



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



**DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL**

**ALTERNATIVAS QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS PARA EL
CONTROL DE *Hemileia vastatrix* EN CAFÉ (*Coffea
arabica*) EN LA "FINCA PUEBLA"**



TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN PROTECCION VEGETAL

DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
COMITÉ DE SERVICIOS ESCOLARES
COMISIÓN DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

DELESMA MORALES LUCIO

CHAPINGO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO, OCTUBRE DE 2015



La presente tesis titulada **ALTERNATIVAS QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE *Hemileia vastatrix* EN CAFÉ (*Coffea arabica*) EN LA "FINCA PUEBLA"**, realizada por **DELESMA MORALES LUCIO**, bajo la dirección y asesoría del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN PROTECCION VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR:



DR. ACOSTA RAMOS MARCELO

ASESOR:



DR. RAMÍREZ ALARCÓN SAMUEL

ASESOR:



M.C. HUERTA PÉREZ JESÚS

CHAPINGO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO, OCTUBRE DE 2015

DEDICATORIAS

A MIS PADRES EL Sr. LUCIO DELESMA AVILA † Y A MI MADRE LA Sra. LILIA MORALES MÉNDEZ POR QUE FUERON, SON Y SERAN LA PRIMERA ESCUELA Y QUE ADEMÁS SON EL ORIGEN DE TODA LA ENSEÑANZA Y SABIDURIA QUE HE LOGRADO ASIMILAR.

A MIS PADRES POR SER LA FUENTE DE INSPIRACION PARA CONTINUAR CON MIS ESTUDIOS, POR QUE HAN SABIDO IMPARTIR DE UNA MANERA EXCELENTE LA GRAN CATEDRA DE EDUCAR A UNA FAMILIA EN LA ESCUELA DE LA VIDA., POR QUE DIERON TODO LO QUE TENIAN PARA QUE YO PUDIESE CONTINUAR, A ELLOS LES DIGO QUE TODOS MIS TRIUNFOS Y EXITOS SON TAMBIEN DE ELLOS, POR QUE SON UN GRAN EJEMPLO DE VIDA.

A MI HERMANO MENOR JOSE LUIS DELESMA MORALES POR BRINDARME SU CONFIANZA Y PROPORCIONARME LA AYUDA NECESARIA EN LA ELABORACION DE LA TESIS.

A TODAS MIS HERMANAS ARGELIA, CECILIA, AMALIA, CARLOTA, CAROLINA, MARIA, YOLANDA Y A MIS HERMANOS BALDOMERO Y ERNESTO POR QUE TAMBIEN HAN JUGADO UN PAPEL IMPORTANTE EN MI VIDA.

A MIS COMPAÑEROS DE LA MAESTRÍA, CANEK MENDOZA, EDUARDO GUTIERREZ, MARCO MAIDANA, DIONICIO FUENTES, JUAN CARLOS ORTIZ, ABEL SALDIVIA, MARCO ANTONIO MENDOZA, EDUARDO EK' XIU QUIENES COMPARTIERON SU TIEMPO Y CONOCIMIENTO DURANTE MI ESTANCIA EN LA MAESTRIA.

A TODAS LAS PERSONAS QUE CONVIVIERON CONMIGO A DIARO EN CHAPINGO, Y EN LA MAESTRIA BRINDANDOME SU TIEMPO Y AMISTAD.

AGRADECIMIENTOS

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA POR EL APOYO BRINDADO DURANTE LOS ESTUDIOS DE MAESTRIA.

A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO POR PERMITIRME CONCLUIR LA ESPECIALIDAD DE INGENIERO AGRONOMO Y AL POSGRADO EN PROTECCION VEGETAL POR BRINDARME LA OPORTUNIDAD DE PODER CONTINUAR CON MI PREPARACION ACADEMICA.

AL Dr. ACOSTA RAMOS MARCELO POR PROPORCIONAR SU APOYO EN EL TEMA DE INVESTIGACION Y POR DARLE SEGUIMIENTO A ESTE PROYECTO DE TESIS DURANTE LA FASE DE CAMPO Y DE GABINETE.

AL Dr. RAMIREZ ALARCON SAMUEL POR SU COLABORACION Y LAS OBSERVACIONES REALIZADAS A LA TESIS.

AL M.C. HUERTA PÉREZ JESÚS POR BRINDAR SUS CONOCIMIENTOS EN ESTE PROYECTO DE TESIS.

AL ING. MIGUEL ANGEL RODRIGUEZ POR EL GRAN APOYO PROPORCIONADO DURANTE LA REALIZACION DEL PRESENTE TRABAJO.

A CADA UNO DE LOS PROFESORES DEL POSGRADO EN PROTECCIÓN VEGETAL POR CONTRIBUIR EN MI FORMACIÓN ACADÉMICA Y QUE DÍA A DÍA SE ESMERAN EN LA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS EN EL ÁREA DE LA SANIDAD VEGETAL.

