiológico que mejor se ajustó. A partir de la línea discontinua vertical, predicción para las semanas 20 a 24.

Para los datos de severidad, los ajustes a los modelos (tabla 66) no muestran esas diferencias que se veían en Incidencia, probablemente porque los valores de 2021 fueron bajos en general. En este caso el modelo Lineal (con resultados similares al Molecular) fue el que mejor describió las CPE. De nuevo la predicción del valor al final del periodo de tratamientos/muestreo fue buena.

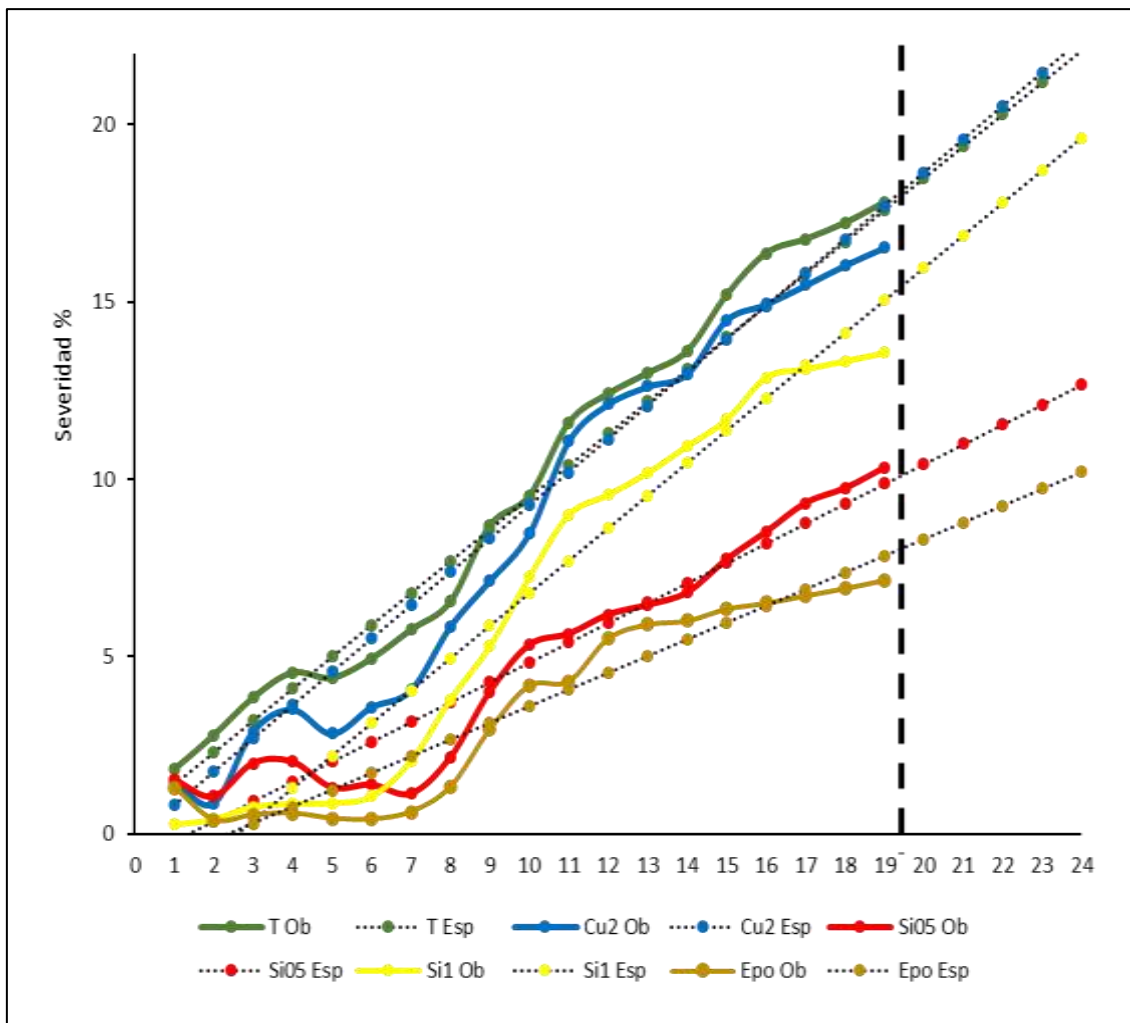
**Tabla 66.** Selección del modelo epidemiológico que mejor se ajusta a las CPE para Severidad de la roya a partir de muestreos mensuales (m), quincenales (q) o semanales (s), para el Testigo y todos los tratamientos realizados en 2021. Valores de severidad observados (ob) y esperados (es) al final del periodo de evaluación.

DPC	Nº datos	Intercepto	Pendiente	Modelo	<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	<sup>2</sup> SEE <sub>y</sub>	Ob %	Es %
T <sub>m</sub>	5	0,027	0,04	Lineal	0,99	0,01		
T <sub>q</sub>	10	0,001	0,01	Lineal/M*	0,98	0,01		
<b>T<sub>s</sub></b>	<b>19</b>	<b>0,005</b>	<b>0,01</b>	<b>Lineal/M*</b>	<b>0,98</b>	<b>0,01</b>	17,8	17,6
Cu2 <sub>m</sub>	5	-1,59	0,20	Gompertz	0,97	0,07		
Cu2 <sub>q</sub>	10	-1,47	0,1	Gompertz	0,95	0,07		
<b>Cu2<sub>s</sub></b>	<b>19</b>	<b>-0,004</b>	<b>0,01</b>	<b>Lineal/M*</b>	<b>0,97</b>	<b>0,01</b>	16,5	17,7
Si05 <sub>m</sub>	5	-0,01	0,02	Lineal/M*	0,88	0,01		
Si05 <sub>q</sub>	10	-0,01	0,01	Lineal/M*	0,88	0,01		
<b>Si05<sub>s</sub></b>	<b>19</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>Lineal/M*</b>	<b>0,90</b>	<b>0,01</b>	10,33	9,9
Si1 <sub>m</sub>	5	-0,05	0,04	Lineal/M*	0,96	0,01		
Si1 <sub>q</sub>	10	-0,03	0,02	Lineal/M*	0,93	0,02		
<b>Si1<sub>s</sub></b>	<b>19</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>Lineal/M*</b>	<b>0,91</b>	<b>0,01</b>	13,56	15
Epxi <sub>m</sub>	5	-0,02	0,02	Lineal/M*	0,87	0,01		
Epxi <sub>q</sub>	10	-0,012	0,01	Lineal/M*	0,80	0,01		
<b>Epxi<sub>s</sub></b>	<b>19</b>	<b>-0,013</b>	<b>0,005</b>	<b>Lineal/M*</b>	<b>0,88</b>	<b>0,01</b>	7,2	7,9

\*Ajuste similar; M, monomolecular; . <sup>1</sup> coeficiente de determinación <sup>2</sup> error típico para la estimación de y

Destaca, en ambos casos, que una mayor frecuencia de muestreo no hace que el ajuste sea mejor; en general, no hay cambios en el modelo con mejor ajuste, por lo que el muestreo mensual, antes de la aplicación de tratamiento, si éste es necesario, sería suficiente.

Utilizando el modelo que mejor se ajusta se ha hecho la predicción de la evolución de la severidad tras el último tratamiento y hasta la cosecha (figura 48).



**Figura 48.** CPE semanal para severidad en 2021 en base a datos observados, Ob y curvas con datos esperados (Es) según el modelo epidemiológico que mejor se ajustó a la CPE. (tabla 66). A partir de la línea discontinua vertical, predicción para las semanas 20 a 24.

## 6. DISCUSIÓN

La roya del café es una de las enfermedades más devastadoras para las plantaciones de café, siendo una de las principales causas de pérdidas en la producción, provocando un declive de plantas de café en todo el mundo por las pérdidas económicas ocasionadas. En los países de Centroamérica, y especialmente en Guatemala, conservar un cultivo tradicional de *Coffea arabica* enfocado en la calidad es crucial para poder comercializar el producto con un valor agregado en el mercado internacional.

Las dificultades para mantener estos cultivos son significativas, debido a que los costos de control de la roya son altos, y las exigencias de la agricultura orgánica, junto con las prohibiciones de ciertos fitosanitarios para la exportación, complican aún más el manejo de esta enfermedad. Además, las alternativas ecológicas como el control biológico, los fungicidas botánicos y los estimuladores de defensas, aunque prometedoras, aún no han demostrado ser lo suficientemente eficaces a gran escala para reemplazar los métodos tradicionales de control de la roya.

En busca de alternativas para contrarrestar el daño ocasionado por la roya del café, el dióxido de silicio se presenta como una alternativa ecológica, debido a que es mineral orgánico, de bajo riesgo asociado a su manejo (Tubaña y Heckman 2015) en comparación con los pesticidas químicos convencionales, no es persistente en el medio ambiente y es eficaz contra una amplia gama de plagas y enfermedades (Quiroga, 2016), además de por su capacidad de formar una doble barrera física protectora y fortalecer las defensas naturales de las plantas (Chérif *et al.*, 1994; Shetty *et al.*, 2011, Debona *et al.*, 2013 y Wang *et al.*, 2017). Aunque en este trabajo no se ha podido confirmar, estudios como los de García *et al.*, (2018), han demostrado que este elemento puede inducir respuestas de defensa en las plantas, lo que podría ayudar a combatir patógenos como la roya del café.

Hasta ahora, el uso de productos a base de Cu ha sido de importancia fundamental en el manejo de la roya del café (Pozza, 2008) porque tienen un amplio espectro de actividad contra otras enfermedades como *Mycena citricolor* y *Cercospora coffeicola*, además posee un bajo riesgo de inducir resistencia (código FRAC M1). Cuando se aplica en la superficie de las hojas, los fungicidas de cobre previenen el control de la roya formando una barrera capaz de impedir la germinación y penetración de los tejidos foliares por las uredosporas (Souza *et al.*, 2011). Entre los distintos formulados de cobre, el oxiclورو es uno de los productos más utilizados para la prevención de

enfermedades como la roya, debido a su mejor adherencia y persistencia, menor riesgo de fitotoxicidad y por ser menos corrosivo (Nafarrate, 2005). Sin embargo, por su condición de metal pesado, su uso como producto fitosanitario está en revisión en las últimas décadas a pesar de ser por el momento un fungicida muy utilizado en el control por ejemplo del mildiu en vid o en patata y como bacteriostático y todavía de difícil sustitución en agricultura ecológica; pero en la UE está en las listas de productos “candidatos a la sustitución” y como primer paso de cara a su prohibición se ha limitado su uso a 28 kg por hectárea durante un período de 7 años, según el Diario Oficial de la Unión Europea-DOUE, (2018). Los resultados obtenidos en los ensayos realizados en este estudio permiten proponer el dióxido de silicio como un buen candidato a sustituir al cobre en algunos de sus usos como fungicida.

A pesar de que hay numerosos estudios sobre el efecto del silicio en la protección de cultivos frente a hongos (Rodrigues *et al.*, 2008) y algunos en café contra roya (Pereira *et al.*, 2009; Carré-Missio *et al.*, 2014; Lopes *et al.*, 2013b), se han utilizado otras formas de Si, distintas del SiO<sub>2</sub> (silicato potásico y/o cálcico), con frecuencia en aplicación al suelo, en vez de en aplicación foliar como en este estudio. Según los resultados obtenidos durante los 3 años de evaluación en condiciones muy favorables para el ataque de *H. vastratix*, el SiO<sub>2</sub> en aplicación foliar tiene efecto protector contra la roya del café, significativamente mejor que el estándar con cobre y en 2020 y 2021 comparable al epoxiconazole, que es uno de los fungicidas sistémicos con más eficacia contra la roya del café (Morales, 2018). García *et al.*, (2018) afirman que el dióxido de silicio crea un entorno desfavorable para el hongo por su elevado poder higroscópico al alterar su microambiente. Esta influencia en la dinámica de la enfermedad hace que el uso de fuentes de silicio en formas de dióxido en aplicaciones foliares, tenga gran interés en investigaciones agrícolas (Quiroga, 2016; Ferreira, 2017) porque ofrece un método prometedor para la prevención de enfermedades en las que es preciso que haya un número de horas de hoja mojada en mildius de algunos cultivos como la patata (Carneiro *et al.*, 2003) o la vid (Bowen *et al.*, 1992) y también para otras royas incluyendo la del café, especialmente cuando el cultivo está dentro de la agricultura ecológica. Por todo ello, se considera al dióxido de silicio, como una alternativa prometidora y respetuosa con el medio ambiente para la prevención y control de enfermedades como la roya, independientemente del su uso actual de diversos compuestos de silicio como fertilizantes que también pueden tener otros efectos que, indirectamente, den lugar a una mayor tolerancia a los ataques de *H. vastratix*.

La roya del café es un patógeno de muy difícil control como se ve por los valores de incidencia, que aun en el tratamiento más efectivo se mantuvieron por encima del 30% para los tratamientos con silicio en 2019 (2 meses más tarde) y en 2021; en 2020 para la dosis de 0,5 kg·ha<sup>-1</sup>, mostró una incidencia máxima del 13,3%. Pero en 2021 también el fungicida sistémico estuvo por encima de ese 30% en incidencia. Hay algunos estudios previos en los que se vieron efectos significativos en la reducción de la incidencia de la roya y otros hongos patógenos del café y otros cultivos, con aplicaciones de silicio en diversas formas, y con resultados variables: Figueiredo (2007) indica que las aplicaciones de silicio líquido foliar reducen significativamente la incidencia de la roya, con resultados variables dependiendo del tipo de silicato utilizado (silicato de sodio y potasio) y el año de estudio. Pozza *et al.*, (2004) informaron de una reducción en la incidencia de *Cercospora coffeicola* mediante aplicaciones de silicato de calcio, en este caso vía suelo; sus resultados fueron superiores a los obtenidos por Ibarra *et al.*, (2022) quienes indican que las aplicaciones de dióxido de silicio vía foliar disminuyeron la incidencia de enfermedades como la roya (*H. vastratrix*) y la pestalotiosis (*Pestalotia* spp) en la fruta milagrosa (*Synsepalum dulcificum*) por debajo del 20%, comparado con el testigo sin aplicación que presentó un 50% y el tratamiento químico (Azoxistrobina + difenoconazole) que se conservó bajo un rango de 2%,

Además de la incidencia, las aplicaciones de SiO<sub>2</sub> durante los 3 años de evaluación también redujeron la severidad de los daños; el tratamiento Si05 ejerce un buen efecto sobre la enfermedad, con valores por debajo del 9%, cuando el testigo superaba el 10%. En el año 2019, presenta el valor más bajo comparado con el resto de tratamientos, en el año 2020 estuvo únicamente por encima de la mezcla del Epoxi + Si05, pero por debajo del Si1, Cu2 y del testigo y en al año 2021, el tratamiento de Si05 mostró nuevamente buenos resultados, siendo superado únicamente por el fungicida sistémico (Epoxi). Otros autores ven también un efecto significativo de diversas formas de Si en la severidad de varias enfermedades de etiología fúngica: (Pozza *et al.*, (2004) en cercosporosis en café y con silicato de calcio; Morato y Cardona (2021) con *Fusarium oxysporum* en tomate y Fortunato *et al.*, (2012) *F. oxysporum* f.sp. cubense en plantas de banano.

La defoliación es el efecto más debilitante de la roya, especialmente cuando ocurre de forma precoz, porque afecta a la maduración del fruto, pero también porque impide que la planta se recupere tras la cosecha (Avelino y Rivas, 2013). En este ensayo, pese a los datos de incidencia y severidad, la defoliación fue muy baja y similar

entre tratamientos durante los años 2019 y 2020 lo que puede explicarse por la poda de renovación en 2018. En 2021, ya con mayor defoliación, las diferencias respecto al cobre y el testigo son significativas desde septiembre; el tratamiento con Si05 permite mantener niveles de defoliación similares a los del Epoxi y sus combinaciones, no así el Si1. Según los resultados publicados por Lopes *et al.*, (2013a), las aplicaciones de escoria de silicio al suelo no redujeron la defoliación en la planta de café cuando éstas eran atacadas por *Mycosphaerella coffeicola*, comparando con el buen efecto del tebuconazole que redujo la defoliación hasta un 65% comparados con el testigo sin aplicación. En este estudio, en 2021 se redujo la defoliación en un 18,7%, 17,7% y 12,2% cuando se aplicó Epoxi, Si05 y con la mezcla de ambos a media dosis, respectivamente.

A nivel de incidencia, severidad y defoliación, parece haber una cierta sinergia cuando el Si se combina con el fungicida sistémico. Las mezclas de tratamientos a media dosis utilizadas en 2020 y sobre todo 2021 dan una información interesante respecto al potencial del Si pero también respecto a posibles mejoras en el uso de productos sistémicos de alta eficacia pero con alto riesgo de selección de razas de roya resistentes, como los triazoles (código FRAC 3 ) o las estrobilurinas (código FRAC 11): se puede rebajar la dosis sin disminuir significativamente la eficacia fungicida, mezclando tanto con el estándar cobre como con el propio Si. Existe una sinergia cuando el Si se mezcla con el Epoxi, pero esto no ocurre cuando el Si se combina con el Cu, ya que durante la evaluación de 2021, siempre presentó resultados significativamente diferentes de los de los testigos para la incidencia, severidad y defoliación. Estos últimos resultados son similares a los presentados por Lopes *et al.*, (2013c), quien asegura que después de las evaluaciones realizadas para el control de la roya del café, no vieron un efecto sinérgico cuando se combinó el silicato de potasio con hidróxido de cobre, pues la mezcla no resultó efectiva para el control de la enfermedad.

Varios estudios muestran el efecto de distintos tratamientos con silicio en el área bajo la curva de progreso de la enfermedad, que evalúa en un solo valor el comportamiento de un determinado tratamiento; en general el ABCPE suele corroborar lo visto a nivel de incidencia, severidad y defoliación (Lopes *et al.*, (2013a). No siempre es fácil comparar resultados con otros ensayos, porque en algunos casos se compensa una menor efectividad de un producto alternativo con un mayor número de aplicaciones, como relatan Godoy *et al.*, (2012): el ABCP de la incidencia de *H. vastatrix* de los tratamientos con aplicaciones de arcilla silicatada vía foliar mostró valores entre 58 y 71% menores

que el control, pero utilizando 6 tratamientos frente a 1 solo con cyproconazol + tiametoxam.

Los datos recogidos en este estudio durante tres años, con climatología bastante similar, se han utilizado para conocer mejor cómo es el desarrollo de las epidemias de roya del café en Guatemala en este cultivo de café arábica tradicional, tras la poda de rejuvenecimiento. La información de modelización de la roya es abundante y se ha llegado a un alto nivel de sofisticación; pero, como es lógico, está centrada en grandes zonas de cultivo, más intensivo, con alta densidad, más mecanizado, con objetivos de máxima rentabilidad, especialmente en Brasil, donde ya en 1974 Montoya y Chávez afirmaron que, sin limitación por temperatura, lo que afecta a las epidemias son las precipitaciones, inóculo inicial y nivel de vegetación. En las últimas décadas, en Brasil se ha avanzado mucho en el conocimiento de la epidemiología de la roya de café en sus condiciones de cultivo, identificando parámetros de interés (geográficos, biológicos, agronómicos y climatológicos) y utilizando la información para medir la incidencia, calcular y pronosticar epidemias y decidir el momento de control (Zambolim, 2016; Pozza *et al.*, 2021). El estudio de las epidemias tiene como objetivo principal la racionalización y optimización de la aplicación de fungicidas que es lo que ahora mismo demanda el mercado internacional (Pozza *et al.*, 2021). El estudio preliminar imprescindible pasa por conocer cómo son las CPE en cada zona particular. En este trabajo, la incidencia y severidad de la enfermedad en la fase crítica desde inicio del ataque hasta que empieza la temporada seca en noviembre fueron muy bien descritas por el modelo Gompertz en 2020 y 2021 en esta parcela a 1000 m de altitud y con un régimen de temperaturas muy uniforme. El modelo de Gompertz origina una curva sigmoide que se diferencia de la logística por su crecimiento más acentuado en el inicio y es típica de patógenos policíclicos como la roya. Fue el modelo que tuvo mejor ajuste esos dos años y consiguió datos de estimación de incidencia y severidad muy precisos por lo que parece el más adecuado para hacer predicción de una forma relativamente sencilla, tras los primeros muestreos y con pocos muestreos. En 2019 no se identifica una tendencia tan clara, lo que tiene que ver tanto con la vegetación (primer año tras la poda de rejuvenecimiento) como con el periodo de estudio, más tardío que en 2020 y 2021 y por tanto correspondiente a una fase del progreso de la enfermedad más cercana a cosecha y con dos meses lluviosos y dos secos. Cuando se analizaron los datos de 2021 con observaciones semanales, también el ajuste de Gompertz fue bueno para las parcelas testigo sin tratar, aunque la mayor frecuencia de toma de datos no mejora ni el ajuste, ni la predicción y tampoco