DATOS BIOGRAFICOS



Delesma Morales Lucio, es originario de la colonia Guayabal, Municipio de Rayón ubicado en la zona norte del Estado de Chiapas. Nació el 07 de agosto de 1987. Realizó sus estudios de nivel Primaria en la Escuela Primaria Ignacio López Rayón y de Educación Secundaria en la Escuela Telesecundaria Núm. 203. Posteriormente, en el año 2002 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo, donde curso la Preparatoria Agrícola, para incorporarse en el año 2005 al Departamento de Fitotecnia en donde obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia. Desde el 2009 ha laborado en diversas áreas relacionadas al área de agronomía, posteriormente en el año 2013 ingresó a la Maestría en Protección Vegetal en el Departamento de Parasitología Agrícola.

Alternativas químicas y biológicas para el control de *Hemileia vastatrix* en café (*Coffea arabica*) en la "Finca Puebla"
Chemical and biological alternatives for control of *Hemileia vastatrix* in coffee (*Coffea arabica*) in the "Finca Puebla"

Lucio Delesma Morales¹, Marcelo Acosta Ramos²

RESUMEN

La Roya del Cafeto (*Hemileia vastatrix*) es una de las enfermedades de mayor importancia económica que afecta al café, se considera económicamente importante ya que es la enfermedad más destructiva del café, la cual daña a los árboles y disminuye su producción al ocasionar la caída prematura de sus hojas infectadas. Las pérdidas en América Latina se calculan en 30% de las cosechas. La importancia de *H. vastatrix* en México radica en que existe una superficie sembrada del cultivo de café de 737,376.45 hectáreas, cuyo valor de producción es superior a los \$ 559,394,847,000. En México, en cada una de las regiones productoras de café existen diferentes edades en las plantaciones al igual que diferentes condiciones edafoclimáticas; Debido a esto, es necesario realizar aplicaciones experimentales de fungicidas para determinar la forma adecuada de tener una buena eficacia de dichos productos. Se evaluaron 18 tratamientos en donde se realizaron 5 aplicaciones y 5 evaluaciones mensuales durante el periodo de junio-octubre de 2014. La evaluación de la severidad se realizó con la escala establecida por SENASICA en el 2013. Los tratamientos fueron integrados por triazoles, estrobilurinas, cloronitrilo, cobre, algunos agentes biológicos e inductores de resistencia. Los tratamientos que presentaron una menor severidad fueron las estrobilurinas (1-3%) y triazoles (1-4%), solos y en mezcla, muy en contraste con los inductores de resistencia (3-8%) al igual que el cobre (3-7%). Por lo consiguiente se concluye que tanto las estrobilurinas y los triazoles, solos y en mezcla son una alternativa buena para el control de *H. vastatrix*.

Palabras clave: Estrobilurinas, Triazoles, Roya.

ABSTRACT

Coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) is a disease of major economic importance affecting coffee. It is considered economically important because it is the most destructive coffee disease, which damages trees and reduces their production by causing the premature fall of infected leaves. Losses in Latin America are estimated at 30% of the harvest. The importance of *H. vastatrix* in Mexico lies in the fact that there is a coffee-growing area of 737,376.45 hectares, with a production value of more than \$ 559,394,847,000. In each coffee-producing region in Mexico there are plantations with different ages and different soil and climatic conditions; because of this, it is necessary to perform experimental applications of fungicides to determine the most efficient way of applying them. There were 18 evaluated treatments, each with 5 applications and 5 monthly evaluations during the period June to October 2014. The assessment of severity was performed with the scale established by SENASICA in 2013. The treatments were composed of triazoles, strobilurins, cloronitrilo, copper, some biological agents and resistance inducers. The treatments that had lower severity were strobilurins (1-3%) and triazoles (1-4%), alone and in combination, outperforming the resistance inducers (3-8%) and copper (3-7%). It is therefore concluded that both strobilurins and triazoles, alone and in combination, are a good alternative for the control of *H. vastatrix*.

Keywords: Strobilurins, Triazoles, Coffee leaf rust

1 Tesista

2 Director

INDICE GENERAL

INDICE DE CUADROS	10
INDICE DE FIGURAS	11
INDICE DE IMÁGENES	12
INTRODUCCION	14
OBJETIVO.....	17
HIPÓTESIS	17
REVISION DE LITERATURA.....	18
IMPORTANCIA DEL CULTIVO DE CAFE	18
Importancia nivel mundial del café	18
Importancia a nivel nacional	21
Importancia a nivel estatal	22
Importancia a nivel regional.....	24
CULTIVO DEL CAFÉ.....	24
Clasificación taxonómica del cultivo de café.....	24
Morfología de la planta de café.....	25
Fenología del cultivo de café.....	27
Requerimientos del cultivo.....	31
ROYA DEL CAFÉ (<i>Hemileia vastatrix</i>)	32
Origen y distribución de la roya.....	32
Importancia nivel mundial de la roya.....	32
Importancia nivel nacional de la roya.....	34
Importancia nivel estatal de la roya.....	36
Importancia nivel regional de la roya	37
Sintomatología de <i>Hemileia vastatrix</i>	38

Diseminación de <i>Hemileia vastatrix</i> en las plantas.....	40
Clasificación taxonómica.....	42
Morfología de <i>Hemileia vastatrix</i>	43
Identificación molecular de <i>Hemileia vastatrix</i>	44
Filogenética de <i>Hemileia vastatrix</i>	47
Ciclo biológico y epidemiología de <i>Hemileia vastatrix</i>	48
Daños ocasionados por la roya del café	53
Control de <i>Hemileia vastatrix</i>	54
MATERIALES Y METODOS	66
Descripción del área de estudio.....	66
Localización.....	66
Clima	67
Manejo agronómico	68
Establecimiento de los ensayos experimentales	68
Diseño experimental	68
Realización del croquis del experimento	68
Establecimiento del ensayo experimental y la parcela útil	69
Descripción del experimento	69
Características de los ingredientes activos.....	71
METODOLOGIA.....	73
Evaluación de <i>Hemileia vastatrix</i>	73
Análisis estadístico de los datos.....	75
RESULTADOS Y DISCUSION	76
CONCLUSIÓN.....	89
LITERATURA CITADA.....	91

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Genotipos diferenciales de café y su correspondiente designación en grupos fisiológicos según el tipo de genes de resistencia que portan (Romero, 2013).....	64
Cuadro 2: Tratamientos utilizados en el ensayo experimental	70
Cuadro 3: Nivel de daño ocasionado por Hemileia vastatrix (SENASICA, 2013).....	74
Cuadro 4: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la primera evaluación.	77
Cuadro 5: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la segunda evaluación	79
Cuadro 6: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la tercera evaluación	80
Cuadro 7: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la cuarta evaluación	82
Cuadro 8: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la quinta evaluación	84

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribución geográfica de la producción mundial de café (AMECAFE, 2012).....	18
Figura 2: Porcentaje de participación de los países productores de café (Moll, 2015).....	19
Figura 3: Consumo mundial del café (ICO, 2015).....	20
Figura 4: Porcentaje de participación de los países consumidores de café (Moll, 2015).....	20
Figura 5: Distribución geográfica de la producción de café en México (AMECAFE, 2012).	22
Figura 6: Regiones cafetaleras en el estado de Puebla (Proyecto estratégico fomento productivo et al., 2011).....	23
Figura 7: Morfología de la raíz del cafeto (Masaba, 1998).	26
Figura 8: Severidad promedio foliar en 14 municipios de Puebla en Enero, 2015 (SINAVEF, 2015).	37
Figura 9: Diseminación de las uredosporas por salpicadura (Fulton, 1984).....	40
Figura 10: Incidencia de la enfermedad y su distribución a través de las ramas (Fulton, 1984).	40
Figura 11: Incidencia de la enfermedad a través de la planta de café (Fulton, 1984).....	41
Figura 12: Filogenia de <i>Hemileia vastatrix</i> (Diogo et al., 2009).	47
Figura 13: Ciclo biológico y epidemiología de <i>H. vastatrix</i> . Fructificación (F), área foliar del dosel (AF), radiación interceptada en el dosel (RID), precipitación (PP), humedad del suelo (HS), humedad disponible en hojas (HH), densidad estomática (DS), temperatura (T), velocidad del viento (V) (Gonzalez <i>et al.</i> , 2013).....	51
Figura 14: Ciclo biológico de la <i>Hemileia vastatrix</i> (APS, 2015).....	52
Figura 15: Ubicación de Xicotepec de Juárez, Puebla (Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, 2015).	66
Figura 16: Croquis del experimento	69
Figura 17: Porcentaje de severidad de los tratamientos durante el periodo de evaluación.	87
Figura 18: Porcentaje de eficacia de los tratamientos durante el periodo de evaluación.....	88