cambia el modelo más adecuado en la mayoría de los casos. En 2021 se evaluó también el efecto de los tratamientos en la forma y pendiente de la CPE y se vio que a medida que aumentaba la eficacia del tratamiento las CPE cambiaban notablemente, con una mayor duración de la fase inicial por un retraso en la aparición de síntomas y un descenso en la velocidad de avance que se mantiene más o menos en función de la eficacia del tratamiento. Además, los modelos con mejor ajuste cambiaban a Monomolecular e incluso, para la severidad, siguen un modelo Lineal (Fig. 47 y 48). Las diferencias más notables en las CPE en 2021 se deben a que se pasó de un “calendario” de aplicación cada 30 días, a tener en cuenta el umbral del 5% de incidencia que recomienda ANACAFÉ (Avelino *et al.*, 2019). En las condiciones de este ensayo, ese umbral aunque parece válido inicialmente cuando se van a utilizar productos de buena eficacia como han sido el fungicida sistémico y también el SiO<sub>5</sub>, a partir de la semana 7 la epidemia se dispara, aunque no llegue a los niveles del testigo o el cobre (figuras 47 y 48). Las epidemias de roya del café han sido estudiadas con detalle en diversas zonas del mundo y presentan una alta variabilidad porque hay muchos factores implicados (Suresh *et al.*, 2012; Zambolim, 2016; Morales, 2018) y no siempre hay una correspondencia de ciclo por estar las parcelas a distinta latitud y/o altitud, y con distinto sistema de cultivo. En la zona de cultivo tradicional en Guatemala donde se llevaron a cabo los ensayos, las condiciones ambientales son relativamente estables (tablas 5 y 6) eso hace que se puedan seguir calendarios de tratamientos prácticamente fijos en la época de máximo riesgo de propagación de la enfermedad y por tanto con una modelización sencilla se pueden predecir cambios debidos a anomalías, algo que parece que va a ser cada vez más frecuente en el contexto del cambio climático. En zonas donde esa estabilidad climática no existe, los sistemas de alerta y predicción más sofisticados son imprescindibles (Hinnah *et al.*, 2020).

Para la variable de estudio sobre si las aplicaciones foliares de SiO<sub>2</sub> aumentan el contenido de silicio, los datos indican que en café el Si no tiene un efecto acumulativo cuando se aplica en pulverización, probablemente por ser una planta dicotiledónea, que suelen ser “no acumuladoras” (Datnoff *et al.*, 2001). El rango de datos que se presenta en otros trabajos, con aplicación extra de Si o no, es similar a la media obtenida en los tres años de evaluación, que estuvo en el rango 0,34-0,37 sin diferencias entre plantas tratadas y no tratadas con SiO<sub>2</sub>; en todos los casos situaría al café como planta “no acumuladora”. Aunque se ha comprobado la absorción de silicio en algunas variedades de café mediante microscopía de barrido electrónico y microanálisis de rayos

X (Botelho *et al.*, 2005), los bajos contenidos foliares de Si en comparación con otros elementos refuerzan esta clasificación. Botelho *et al.*, (2005) encontraron niveles de Si en hojas de café entre 0,2 y 0,3%, similares a los resultados de Caicedo y Chavarriaga (2007) (0,1-0,5%) y Salamanca y Sadeghian (2015) (0,05-0,45%). Estos resultados también coinciden con los de Pereira *et al.*, (2009) (0,45-0,51%) y Carré-Missio *et al.*, (2014) (0,24 y 0,30%), quienes no hallaron diferencias significativas en los contenidos foliares de Si después de aplicaciones de silicato de potasio para el control de *H. vastatrix*. En contraste, las plantas poáceas como el arroz y la caña de azúcar, reconocidas como acumuladoras, presentan niveles de silicio en la materia seca de hasta un 5% (Rodríguez *et al.*, 2007). Esto subraya que el café, al igual que otras dicotiledóneas como el tomate (Mitani y Ma, 2005), es ineficiente para absorber el silicio aplicado vía foliar. Como en este caso, Liang *et al.*, (2005) concluyen que, a pesar de que los niveles de acumulación de silicio no aumentaron después de las aplicaciones, sí contribuyó a reducir la incidencia, severidad y defoliación provocada por oídio en pepino. Pozza *et al.*, (2004), consideran que esto puede ocurrir debido a que las plantas de café tratadas con silicio presentan un mayor engrosamiento de la cutícula, tal como comprobaron tras aplicaciones para el control de *C. coffeicola*.

Según los resultados del análisis de fenoles totales en hoja, las aplicaciones foliares de SiO<sub>2</sub> no estimularon las defensas en las plantas de café. Pereira *et al.*, (2009) también indican que las aplicaciones vía foliar de silicio en forma de silicato de potasio, aunque contribuyeron a reducir la severidad de *H. vastatrix*, no potenciaron la actividad de las enzimas de defensa evaluadas. Datos muy diferentes a los presentados en otros cultivos como tomate por Morato y Cardona (2021), que encontraron que las plantas tratadas con silicio a nivel de suelo, incrementan la actividad enzimática de la Polifenoloxidasa (PPO) y consecuentemente promueven la producción de compuestos fenólicos, eventos relacionados con la disminución de la severidad de la enfermedad causada por *Fusarium oxysporum* f.sp. lycopersici; en el mismo sentido, Fortunato *et al.*, (2012), en evaluaciones realizadas en banano para el control de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense, vieron que las aplicaciones de silicato de calcio (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) disminuyeron la severidad de la marchitez, debido al incremento de la actividad PPO, la cual está directamente relacionada con el aumento de compuestos fenólicos en las plantas. Así mismo Chérif *et al.*, (1992), indican que la acción del silicio sobre el tejido del cultivo de pepino proporciona mayor acumulación de compuestos fenólicos en el sitio de la lesión en la planta causada por *Phyitium aphanidermatum*. Para una confirmación de este

resultado sería preciso hacer un análisis más detallado, incluyendo analíticas de otros muchos indicadores de que se está produciendo un estímulo de las reacciones de defensa en las plantas tratadas.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos durante esta evaluación, se logra concluir que la reducción de incidencia, severidad y defoliación conseguida por las aplicaciones de SiO<sub>2</sub> no parece ser debida a la acumulación de silicio ni tampoco está relacionado con la inducción de síntesis de compuestos fenólicos encargados de la defensa contra el ataque de *H. vastatrix*. Por todo ello parece que la reducción de la incidencia, severidad y defoliación provocada por este hongo patógeno, puede deberse solo al poder higroscópico y desecante que posee el silicio (Ramli *et al.*, 2021). Según Jani *et al.*, (2018), el silicio puede absorber humedad en gran capacidad, que oscila entre el 8% y el 36% de su peso seco, por lo que este tipo de productos se utilizan ya ampliamente en industria alimentaria y en todo tipo dispositivos que requieran ausencia de humedad; dentro de esas muchas aplicaciones se incluye la protección de las plantas frente a patógenos (Li *et al.*, 2020). En ese sentido, AGRI-Nova Science, menciona que el producto Botrysec a base de SiO<sub>2</sub>, aunque se comercializa como fertilizante, por su elevado poder higroscópico consigue reducir drásticamente la humedad ambiental y las posibles condensaciones formadas a nivel foliar, evitando así la germinación de las esporas de hongos como la roya del café por el efecto de la desecación inducida por el dióxido de silicio.

En Guatemala se han reportado pérdidas de hasta un 15% en la producción de café por la roya (Avelino y Rivas, 2013). En los datos de los años de ensayo se puede observar que las plantas tratadas obtuvieron una producción solo ligeramente por arriba del testigo en los dos años evaluados. La gran variabilidad en la producción en los primeros años de cosecha tras la poda de rejuvenecimiento hace que las diferencias no sean significativas, pero se ven tendencias tanto en 2020 como en 2021 hacia un efecto de una buena protección de la vegetación frente a la roya en la cantidad de cosecha. Ese buen comportamiento es algo que habría que confirmar en estudios de mayor duración porque es en el medio plazo donde la debilidad de las plantas por los ataques cada año repercutirá de forma significativa en la productividad de las plantas. Según el análisis organoléptico realizado a las muestras de grano de café, todos los tratamientos y también el testigo se clasifican los dos años dentro del rango “excelente” y de tipo “estrictamente duro” para la cosecha de los años 2020 y 2021, demostrando que las aplicaciones de Si no afectan la calidad de taza del café; además se puede observar que cierta mejora en la

acidez del mismo en comparación con el resto de los tratamientos, este resultado es prometedor debido a que los cafés ácidos están ganando cada vez más popularidad y este atributo es cada vez más utilizado como argumento de promoción debido a la tendencia actual de comercialización de café a nivel mundial basado en la producción de cafés especiales, los cuales se diferencian por su calidad de taza. Figueiredo (2007) reporta un marcado impacto del silicio en las características organolépticas de la bebida, mejorando significativamente la acidez, equilibrio y cuerpo del café en la variedad Mundo Novo.

Para el manejo adecuado de la roya del café se deben considerar los cuatro factores fundamentales: hospedero, patógeno, ambiente, manejo agronómico y rentabilidad, actuando de manera que las interacciones entre ellos disminuyan, afectando así el desarrollo de la epidemia, retrasando la aparición en el tiempo y/o reduciendo su expansión. En la gestión integrada de un patógeno como la roya es crucial registrar las condiciones favorables para que las primeras infecciones se produzcan. La presencia de primeros síntomas en planta y su propagación son cruciales para ajustar el programa de aplicaciones según sea necesario. Es fundamental conocer el efecto días control que ejerce cada uno de los productos que se utilizan dentro de los programas de control. En esta investigación los tratamientos con SiO<sub>5</sub>, Epoxi y la mezcla de estos dos, ofrecieron las mejores promedios de días control después de sobrepasar el umbral del 5% establecido por la Asociación Nacional del Café de Guatemala (58, 61 y 63 días respectivamente). Aunque el ciclo de la roya del café en Guatemala se considera que es de 30 días (Barquero, 2013), los programas de aplicación para el control de la roya del café podrían implementarse con intervalos de aplicación más largos ya que estos tres tratamientos demostraron buen efecto control durante la investigación. Según Morales (2018) de la Asociación Nacional del Café, durante una evaluación de siete fungicidas a base de triazoles para el control de roya, realizó aplicaciones con intervalos de 60 días y obtuvo resultados positivos, con valores de severidad por debajo de 5,83%, datos muy similares a los presentados durante esta evaluación. Además, Morales (2018) presenta costos de aplicación para el control de roya con rangos de \$19,10 y \$40,53 por hectárea (costo diario/ha \$0,32 y \$0,70), y dentro de ésta investigación, se debe destacar que el tratamiento con aplicaciones de SiO<sub>5</sub>, es el que posee un costo control más bajo comparado con los otros dos tratamientos mencionados anteriormente ( $\$12,82/\text{ha}^{-1} = \$0,22/\text{día}$ ), por debajo de los costos presentados por Morales (2018). En términos de sostenibilidad, Rivillas *et al.*, (2011) indica que el manejo de una enfermedad debe tener consecuencias mínimas en el equilibrio del medio ambiente y su aplicación tiene que

hacerse sin presentar riesgos para salud de los trabajadores en el campo, los resultados de este estudio indican que los programas de aplicación con SiO<sub>2</sub> y en mezcla con Epoxi, pueden extenderse para reducir los costos, disminuir el número de aspersiones durante el ciclo del cultivo, evitar la generación de resistencia del patógeno y daños en la salud de los trabajadores. Es importante considerar también otros factores como la disponibilidad de recursos de los productores de café, la viabilidad técnica en cada región y el impacto ambiental antes de decidir el programa de control adecuado.