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Yemas de la rama. A) Yema apical; B y C) Yemas laterales (Arcila et al, 2007).	26
Imagen 2: Flor de café (Alzate, 2015).....	27
Imagen 3: Distribución mundial de <i>H. vastatrix</i> . Créditos EPPO, 2015.....	33
Imagen 4: Detecciones confirmada de <i>H. vastatrix</i> en México. Créditos: SINAVEF-LaNGIF, (SINAVEF, 2013).	34
Imagen 5: Distribución potencial de la roya del cafeto en la república Mexicana (SINAVEF, 2013).....	34
Imagen 6: Distribución regional de roya del cafeto en Puebla estimada mediante la severidad promedio foliar en abril, 2015 (SINAVEF, 2015).	36
Imagen 7: La roya del café lesión vista desde la superficie de la parte superior de la hoja (APS, 2015).	39
Imagen 8: La roya del café lesión vista desde la superficie de la parte inferior de la hoja (APS, 2015).....	39
Imagen 9: El uredinios emergen a través de los estomas en lugar de entrar en erupción a través de la epidermis (APS, 2015).	39
Imagen 10: Progreso de los síntomas ocasionados por <i>Hemileia vastatrix</i> (Barquero, 2013).	41
Imagen 11: Uredinias mostrando la disposición de las esporas (Carvalho et al, 2011).43	
Imagen 12: Urediniosporas (Carvalho et al, 2011).	43
Imagen 13: Uredinioporas y teliosporas (Castro et al., 2009).....	44
Imagen 14: Telioporas (Castro et al., 2009).	44
Imagen 15: Telias y teliosporas (Hernández, 2005).....	44
Imagen 16: Ciclo de biológico de <i>Hemileia vastatrix</i> en la planta (OIRSA, 2013).....	52
Imagen 17: La roya del café atacado por el hongo de halo blanco <i>Lecanicilium lecani</i> (Perfecto, 2014).....	59
Imagen 18: El "abrazo mortal" de <i>A. meliolae</i> al uredocuerpo de <i>H. vastatrix</i> localizado en la estoma de una hoja de cafe. a) El uredocuerpo ha colapsado, se observan todavía uredosporas en la superficie. Las hifas del hiperparasito se muestran vigorosas	

y parecen introducirse en el uredocuerpo. b) El colapso del uredocuerpo es completo, a la izquierda se observan abundantes esporas del hiperparasito, e hifas ramificadas que llegan hasta el uredocuerpo. Escala de la barra=20µm (Arriola et al., 1998). 60

Imagen 19. El "abrazo mortal" de *V. leptobactrum* al uredocuerpo de *H. vastatrix* localizado en la estoma de una hoja de cafe. a) Se muestra el inicio del colapso del uredocuerpo, el cual contiene en su superficie apreciables uredosporas. Las hifas del hiperparasito se acomodan en varios puntos de la superficie del uredocuerpo, al parecer, penetrandolo. b. El colapso del uredocuerpo es completo. Escala de la barra=20µm (Arriola et al., 1998)..... 60

Imagen 20: Ubicación de la "Finca Puebla" (Google maps, 2015). 67

Imagen 21: Escala de severidad de la roya del cafeto en la hoja (SENASICA, 2013). . 74

INTRODUCCION

No es fácil exagerar la importancia social y política del café, desde su papel principal en la historia colonial del sur de Asia y su influencia en la efervescencia intelectual que surge de las casas de café del siglo XVIII, y su papel en la actualidad como estimulante legal más importante del mundo y es la base económica para millones de familias de pequeños agricultores en los trópicos y las naciones en las que residen (Perfecto *et al.*, 2014).

El café es un producto agrícola de suma relevancia en el mundo, ya que es cultivado por 20 millones de productores en 56 países. México ocupa el séptimo lugar en producción después de Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia, India y Etiopía, con una participación en los últimos años de poco más de 4 millones de sacos (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

El cultivo del café en nuestro país, se desarrolla en doce estados reconocidos, de los cuales Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Guerrero e Hidalgo son los principales productores. La superficie de cultivo es superior a 688,700 ha. distribuidas; en 58 regiones y 404 municipios, lo que genera numerosos empleos en el campo, además de ser la principal fuente de ingresos de muchos pequeños productores y de 17 grupos indígenas del país (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

El café es uno de los principales productos agrícolas, con un peso importante en el comercio mundial, llegando a generar ingresos anuales superiores a los 15 mil millones de dólares para los países exportadores y dando ocupación

directa e indirecta a poco más de 20 millones de personas dedicadas al cultivo, transformación, procesamiento y comercialización del producto en todo el mundo (Centro de estudios de finanzas públicas, 2001).

La roya del cafeto es la enfermedad más destructiva del cafeto y la de mayor importancia económica a nivel mundial, debido a que esta enfermedad provoca la caída prematura de las hojas, propiciando la reducción de la capacidad fotosintética así como el debilitamiento de árboles enfermos y en infecciones severas puede ocasionar muerte regresiva en ramas e incluso la muerte de los árboles (APS, 2015).

A su vez, el cultivo de café es considerado como el producto agrícola más importante en el comercio internacional, y una mínima reducción en el rendimiento o un ligero aumento en los costos de producción de este cultivo por efecto de *Hemileia vastatrix*, puede tener un gran impacto en los cafecultores y en los países cuyas economías son totalmente dependientes de las exportaciones del café (APS, 2015).

El impacto económico de *H. vastatrix* en el cultivo del café no solo se debe a la reducción de la cantidad y la calidad de la producción, sino también a la necesidad de implementar costosas medidas de control en los cultivares susceptibles (CABI, 2013. Citado por SENASICA, 2013).

La importancia de *H. vastatrix* en México radica en que existe una superficie sembrada del cultivo de café de 737,376.45 hectáreas, de las cuales se cosechan 699,307.33 con una producción de 1,166,025.82 toneladas de café en

cereza, cuyo valor de producción es superior a los 5,593,948.47 de pesos (SIAP, 2015).

Hay que tener presente que ataques severos de estos patógenos ocasionan la caída de las hojas y una marcada disminución de la producción. Además incide negativamente en la preparación de las plantas de café para cosechas futuras, motivo por el cual es importante tener un control de esta enfermedad (SENASICA, 2013).

En México, en cada una de las regiones productoras de café existen diferentes edades en las plantaciones al igual que diferentes condiciones edafoclimáticas; Debido a esto, es necesario realizar aplicaciones experimentales de fungicidas para determinar la forma adecuada de tener una buena eficacia de dichos productos. Con base en lo anterior es necesario conocer la efectividad que presentan los fungicidas de contacto y los sistémicos en el control de la roya del café en cada una de las regiones productoras.

OBJETIVO

- Proponer alternativas químicas y biológicas para el control de *Hemileia vastatrix* en café (*Coffea arabica*)
- Determinar la mejor alternativa para el control de *Hemileia vastatrix* como principal enfermedad que ataca al cultivo de café.

HIPÓTESIS

- Existen alternativas que pueden ser útiles para el control de *Hemileia vastatrix* en el cultivo del café.
- Al menos uno de los tratamientos tiene un mejor control de *Hemileia vastatrix* y por lo consiguiente es la mejor alternativa.

REVISION DE LITERATURA

IMPORTANCIA DEL CULTIVO DE CAFE

Importancia nivel mundial del café

El café es considerado el primer producto agrícola y el segundo commodity de peso mundial después del petróleo. La importancia global del cultivo se deriva del hecho que involucra tanto países productores (Figura 1), ubicados en la zona intertropical húmeda, como países consumidores los cuales, a excepción de Brasil, se localizan preferencialmente en las zonas templadas del norte (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2011. Citado por Romero, 2013).

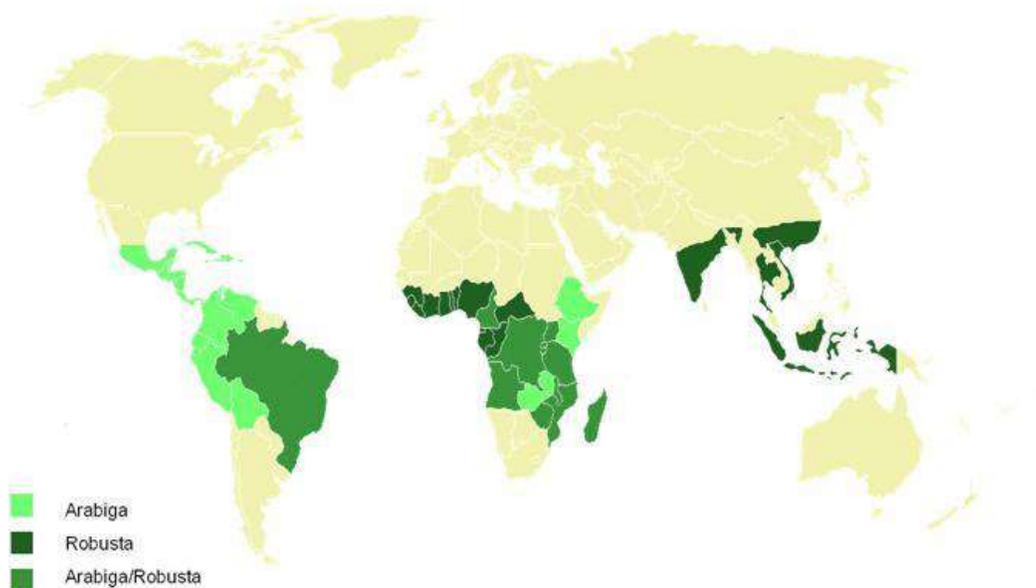


Figura 1: Distribución geográfica de la producción mundial de café (AMECAFE, 2012)

La producción de café se basa fundamentalmente en las especies *Coffea arabica* y *C. canephora*, las cuales representan un 70 y 30% de la producción mundial, respectivamente (Bustamante *et al*, 2001).

El café es un producto agrícola de suma relevancia en el mundo, ya que es cultivado por 20 millones de productores en 56 países (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011), 13 de ellos producen más del 80 por ciento del volumen mundial. Siete de esos países son americanos, tres asiáticos y tres africanos (Figura 2) (Centro de estudios de finanzas públicas, 2001).

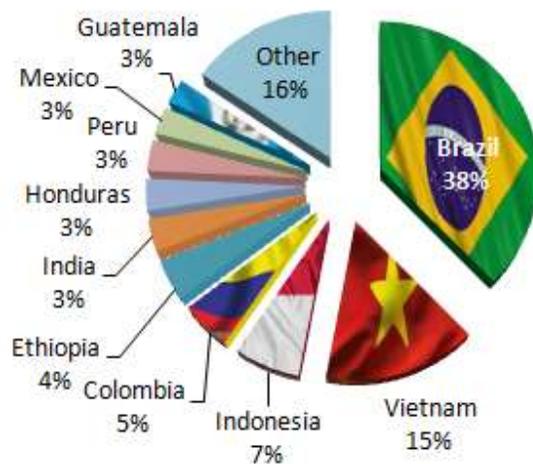


Figura 2: Porcentaje de participación de los países productores de café (Moll, 2015).