El objetivo principal del análisis económico es brindar orientación a los productores de café en relación con los costos asociados a los programas de control de la roya, al mismo tiempo que presentar la variación y el impacto económico de cada uno de estos programas de control. Durante esta investigación se destaca que los tratamientos con aplicaciones de Epoxi, SiO<sub>2</sub> y la mezcla de ambos (a media dosis) fueron los que presentaron la mejor rentabilidad con respecto al resto de los tratamientos (85,87%, 72,00% y 74,43% respectivamente), estos datos son muy similares a los presentados por Rivillas *et al.*, (2011) donde la rentabilidad de los tratamientos químicos (cyproconazole + azoxystrobin y cyproconazole + thiamethoxam), oscilaron entre 88,66% y 82,14% respectivamente y a los presentados en el 2005, donde al evaluar el oxiclورو de cobre y triazoles, concluyó que el control de la enfermedad con estos fungicidas era viable desde el punto de vista económico, ya que los ingresos netos siempre fueron positivos con respecto al testigo sin aplicación. En este sentido los resultados de esta investigación permiten apreciar cómo las plantas con aplicaciones de SiO<sub>2</sub> ya solo o en mezcla con Epoxi, se presentan como la alternativa más adecuada para la implementación de los programas de control de la roya, maximizando los rendimientos económicos con los costos más bajos posibles, así como obtener resultados más efectivos en el control del hongo.

Con todos los datos disponibles, 0,5 kg·ha<sup>-1</sup> de SiO<sub>2</sub> en aplicación foliar es el tratamiento más coste/efectivo frente a la roya del café en las condiciones de esta zona de Guatemala por lo que emerge como una alternativa prometedora a los fungicidas sistémicos. Esta investigación ha demostrado su capacidad para reducir significativamente la incidencia y severidad de la enfermedad además de ofrecer beneficios económicos y ambientales al maximizar los rendimientos con costos bajos y al evitar riesgos para la salud humana y el medio ambiente comparados con los fitosanitarios de síntesis.

## 7. CONCLUSIONES

1. El dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) se presenta como una alternativa ecológica y eficaz para la prevención y control de la roya del café ya que supera la eficacia a de los fungicidas tradicionales a base de cobre.
2. Las plantas de café tratadas con aplicaciones foliares de  $\text{SiO}_2$  no muestran una acumulación significativa de silicio porque son “no acumuladoras”.
3. Las aplicaciones foliares de  $\text{SiO}_2$  no estimularon significativamente las defensas internas de las plantas de café, o al menos no se logró detectar un estímulo en la producción de fenoles totales.
4. La reducción en la incidencia y severidad de la roya se atribuye a las propiedades higroscópicas y desecantes del silicio, que crean un entorno desfavorable para los patógenos.
5. El modelo epidemiológico de Gompertz es el que mejor se ha ajustado a los datos y podría utilizarse para predecir el progreso de la epidemia de roya del café en la zona.
6. Los datos de los ensayos muestran que las plantas tratadas con silicio tuvieron una producción ligeramente superior a las de control durante dos años, con tendencias que sugieren una buena protección contra la roya, lo que podría aumentar la producción a medio plazo.
7. El análisis organoléptico de las cosechas de 2020 y 2021 reveló que tanto los tratamientos con silicio como el control mantuvieron una calidad "excelente" y "estrictamente dura". Las aplicaciones de silicio no afectan negativamente la calidad del café y mejoran la acidez, lo cual es prometedor para el mercado de cafés especiales.
8. El  $\text{SiO}_2$  se presenta como una alternativa económicamente interesante frente al uso de fungicidas a base de cobre, especialmente en agricultura ecológica. Los costos de su aplicación son más bajos y la eficacia relativa en comparación con los tratamientos con fungicidas de síntesis y acción sistémica deben ser considerados.
9. Se necesita más investigación para evaluar el impacto a largo plazo en la productividad y la rentabilidad económica, especialmente en el contexto de la agricultura orgánica y los mercados internacionales de café de alta calidad.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Aime, M., Bell, C. and Wilson, A. (2018). Deconstructing the evolutionary complexity between rust fungi (Pucciniales) and their host plants. *Studies in Mycology*. (89):143-152. <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2018.02.002>
- Aime, M. and McTaggart, A. (2021). A Higher Rank Classification for the rust Fungi, with notes on the genera. *Fungal Systematics and Evolution*. (7):21-47. <https://doi.org/10.3114/fuse.2021.07.02>
- Alves, M., Carvalho, L., Pozza, E. and Alves, L. (2010). A soft computing approach for epidemiological studies of coffee and soybean rusts. *International Journal of Digital Content Technology and its applications*. (4):149–154 <https://doi.org/10.4156/jdcta.vol4.issue1.15>
- Amaral, D., Resende, M., Ribeiro, P., Borel, J., Mac, R. e Pádua, M. (2008). Silicato de potássio na proteção do cafeeiro contra *Cercospora coffeicola*. *Tropical Plant Pathology*, 33 (6):425–431. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762008000600004>
- Arcila, P., Farfán, F., Moreno, A., Salazar, L. y Hincapie, E. (2007). Sistemas de producción de café en Colombia. Centro Nacional de Investigación de Café (2):37-45.
- Arneson, P. (2000). Coffee rust. *The Plant Health Instructor*. Advancing the Science of plant Pathology. <https://doi:10.1094/PHI-I-2000-0718-02>
- Asociación Nacional del Café (ANACAFE) (2023). Café de Guatemala en Cifras 2023. Datos Actividad Cafetalera Nacional.
- Avelino, J. y Rivas, G. (2013). La roya anaranjada del cafeto. <https://hal.science/hal01071036>
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Pablo, I., Aguilar, L., Bornemann, G., Laderach, P., Anzueto, F. Hruska, A. and Morales, C. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*. (7): 303-321.
- Avelino, J., Treminio, E., Casanoves, F., Vilchez, S., Cárdenas, J., Lizardo, C. (2019). Guía para la vigilancia de la roya del café (*Hemileia vastratix*). Boletín Septiembre, Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roya del Café. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

- Avelino, J., Willocquet, L. and Savary, S. (2004). Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology* 53 (5):541-547. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2004.01067.x>
- Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordoñez, M. and Savary, S. (2006). The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling* (197):431-447. <https://doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.03.013>
- Barka, G., Caixeta, E., De Almeida, R., Alvarenga, S. and Zambolim, L. (2017). Differential expression of molecular rust resistance components has distinctive profiles in *Coffea arabica* - *Hemileia vastatrix* interactions. *European Journal. Plant Pathology*. 149 (3):543-561. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1202-0>.
- Barlett, D., Clough, J., Godwin, J., Hall, A., Hamer, M. and ParrDobrzanski, B. (2002). Review: the strobilurins fungicides. *Pest Management Science* (58):649–662. <https://doi.org/10.1002/ps.520>
- Barquero, M. (2013). Recomendaciones para el combate de la roya del café. Instituto del Café de Costa Rica, ICAFE, 3 ed: 17. ISBN: 978-9977-55-045-9
- Barros, S., Oliveira, T., Bastos, T. and Maia, C. (1999). Hyperparasitism of *Cladosporium uredinicola* over *Puccinia puta* on the host *Ipomoea fistulosa*. *Mycologist*. (13): 23-24. [https://doi.org/10.1016/S0269-915X\(99\)80071-8](https://doi.org/10.1016/S0269-915X(99)80071-8)
- Bogado, M. (2011). Silicio. En: *Materiales y materias primas*. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, Buenos Aires. Capítulo 11: 1-33.
- Borges, P., Ciavareli, L., José, P. and Alves, E. (2012). Essential oils for rust control on coffee plants. *Ciência Agrotecnologia* (36):16-24. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000100002>
- Botelho, D., Pozza, E., Pozza, A., Carvalho, J., Botelho, E. y Souza, P. (2005) Intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de fontes e doses de silício. *Fitopatologia Brasileira* (30):582-588. <https://doi.org/10.1590/S0100-41582005000600003>
- Bowden, J., Gregory, P. And Johnson, C. (1971). Possible wind transport of coffee leaf rust across the Atlantic Ocean. *Nature*. 229 (5285): 500-1. <https://doi:10.1038/229500b0>

- Bowen, P., Menzies, J., Ehret, D. (1992). Los aerosoles de silicona soluble inhiben el polvo desarrollo de mildiu en las hojas de parra. *Revista de la Sociedad Estadounidense de Ciencias Hortícolas, Alejandría*. 117 (6):906-912
- Brinate, S., Martins, L., Pereira, G., Cunha, V., Jesus, A.; Do Amaral, J., Tomaz, M., De Jesus, W. (2015). Copper can influences growth, disease control and production in Arabica coffee trees. *Australian Journal of Crop Science* 9 (7):678–683.
- Burdon, J., Zhan, J., Papaix, J. and Thrall, P. (2016). Addressing the challenges of pathogen evolution in the world's arable crops. *Phytopathology* (106):1117-1127. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-16-0036-FI>
- Caicedo, M., y Chavarriaga, W. (2007). Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almacigo de plántulas de café variedad Colombia. *Agronomía* 15 (1):27-37.
- Campa, C., Mondolot, L., Rakotondravao, A., Bidel, L. P., Gargadenec, A., Couturon, E. and Davis, A. (2012). A survey of mangiferin and hydroxycinnamic acid ester accumulation in coffee (*Coffea*) leaves: biological implications and uses. *Annals of Botany* 110 (3):595-613. <https://doi: 10.1093/aob/mcs119>
- Campos, O. (2015). Manejo integrado de la roya anaranjada (*Hemileia vastatrix* Berk et Br.). Boletín Técnico Centro de investigación del café (CEDICAFE)/Asociación Nacional del Café (ANACAFE).
- Capucho, A., Zambolim, H. and Vaz, G. (2013) Development and validation of a standard area diagram set to estimate severity of leaf rust in *Coffea arabica* and *C. canephora*. *Australasian Plant Pathology*, (60):1144-1150. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02472.x>
- Carneiro, L., Juliatti, F., Oliveira, R., Körndorfer, G., Amado, D., Ramos, H. (2003). Uso de arcilla de silicato para reducir la severidad de Phytophthora infestans en plantas de papa. *Fitopatología Brasileña, Brasilia* 2 (28):347-348.
- Carré-Missio, V., Rodrigues, F., Schurt, D. and Resende, R. (2014). Effect of foliar-applied potassium silicate on coffee leaf infection by *Hemileia vastratix*. *Annals of Applied Biology* (164): 396-403. <https://doi.org/10.1111/aab.12109>.
- Carvajal, J., Aristizábal, I., Oliveros, C. y Mejía, J. (2011). Colorimetría del Fruto de Café (*Coffea arabica* L.) Durante su Desarrollo y Maduración. *Revista Facultad*

Nacional de Agronomía - Medellín 64 (2), 6229-6240.  
<https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=179922664020>

Castellanos, L., De Mello, R. y Silva, C. (2015). El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales*, 36 (1):16-24.