La producción mundial del café se estima que fue de 141.2 millones de sacos de 60 kg durante 2014/15, 3.8% menos que la producción del año 2013/14. Para el café arábica se reportó una reducción de 3.9% en la producción del año 2014/15 en comparación del año previo, mientras que para el café robusta fue de 3.7% (ASERCA, 2015). El USDA mencionó que la producción mundial de café aumentará en 152.7 millones de sacos en el año comercial 2015/16, al alza

de los 146.3 millones de sacos del ciclo 2014/15, liderado por el aumento en el mayor productor Brasil de 52.4 millones de sacos al alza de los 51.2 millones de sacos anteriores y del segundo productor, Vietnam con 28.6 millones de sacos (ASERCA, 2015).

El consumo mundial de café en el año 2014 se estima fue de 149,3 millones de sacos. Esto representa una tasa media de crecimiento al año del 2,3% en los cuatro últimos años. Mucho de ese crecimiento se dio en los mercados emergentes, con un promedio de 4,6% desde 2011 (ICO, 2015). La demanda es fuerte en muchos países, sobre todo en los mercados tradicionales (Canadá, la UE, Japón, Noruega, Suiza, Estados Unidos, otros) (ASERCA, 2015), pero se registró una fuerte demanda, en especial de la Federación de Rusia, la República de Corea, Argelia y Turquía (Figura 3, 4). Los países exportadores registraron un aumento en la demanda, un promedio de 2,6%. Brasil es con mucho el mayor consumidor de café de entre los países exportadores, con 20,8 millones de sacos en 2014, seguido de Indonesia (4,2 millones), Etiopía (3,7 millones) y México (2,4 millones) (ICO, 2015).



Figura 3: Consumo mundial del café (ICO, 2015).

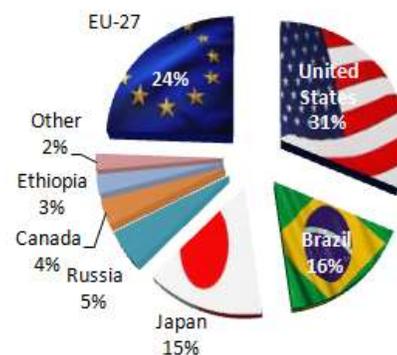


Figura 4: Porcentaje de participación de los países consumidores de café (Moll, 2015).

El cultivo de café es considerado como el producto agrícola más importante en el comercio internacional, y una mínima reducción en el rendimiento o un ligero aumento en los costos de producción de este cultivo por efecto de *H. vastatrix*, puede tener un gran impacto en los cafecultores y en los países cuyas economías son totalmente dependientes de las exportaciones del café (APS, 2011. Citado por SENASICA, 2013).

Importancia a nivel nacional

El café es un producto agrícola de suma relevancia en el mundo, ya que es cultivado por 20 millones de productores en 56 países. México ocupa el séptimo lugar en producción después de Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia, India y Etiopía, con una participación en los últimos años de poco más de 4 millones de sacos (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

En México, el café se produce fundamentalmente en las vertientes de las cadenas montañosas del centro y sur del país, bajo la cubierta de un dosel de árboles. De los cerca de 400 municipios cafetaleros mexicanos (Figura 5), un gran porcentaje se localizan en zonas ecológicas tropicales húmedas (selvas altas y medianas) y subhúmedas (selvas bajas) y un 20 por ciento en las zonas de bosques mesófilos o de neblina (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

El cultivo del café en nuestro país, se desarrolla en doce estados reconocidos, de los cuales Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Guerrero e Hidalgo son los principales productores. La superficie de cultivo es de 737,376.45 ha (SIAP,

2015) distribuidas; en 58 regiones y 404 municipios, lo que genera numerosos empleos en el campo, además de ser la principal fuente de ingresos de muchos pequeños productores y de 17 grupos indígenas del país (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