Chérif, M., Menzies, J., Ehret, D., Bopgdanoff, C. and Belanger, R. (1994). Yield of cucumber infected with *Pythium aphanidermatum* when grown with soluble silicon. *Horticultural Science* (29):896–897.  
<https://doi.10.21273/HORTSCI.29.8.896>

Cintra, M., Meira, C., Monard, M., Camargo, H. and Rodrigues, L. (2011). The use of fuzzy decision trees for coffee rust warning in Brazilian crops. In *Proceedings of the 2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, Cordoba, Spain, 22–24 November 2011:1347–1352  
<https://doi.org/10.1109/ISDA.2011.6121847>

Costa, L., Cintra, V. y Ribeiro, F. (2002). Modelos aplicados en Fitopatología. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. Centro Coordinador de Ediciones Académicas 34 (1).

Cristancho, M., Rozo, Y., Escobar, C., Rivillas, C. and Gaitán, A. (2012). Outbreak of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in Colombia. *New Disease Reports*, (25):19. <https://doi.org/10.5197/j.2044-0588.2012.025.019>

Da Cunha, K., Do Nascimento, C. and Da Silva, A. (2008). Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171 (6):849-853.  
<https://doi.org/10.1002/jpln.200800147>.

Datnoff, L., Snyder, G. and Korndorfer, G. (2001). *Silicon in agriculture*. University of Florida –IFAS. Belle Glade, FL. USA. Elsevier Science B.V. First Edition.

De Melo, V. y Astorga, C. (2015). *Prevención y control de la roya del café*. Manual de buenas prácticas para técnicos y facilitadores. Manual técnico No. 131. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

Debona, D., Rodrigues, F., Ríos, J., Nascimento, K. and Silva, L. (2013). The effect of silicon on antioxidant metabolism of wheat leaves infected by *Pyricularia oryzae*. *Plant Pathology*, (63):581-589. <https://doi:10.1111/ppa.12119>

- Diario Oficial de la Unión Europea (2018). Boletín sobre el reglamento de ejecución (UE) 2018/1981 de la comisión (317):16-20
- Dirección General de Sanidad Vegetal (DGSV)- Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria (Sinavef)-Laboratorio Nacional de Referencia Epidemiológica Fitosanitaria (Lanref) (2019). Roya del café (*Hemileia vastatrix* Verkeley & Brome), ficha técnica No. 40. México.
- Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. Proceedings of the National Academy of Sciences 91 (1):11-17. <http://doi:10.1073/pnas.91.1.11>
- European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) (2024). EPPO Global Database. *Hemileia vastatrix* (HEMIVA). En línea: <https://gd.eppo.int/taxon/HEMIVA>. Fecha de consulta: 06 de Julio del 2024
- Exley, C. (1998). Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. J. Biological Inorganic Chemistry (69):139–144. [https://doi.org/10.1016/S0162-0134\(97\)10010-1](https://doi.org/10.1016/S0162-0134(97)10010-1).
- Exposito, S., Pinacho-Lieti, L.G., Lago, F. and Cabaleiro, C. (2024). Epidemiology and management of Bean Common Mosaic Virus (BCMV) in traditional Phaseolus vulgaris L. landraces within Protected Geographical Indications. Horticulturae (in Press)
- Fauteux, F., Chain, F., Belzile, F., Menzies, J. and Belanger, R. (2006). The protective role of silicon in the Arabidopsis-powdery mildew pathosystem. (103): 17554-17559. <https://doi:10.1073/pnas.0606330103>
- Fauteux, F., Remus-Borel, W., Menzies, J. and Belanger, R. (2005). Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. Federation of Microbiological Societies Microbiology Letters. 249 (1): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.femsle.2005.06.034>
- Fawe, A., Abou, M., Menzies, J. and Bélanger, R. (2001). Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. Phytopathology (88):396-401. <https://doi:10.1094/PHYTO.1998.88.5.396>.
- Fernandes, R., Evans, H. and Barreto, R. (2009). Confirmation of the occurrence of teliospores of *Hemileia vastatrix* in Brazil with observations on their mode of germination. Tropical Plant Pathology. 34 (2): 108-113. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762009000200005>


- Ferreira, B. (2017). Reatividade de fontes de silício no solo e sua acumulação nas plantas de arroz e de sorgo. Tesis de máster. Universidade Federal de Uberlândia (Brasil).
- Figueiredo, F. (2007). Nutrición, protección y calidad de la bebida del café bajo pulverizaciones de silicato de potasio líquido soluble. Lavras. UFLA. Tesis Doctorado. Universidad federal de Lavras. Brasil.
- Figueiredo, M., e Passador, M. (2008). Morfologia, funções dos soros e variações dos ciclos vitais das ferrugens. Arquivos do Instituto Biológico. 75 (1): 117-134. <https://doi.org/10.1590/1808-1657v75p1172008>
- Food and Agriculture Organization. (2021). Coffee. Commodity in focus. <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities/coffee/en/>
- Fortunato, A., Ávila, F. and Teles, K. (2012). Physiological and biochemical aspects of the resistance of banana plants to Fusarium wilt potentiated by silicon. Biochemistry and Cell Biology, 102 (10), 957-966. <https://doi.org/10.1094/phyto-02-12-0037-r>
- García, A., López, C., & Martínez, E. (2018). Effects of silicon on plant-pathogen interactions. Plant Pathology, 67 (8):1773-1786. <https://doi.org/10.1111/ppa.12900>
- Godoy, H., Menezes, A., Hoshino, A., E Godoy, L. (2012). Produtos alternativos no controle da *Hemileia vastatrix* (Berkeley & Broome) E *Cercospora coffeicola* (Berkeley & Cooke) em cafeeiros. Coffe Science 7 (2):187-197. <https://www.researchgate.net/publication/277154174>
- Gómez, R., Rodríguez, M., Sandoval, M., Colinas, M. y Soriano, E. (2006). Fertilización foliar con silicio como alternativa contra la marchitez causada por *Fusarium oxysporum* (Sheld) en tomate de cáscara. Revista Chapingo, Serie Horticultura. Vol. 12. México. <https://doi: 10.5154/r.rchsh.2003.11.079>
- Gouveia, M. (2005). Genetic diversity in *Hemileia vastatrix* based on RAPD markers. Mycologia 97 (2): 396-404. <https://doi: 10.3852/mycologia.97.2.396>.
- Gutiérrez, A. (2019). Actividad antifúngica de extractos de *Baccharis glutinosa* Pers. Sobre la roya (*Hemileia vastratix*) del café: enfoque metabolómico y génico. Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. México.
- Hajian, Z., Rivera, S., Jiménez, S., Perfecto, I. and Vandermeer, J. (2016). Impact of regionally distinct agroecosystem communities on the potential for autonomous

- control of the coffee leaf rust. *Journal of Environmental Entomology* 45 (6):1521-1526. <https://doi.org/10.1093/ee/nvw125>
- Han, Y., Li, P., Gong, S., Yang, L., Wen, L. and Hou, M. (2016). Defense responses in rice induced by silicon amendment against infestation by the leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*. *Public Library of Science One* 11 (4). <http://doi:10.1371/journal.pone.0153918>
- Hernández, F., Montoya, R., y Ríos, R. (1986). Estudio epidemiológico de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) en tres zonas altimétricas de Tingo María, Perú. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Perú. (645).
- Hernández, G. y Velázquez, T. (2016). Análisis integral sobre la roya del café y su control. *Revista internacional de desarrollo regional sustentable (RINDERESU)* 1 (1): 92-99.
- Hilario, J. (2018). “Fuentes y niveles de silicio en el rendimiento y en la incidencia de ojo de gallo (*Stillbum flavidum*) en la variedad de café catimor”. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Agraria de la Selva. Perú.
- Hinnah, F, Sentelhas, P., Alves Patrício, F., Paiva, R., Parenti, M. (2020). Performance of a weather-based forecast system for chemical control of coffee leaf rust. *Crop Prot.* (137):105-225
- Hodson, M., White, P., Mead, A. and Broadley, M. (2005). Phylogenetic Variation in the Silicon Composition of Plants. *Annals of Botany* (96):1027-1046. <https://doi.org/10.1093/aob/mci255>
- Ibarra, D., Tapia, David., Vaca, E., Guamán, R., Ulloa, S., y Villavicencio, Á. (2022). Evaluación de diferentes tipos de controles de roya (*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome) y pestalotiopsis (*Pestalotia* sp.), en el cultivo de la fruta milagrosa (*Synsepalum dulcificum* ADC). *Siembra* 9 (2). <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.4007>
- Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología (INSIVUMEH) (2022). Datos climatológicos de la estación Los Esclavos, Municipio de Cuilapa, Departamento de Santa Rosa, Guatemala.
- International Coffee Organization (ICO) (2023). Coffee Report and Outlook December 2023.
- International Coffee Organization (ICO) (2024). Coffee Market Report January 2024.

- James, T., Marino, J., Perfecto, I. and Vandermeer, J. (2016). Identification of putative coffee rust micoparasites via single-molecule DNA sequencing of infected pustules. *Applied and Environmental Microbiology* (83):631-639. <http://doi:10.1128/aem.02639-15>
- Jani, D., Akash, J., Jadav, C., Nitin, P., and Pravinbhai, C. (2018). "Comparison of Different Desiccant Materials for Dehumidification Application in Comfort Cooling." *International Journal for Scientific Research & Development* 6 (8):396-400.
- Jones, L. and Handreck, K. (1967). Silica in soils, plants, and animals. *Advances in Agronomy*.19: 107–149. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60734-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60734-8)
- Jong, E., Eskes, A., Hoogstraten, J. and Zadoks, J. (2005). Temperature requirements for germination, germ tube growth and appressorium formation of uredospores of *Hemileia vastatrix*. *Netherlands Journal of Plant Pathology* (93):61-71. <http://doi:10.1007/bf01998091>
- Julca, A., Echevarría, C., Ladera, Y., Borjas, R., Cruz, R., Bello, S. y Crespo, R. (2013). Una revisión sobre la roya del café (*Hemileia vastatrix*) algunas experiencias y recomendaciones para el Perú. Lima. Institutos Regionales de Desarrollo (IRD) Selva – Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).
- Kolmer, J., Ordonez, M. and Groth, J. (2009). The Rust Fungi. In: *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*. John Wiley & Sons, Ltd: Chichester. <http://doi:10.1002/9780470015902.a0021264>
- Koutouleas, A., Collinge, D., and Boa, E. (2023). The coffee leaf rust pandemic: An ever-present danger to coffee production. *Plant Pathology* 73 (3):522-534. <https://doi.org/10.1111/ppa.13846>
- Kushalappa, A. (1989). Biology and epidemiology, in: *Coffee rust: epidemiology, resistance and management*, A.C. Kushalappa y A.B. Eskes, Editores, Chemical Rubber Company (CRC) Press: Florida. 16-80. <https://doi.org/10.1201/9781351070775>
- Kushalappa, A. and Eskes, A. (1989). Advances in coffee rust research. *Annual Review of Phytopathology* 27 (1):503-531. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.27.090189.002443>
- Li, K., Win, J., Bo, Y., and Yean, D. (2020). "Performance Analysis of Two-Stage Solid Desiccant Densely Coated Heat Exchangers." *Sustainability* 12 (8):73-57. <https://doi.org/10.3390/su12187357>

- Liang, Y., Sun, W., Si, J. and Römheld, V. (2005). Effects of foliar and root applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathology* (54):678-685. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01246.x>
- Lopes, U., Zambolim, L., Lopes, U., Rios, A., Duarte, H. and Ribeiro, J. (2013a). Silicate slag combined with tebuconazole in manage of brown eye spot in coffee. *Coffee Science*. 8 (2):221-226.
- Lopes, U., Zambolim, L., Souza, P., Duarte, H., Ribeiro, J., Souza, A., and Rodrigues, F. (2013b). Silicon and Triadimenol for the Management of Coffee Leaf Rust. *Journal of Phytopathology*: <http://doi:10.1111/jph.12166>.
- Lopes, U., Zambolim, L., Souza, P., Souza, A., Capucho, A. and Rodrigues, F. (2013c). Effect of foliar application of potassium silicate on the progress of coffee leaf rust. *Tropical Planta Pathology* 38 (6):547-551. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762013000600012>
- López, D., Virginio, D. and Avelino, J., (2012). Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Protection*. 38: 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.03.011sc>
- Luaces, O., Rodrigues, L., Meira, C., Bahamonde, A. (2011). Using nondeterministic learners to alert on coffee rust disease. *Expert System with Applications* (38): 14276–14283. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.003>
- Luján-Hidalgo, M., Jiménez, L., Ruiz, N., Reyes, S. y Gutiérrez, F. (2020). Cambios bioquímicos en respuesta al ataque de roya en plantaciones de café. *Polibotanica*. (49):149-160. <https://doi:10.18387/polibotanica.49.10>
- Ma, J., and Takahashi, E. (2002). *Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan*. Amsterdam: Elsevier.
- Madden, L. V., Hughes, G. and van den Bosch, F. (2007). *The study of plant disease epidemics*. American Phytopathological Society. <https://doi.org/10.1094/9780890545058>
- Martinati, J., Harakava, R., Guzzo, S. And Tsai, S. (2008). The potential use of a silicon source as a component of an ecological management of coffee plants. *Journal of Phytopathology* 156 (7/8):458-463. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2007.01392.x>
- Mayne, W. (1930). Seasonal periodicity of coffee leaf disease (*Hemileia vastatrix* B. & Br.). *Bulletin*. Vol. 4: Mysore Coffee Experimental Station. 16 p.

- McCain, J. and Hennen, J. (1984). Development of the uredinial thallus and sorus in the orange coffee rust fungus, *Hemileia vastatrix*. *Phytopathology* (6):714-721. <http://doi:10.1094/phyto-74-714>.
- McCook, S. (2006). Global rust belt: *Hemileia vastatrix* and the ecological integration of world coffee production since 1850. *Journal of Global History* (1):177–195. <https://doi:10.1017/S174002280600012X>
- McCook, S. (2008). Chronicle of a plague foretold crop epidemics and the environmental history of coffee in the Americas. *Varia Historia* 24 (39):87-111. <https://doi.org/10.1590/S0104-87752008000100005>
- McCook, S. (2009). Coffee rust in Central América: epidemics, innovation, and environment, 1980-1995. *Journal of Global History*: 59-60.
- Meira, C., Rodrigues, L., y Moraes, S. (2008). Análise da epidemia da ferrugem do cafeeiro com árvore de decisão. *Tropical Plant Pathology* 33 (2):114-124. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762008000200005>
- Menzies, J., Ehret, D., Glass, A., Helmer, T., Koch, C. and Seywerd, F. (1991). Effects of soluble silicon on the parasitic fitness of *Sphaerotheca fuliginea* on *Cucumis sativus*. *Phytopathology* (81):84-88. <https://doi:10.1094/phyto-81-84>
- Mitani, N., Ma, J. and Iwashita, T. (2005). Identification of the Silicon from in Xylem Sap of Rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Cell Physiology* (46):279-283. <https://doi.org/10.1093/pcp/pci018>
- Montoya, H. e Chávez, G. (1974). Influencia da temperatura e da lua na germinacao, infectividade e periodo de geracao de *Hemilea vastatrix*. *Experientiae*, 11 (18):239-266.
- Morales, P. (2018). Evaluación de siete fungicidas del grupo de los Triazoles para el control de la roya anaranjada del cafeto *Hemileia vastatrix* Berk et Br., en las regiones IV Santa Rosa, Jalapa y Jutiapa. *Boletín Técnico Centro de Investigación del Café (CEDICAFE)/Asociación Nacional del Café (ANACAFE)*.
- Morato, L. y Cardona, M. (2021). Inducción de resistencia en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y antagonismo de *Trichoderma viride* contra *Fusarium oxysporum*. Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n1.78357>

- Nafarrate, F. (2005). El cobre como fungicida agrícola. Tesis Ingeniero Agrónomo. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias división de Ciencias Agronómicas. Guadalajara. México.
- Naidoo, P, McFarlane, S., Keeping, M., Caldwell, P. (2009). Deposition of silicon in leaves of sugarcane (*Saccharum* spp. hybridus) and its effect on the severity of brown rust caused by *Puccinia melanocephala*. *Proceedings of South Africa Sugar Technology* (82):542–546.
- Narayana, M. (2013). Do coffee varieties and shade trees matter for management of leaf rust disease in India? Evidence for household farmers. *Forests, Trees and Livelihoods*. 22 (4):275-288. <https://doi.org/10.1080/14728028.2013.846563>
- Nutter, F., Eggenberger, S., and Littlejohn, K. (2014). Fitting disease progress curves using EPIMODEL. Chapter 2 in: *Exercises in Plant Disease Epidemiology*, 2nd Ed. K. L. Stevenson and M. J. Jeger, eds. American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota. <https://doi.org/10.1094/9780890544426.003>
- Obando, N., Mestanza, C. y Oliva, S. (2013). Efecto del manejo cultural y caldo bordelés sobre la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en la provincia de Rodríguez de Mendoza, Amazonas. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable* 1 (2):51-58. <https://doi:10.25127/indes.201302.006>.
- Oliveira, C., Ferreira, J., Oliveira, R., Santos, F. and Pallini, A. (2014). *Ricoseius loxocheles*, a phytoseid mite that feeds on coffee leaf rust. *Experimental Applied Acarology* (64):223-233. <https://doi.org/10.1007/s10493-014-9814-y>.
- Parada, C., Cerdán, C., Ortiz, G., Barradas, V., Cervantes, J. (2020). *Hemileia vastatrix*: una prospección ante el cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuario* 7 (3). <https://doi.org/10.19136/era.a7n3.2507>.
- Peralta, L., Sánchez, L. y Vilimelis, S. (2023). Innovación para la comercialización del café en El Salvador y Guatemala. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). México.
- Pereira, S., Rodrigues, A., Carré, M., Goreti, A. and Oliveira, Z. (2009). Effect of foliar silicon application on resistance against coffee leaf rust and on the potentiation of defense enzymes in coffee. Universidad Federal de Viçosa, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil. <https://doi:10.1111/aab.12109>
-  Pérez, N. (2022). Prevención y control de la roya del cafeto. Boletín técnico. Fundación de la Caficultura para el Desarrollo Rural (FUNCAFE) / Asociación Nacional del Café (ANACAFE).

- Pérez-Ariza, C., Nicholson, A. and Flores, M. (2012). Prediction of coffee rust disease using Bayesian networks. European Workshop on Probabilistic Graphical Models.
- Pinto, A., Pozza, E., Souza, P., Pozza, A., Talamini, V., Boldini, J. e Santos, F. (2002). Descrição da epidemia da ferrugem do cafeeiro com redes neuronais. *Fitopatologia Brasileira* (27):517-524. <https://doi.org/10.1590/S0100-41582002000500013>
- Pozza, A., Alves, E., Pozza, E., Carvalho, J., Montanari, M., Guaraes, P. y Santos, D. (2004). Efecto del silicio en el control de la Cercosporiosis en tres variedades de café. *Fitopatología Brasileira* (29):185-188. <https://doi.org/10.1590/S0100-41582004000200010>
- Pozza, E. (2008) Importância das doenças foliares do cafeeiro. In: Núcleo de estudos em fitopatologia. Manejo fitossanitário da cultura do cafeeiro. Brasília: Sociedade Brasileira de Fitopatología (1):81-94.
- Pozza, E., Pozza, A. and Botelho, D. (2015). Silicon in plant disease control. *Revista Ceres* (62):323-331. <https://doi:10.1590/0034-737X201562030013>
- Pozza, E., Santos, É., Gaspar, N., Vilela, X., Alves, M., Colares, M. (2021). Coffee rust forecast systems: development of a warning platform in a Minas Gerais State, Brazil. *Agronomy* (11):22-84. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112284>
- Prabhu, A., Barbosa, M., Datnoff, L., Snyder, G., Berni, R., Rodrigues, F. and Dalla, L. (2012). Silicon reduces brown spot severity and grain discoloration on several rice genotypes. *Tropical Plant Pathology*, (37):409-414. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762012000600005>
- Proyecto Maximizando Oportunidades en Café y Cacao en las Américas (MOCCA) (2021). Un cafetal productivo tiene sombra que lo cuida. United States Department of Agriculture (USDA).
- Puerta, G. (2013). Calidad del café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura (3):81–110. Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE). [https://doi.org/10.38141/cenbook-0026\\_30](https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_30)
- Quiroga, A. (2016). Respuesta a las aplicaciones de silicio en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L) variedad modan, en condiciones de estrés hídrico bajo cubierta en Culiacán, Sinaloa. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de

Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA). Facultad de Ingenierías Programa de Ingeniería Agronómica, Bogotá, Colombia.