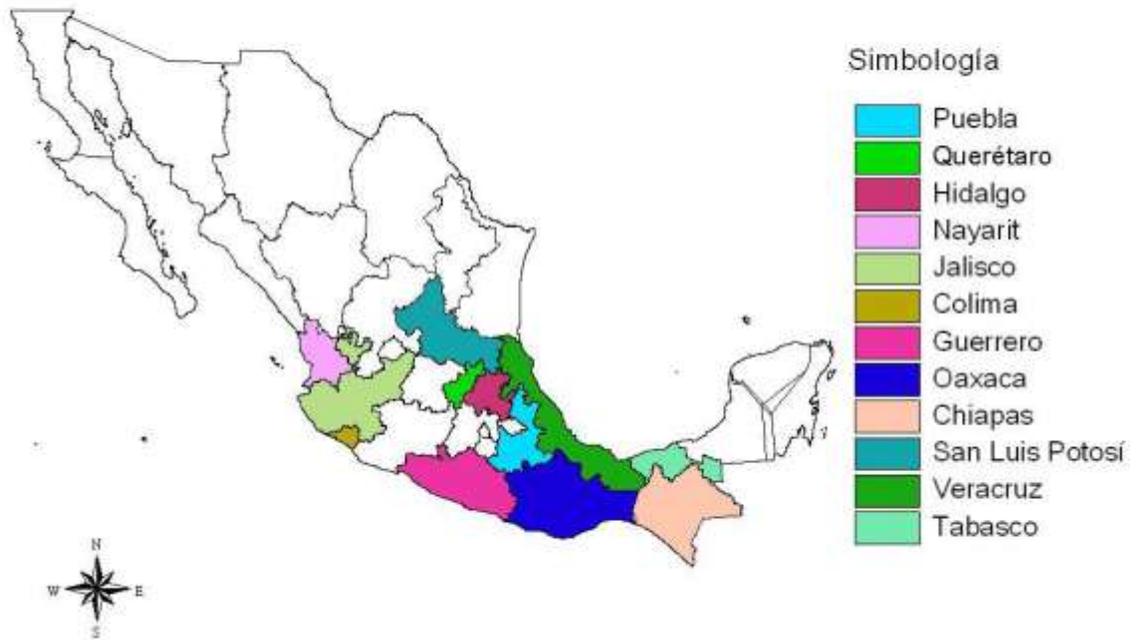


Figura 5: Distribución geográfica de la producción de café en México (AMECAFE, 2012).

Importancia a nivel estatal

En Puebla el café se produce en 55 Municipios, en 625 comunidades, estos son datos del padrón cafetalero (Figura 6), se tienen identificados 46 mil 745 cafecultores, que poseen 64,518 predios y una superficie de 67,136 hectáreas, las cuales se encuentran geo referenciadas (fuente padrón 2004 SIAP-SAGARPA). En el Estado el café se cultiva a lo largo del relieve montañoso de

la sierra madre oriental, esta región presenta un flujo de humedad por la temporada de nortes y lluvias a lo largo de todo el año, el clima corresponde al trópico húmedo (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

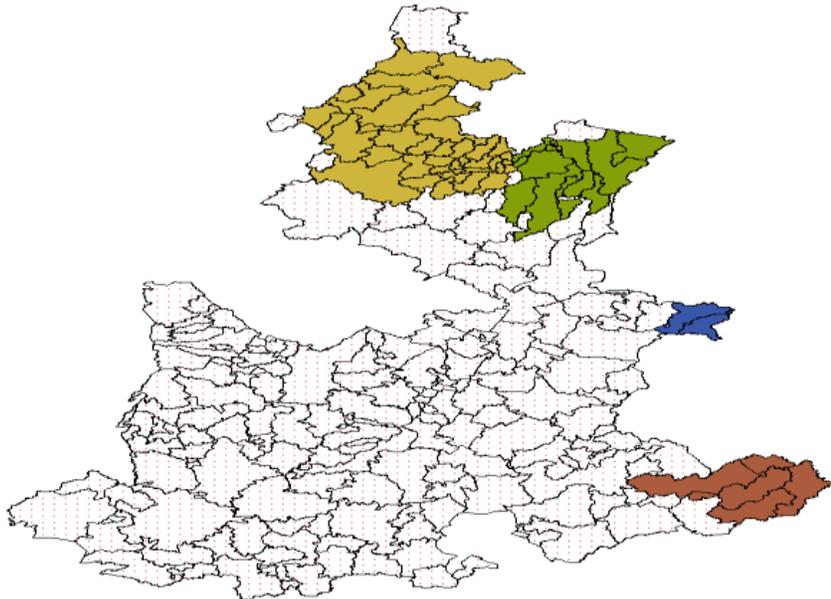


Figura 6: Regiones cafetaleras en el estado de Puebla (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

El cultivo del café en el Estado de Puebla, se caracteriza por la producción desordenada, teniendo en las fincas cafetaleras una gran diversidad de variedades, así mismo y dada la variación de precios en el mercado internacional, también ya es característica de las regiones cafetaleras la baja productividad y rendimientos demeritados por la calidad del fruto (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

Importancia a nivel regional

La de Xicotepec, es la más grande de las regiones establecidas para el Estado de Puebla, en la cual se concentran los municipios de Jalpan, Xicotepec, Tlacuilotepec, Tlaxco, Zihuateutla, Jopala, Pantepec y Venustiano Carranza; donde encontramos 14,694 unidades de producción dedicadas al cultivo del café, las cuales pertenecen a 11,078 productores y cuentan con 27, 654 hectáreas; la orografía de los municipios que integran esta región da lugar a montañas, valles y mesetas, se aprecian dos formas características de relieve: la zona accidentada que abarca el 90% de la superficie y la zona semi-plana que abarca solo el 10% (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

CULTIVO DEL CAFÉ

El café pertenece a la familia botánica Rubiaceae, que tiene unos 500 géneros y más de 6.000 especies. La mayoría son árboles y arbustos tropicales que crecen en la capa más baja de los bosques. Otros miembros de esa familia son las gardenias y las plantas que producen quinina y otras sustancias útiles, pero el *Coffea* es con mucho el miembro más importante de la familia desde el punto de vista económico (ICO, 2015).