- Quispe, C., Mansilla, R., López, C., Espejo, R., Villanueva, J. y Monzón, C. (2017). Diversidad genética de *Hemileia vastatrix* de dos zonas productoras de café en el Perú. *Revista Mexicana de Fitopatología* 35 (3):418-436. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1612-7>
- Ramírez, L., Eamvijarn, A., Díaz, J., Karlsen, E., Koch, R., Johnson, E., Pruvot, S., Mejía, L., Montagnon, C., Maldonado, C. and Aime, M. (2022). Global analysis of *Hemileia vastatrix* populations shows clonal reproduction for the coffee leaf rust pathogen throughout most of its range. *Phytopathology* 112 (3):643-652.
- Ramírez, R., Castañeda, E., Robles, C., Santiago, G., Pérez, M. y Lozano, S. (2020). Efectividad de biofungicidas para el control de la roya en plántulas de café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11 (6):1403-1412. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2614>
- Ramli, N., Yusup, Y., Lin, C., Azahari, B., and Ahmad, M. (2021). Performance of Calcium Chloride and Silica Gel as Solid Desiccant Dehumidifiers for Indoor Air Quality. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* (88):57-70. <https://doi.org/10.37934/arfmts.88.3.5770>.
- Rayner, R. (1961). Germination and penetration studies on coffee rust (*Hemileia vastatrix* B. & Br.) <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1961.tb03641.x>
- Ritschel, A. (2005). Monograph of the genus *Hemileia* (Uredinales). In: *Bibliotheca Mycologica*, vol. 200 (A. Bresinsky, H. Butin and P. Tudzinski, eds), pp. 3– 132. Stuttgart: J. Cramer. ISBN 978-3-443-59102-1
- Rivillas, C., Serna, C., Cristancho, M. y Gaitán, A. (2011). La roya del cafeto en Colombia. Impacto, manejo y costos de control. Boletín Técnico No. 36. Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE), Caldas, Colombia.
- Rodrigues, P., Favarin, J., Aparecida, R. and De Lima, F. (2008). Total phenol concentrations in coffee tree leaves during fruit development. *Crop Science*. (Piracicaba, Brazil) 65 (4). <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000400005>
- Rodríguez, F., Datnoff, L. and Seebold, K. (2007). Silicon and plant disease. Switzerland. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0>

- Rojas, K. (2022). Ciencia de datos para las Ciencias Naturales. [https://bookdown.org/keilor\\_rojas/CienciaDatos/transformaci%C3%B3n-estandarizaci%C3%B3n-e-imputaci%C3%B3n-de-datos.html](https://bookdown.org/keilor_rojas/CienciaDatos/transformaci%C3%B3n-estandarizaci%C3%B3n-e-imputaci%C3%B3n-de-datos.html)
- Salamanca, J., y Sadeghian, S. (2015). Respuesta del café a la aplicación de silicio y lombrinaza durante la etapa de almácigo. *Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICFE)* 66 (2):88-109.
- Sangster, A., Hodson, M. and Tubb, H. (2001). Silicon deposition in higher plants. In: (Datnoff L.E., Snyder G.H., Korndöfer, G.H., Eds, *Silicon in Agriculture.*): 85–114. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80009-4](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80009-4)
- Schieber, E. and Zentmeyer, G. (1984). Coffee rust in the Western hemisphere. *Plant Disease*, 68, 89–93.
- Seal, P., Das, P. and Biswas, A. (2018). Versatile potentiality of Silicon in Mitigation of Biotic and Abiotic Stresses in Plants: A Review. *American Journal of Plant Sciences* (9):1433-1454. <https://doi:10.4236/ajps.2018.97105>.
- Segarra, J. (2002). Utilidad de los modelos epidemiológicos. Departamento de producción vegetal y ciencia forestal. Universidad de Lleida. España 98 (2):108-118.
- Segheto, L., Santos, B., Werneck, A., Vilela, F., De Sousa, O. and Rodarte, M. (2018). Antioxidant extracts of coffee leaves and its active ingredient 5-caffeoylquinic acid reduce chemically-induced inflammation in mice. *Industrial Crops and Products* (126):48-57. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.09.027>
- Shetty, R., Fretté, X., Jensen, B., Shetty, N., Jensen, J., Jørgensen, H., Newman, M. and Christensen, L. (2011). Silicon-induced changes in antifungal phenolic acids, flavonoids, and key phenylpropanoid pathway genes during the interaction between miniature roses and the biotrophic pathogen *Podosphaera pannosa*. *Plant Physiology* (157):2194–2205 <https://doi: 10.1104/pp.111.185215>.
- Silva, J., Souza, P., Monteiro, F., Freitas, M., Silva, M. and Belan, L. (2014). Antifungal activity using medicinal plant extracts against pathogens of coffee tree. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais* (16):539-544. [http://dx.doi.org/10.1590/1983-084X/12\\_155](http://dx.doi.org/10.1590/1983-084X/12_155)
- Silva, M., Guerra, L., Loureiro, A. and Nicole, M. (2008). Involvement of peroxidases in the coffee resistance to orange rust (*Hemileia vastatrix*). *Physiological and*

<https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2008.04.004>

Silva, M., Nicole, M., Rijo, L., Geiger, J. and Rodrigues, C. (1999). Cytochemistry of plant-rust fungus interface during the compatible interaction *Coffea arabica* (cv. Caturra)-*Hemileia vastatrix* (race III). International Journal of Plant Sciences (160):79–91. <https://doi.org/10.1086/314113>

Simko, I. and Piepho, H. (2012). The area under the disease progress stairs: Calculation, advantage, and application. Phytopathology (102):381-389. <https://doi.org/10.1094/PHTO-07-11-0216>

Souza, A., Zambolim, L, Jesus, W., and Cecon, P. (2011). Chemical approaches to manage coffee leaf rust in drip irrigated trees. Australasian Plant Pathology. 40(3): 293-300. <https://doi.org/10.1007/s13313-011-0046-x>

Suresh, N., Santa Ram, A. and Shivanna, M. (2012). Cofee leaf rust (CLR) and disease triangle. A case study. International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences 2 (2):50-55.

Talhinhas, P., Batista, D., Diniz, I., Vieira, A., Silva, D., Loureiro, A., Tavares, S., Pereira, A., Azinheira, H., Guerra, L., Várzea, V. and Silva, M. (2017). The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. Molecular Plant Pathology 18 (8):1039-1051. <http://doi:10.1111/mpp.12512>.

Townsend, G. and Heuberger, J. (1943). Methods for estimating losses caused by diseases in fungicide experiments. The Plant Disease Reporter, 27, 340-343.

Tubaña, B. and Heckman, J. (2015). Silicon in soils and plants. In: Rodríguez F., Datnoff L. (editores). Silicon and plant diseases. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0_2)

Van Der Plank, J. (1963). Plant disease: Epidemics and control. Academic Press. New York. (349). <https://doi.org/10.1016/C2013-0-11642-X>

Velásquez, R. (2015.) Recomendaciones y consideraciones para la renovación exitosa de una plantación. Boletín Técnico Centro de Investigación del Café (CEDICAFE)/Asociación Nacional del Café (ANACAFE).

Velásquez, R. (2019). Guía de variedades de café en Guatemala. Segunda Edición. Asociación Nacional del Café (ANACAFE).



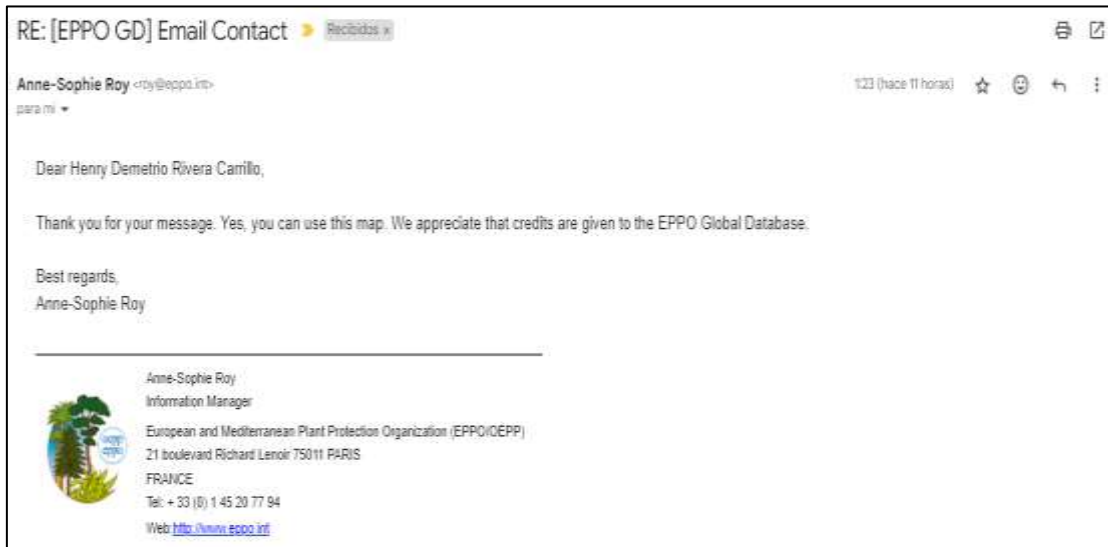
Villareyna, R. (2016). Análisis de las condiciones de manejo que propiciaron el impacto de la roya (*Hemileia vastatrix*) en la zona cafetalera de los municipios de Jinotega, el Tuma-La Dalia y San Ramón, Nicaragua. Centro Agronómico

- Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).  
<https://doi:10.13140/rg.2.2.32511.20642>
- Visser, B., Meyer, M., Park, R., Gilligan, C., Burgin, L., Hort, M., Hodson, D., and Pretorius, Z. (2019). Microsatellite analysis and urediniospore dispersal simulations support the movement of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* from southern Africa to Australia. *Phytopathology* (109):133-144.  
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-18-0110-R>
- Wang, M., Gao, L., Dong, S., Sun, Y., Shen, Q. and Guo, S. (2017). Role of Silicon on Plant-Pathogen Interactions. *Frontiers in Plant Science* (8):701. <https://doi:10.3389/fpls.2017.00701>
- World Coffee Research (WCR). (2019). Las variedades del café arábica.
- World Population Review (WPR) (2022). Coffee consumption by country.
- Yamaji, N. and Ma, J.F. (2011). Further Characterization of a Rice Silicon Efflux Transporter, Lsi 2. *Soil Science and Plant Nutrition* (57):257-264.  
<https://doi.org/10.1080/00380768.2011.565480>
- Yamaji, N., Mitani, N. and Ma, J.F. (2008). A Transporter Regulating Silicon Distribution in Rice Shoots. *The Plant Cell* (20):1381-1389.  
<https://doi.org/10.1105/tpc.108.059311>
- Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. *Tropical plant pathology* (41): 1-8. <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>

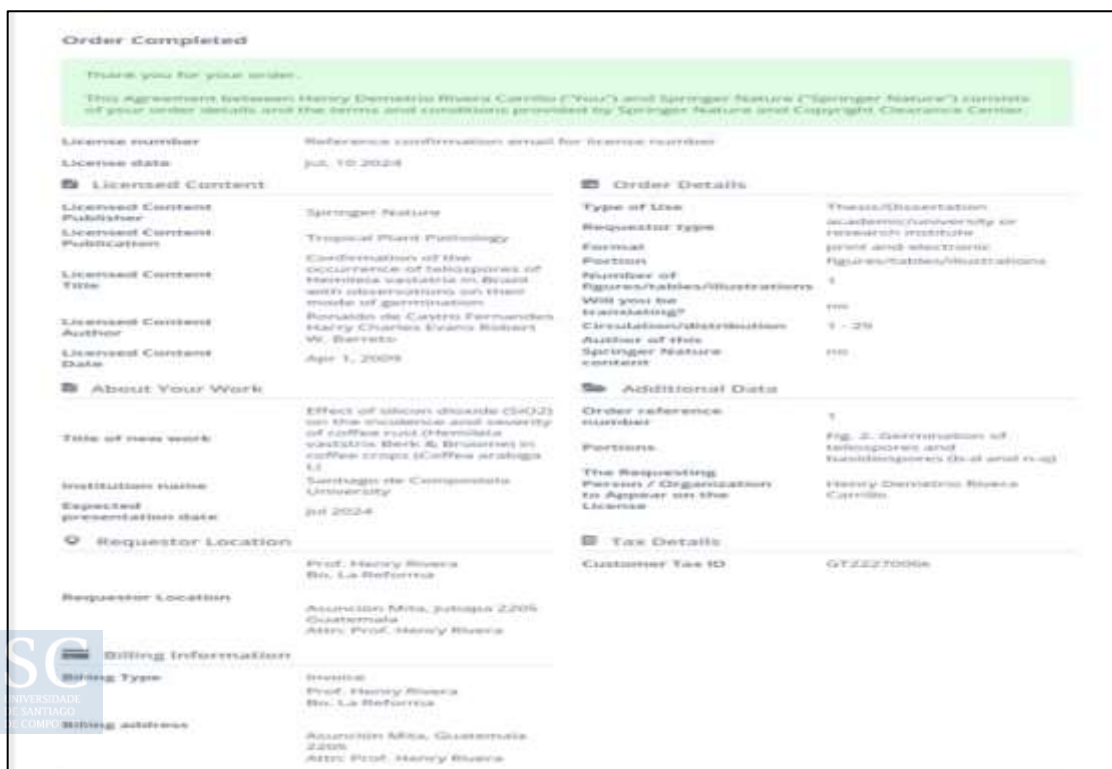
## 9. ANEXOS

### 9.1. DECLARACIONES: Uso de imágenes y derechos de publicación.

**Figura 2.** Mapa de distribución de la *Hemileia vastatrix* a nivel mundial (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: EPPO, 2024)



**Figura 5.** Germinación de teliosporas y basidiosporas de *Hemileia vastatrix*. b-d. Inicio de la germinación de las teliosporas; n-q. Basidiosporas en germinación (b-q. barra = 10 µm.) (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: Fernandes *et al.*, 2009, Tropical Plant Pathology).



**Figura 8.** Datos climatológicos (1981-2010) en comparación con las temperaturas diarias máximas y mínimas (a) y las amplitudes térmicas (b) observadas en Guatemala en 2012 (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: Avelino *et al.*, e INSIVUMEH, 2015. Food Security).

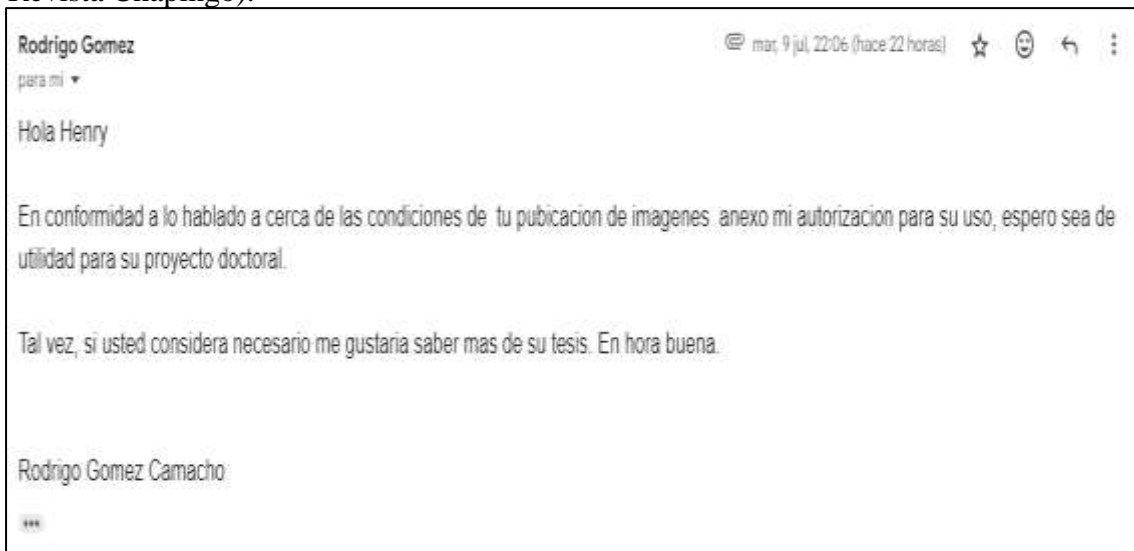


**Figura 9.** Anomalías de precipitación (mm) en 2012 en comparación con el clima (1981-2010) para Centroamérica (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: Avelino *et al.* e INSIVUMEH, 2015. Food Security).

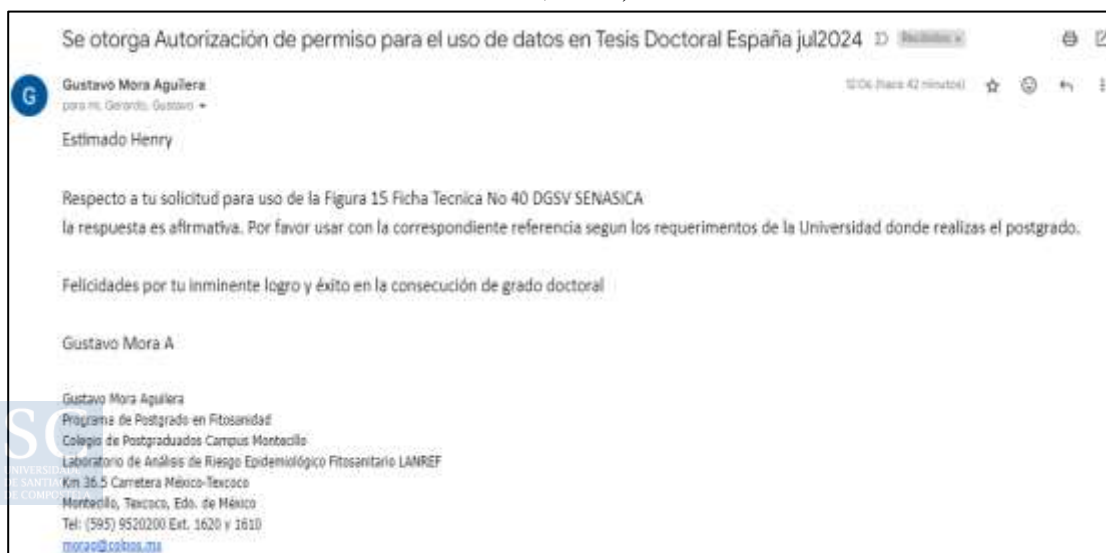




**Figura 13.** Fotografía al microscópico electrónico de barrido. A) Acumulación no se presenta en el testigo. B) Acumulación de silicio en xilema de plantas asperjadas con silicio (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: Gómez *et al.*, 2006, Revista Chapingo).



**Figura 21.** Escala de severidad Roya de Café (Con permiso de los propietarios de los derechos de autor: DGSV-Sinavef-Lanref, 2019).





La roya (*Hemileia vastratix*) es el hongo fitopatógeno clave en el cultivo de café; únicamente se ha logrado un buen control con aplicaciones de triazoles (epoxiconazole) ante los cuales ya ha generado resistencia. En la búsqueda de alternativas sostenibles de protección frente a la roya, el objetivo de esta investigación (2019-2021) fue estudiar si las aplicaciones vía foliar de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) ejercen un efecto protector frente a la roya. Los ensayos se hicieron en Santa Rosa (Guatemala) en una parcela de café en cultivo tradicional de la variedad susceptible Catuaí, con 3.500 plantas·ha<sup>-1</sup>. Se evaluaron dos concentraciones de  $\text{SiO}_2$  (0,5 y 1 kg·ha<sup>-1</sup>) frente a 2 kg·ha<sup>-1</sup> de oxiclورو de cobre ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ), el fungicida sistémico epoxiconazole a 0,5 L·ha<sup>-1</sup>, mezclas entre tratamientos y un testigo sin tratar.