Clasificación taxonómica del cultivo de café

De las tres especies que se explotan comercialmente, la *Coffea arabica* es la más conspicua a nivel mundial, no sólo por el área sembrada y la cantidad

suplida en el mercado, sino por la excelente calidad de su bebida. El café comercializado a nivel mundial proviene de *C. arabica* o arábicas del *C. Canephora* o robustas y, en menor escala del *C. Liberica* (Mora, 2008).

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Angiospermae

Categoría: Lamiids

Orden: Gentianales

Familia: Rubiaceae

Género: Coffea.

Especie: Coffea arabica

(EPPO, 2015).

Morfología de la planta de café

Raíz: la raíz central es pivotante, su longitud en una planta adulta es de 50 a 60 cm aproximadamente, las raíces secundarias (de sostén y laterales) se originan a partir de la pivotante; de las secundarias, generalmente se desarrollan los pelos absorbentes que, en un alto porcentaje (80-90%), se encuentran en los primeros 30 cm del suelo, con un radio de 2 a 2.5 m a partir de la base del tronco (Figura 7). Los pelos absorbentes son muy importantes porque le permiten a la planta la absorción de agua y nutrientes del suelo (Marín, 2012).

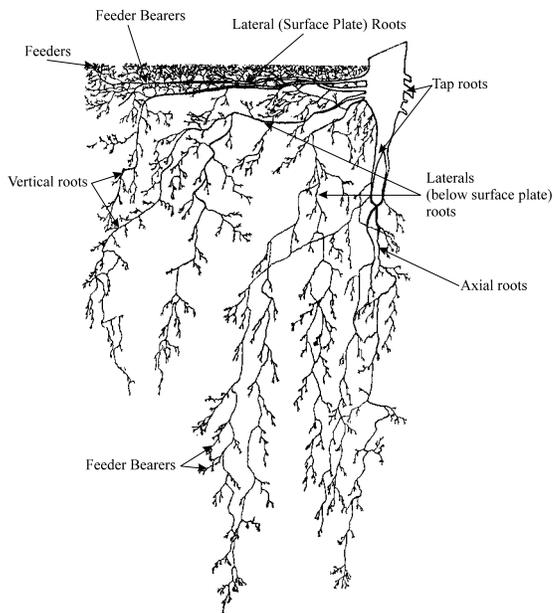


Figura 7: Morfología de la raíz del caféto (Masaba, 1998).

Tallo: es leñoso, erecto y de longitud diversa de acuerdo a la variedad. Presenta la particularidad de producir tres tipos de yemas que originan diferentes partes de la planta: el tallo, las ramas y las hojas (Imagen1) (Marín, 2012).



Imagen 1: Yemas de la rama. A) Yema apical; B y C) Yemas laterales (Arcila et al, 2007).

Hojas: la lámina de la hoja mide de 12 a 24 cm de largo por 5 a 12 cm de ancho, variando su forma de elíptica a lanceolada (Marín, 2012).

Flores: Una flor de café posee los cuatro tipos de estructuras que caracterizan a una flor completa y perfecta: dos estructuras estériles que son el cáliz y la corola, y dos estructuras fértiles que son los carpelos (ovario–estilo–estigma) y los estambres (Imagen 2) (Arcila, 2007).



Imagen 2: Flor de café (Alzate, 2015).

Fenología del cultivo de café

El café continúa su ciclo, luego de la cosecha, y debido al verano llega a un estrés el cual, es clave para una buena floración. El ciclo luego de la floración y maduración de los frutos continúa por más de 40 años, sin embargo su mayor productividad es de los 3 a 7 años, luego decae sin embargo si se hace recepas y las raíces siguen en buen estado, más una buena fertilización y manejo adecuado del suelo, se puede tener excelentes cosechas por los siguientes 20 años (Abad, 2014). Un cafeto bien manejado puede ser productivo hasta 80 años o más, pero la vida útil económica de la plantación raramente llega a los 30 años (Wintgens, 2009).

Aunque en cada una de las zonas productoras de café existen un manejo diferente del cultivo y las condiciones edafoclimáticas son muy diferentes, las etapas fenológicas se pueden clasificar en los siguientes grupos (Arcila *et al.*, 2002):

a) Estado principal 0. Germinación y propagación vegetativa: La duración de esta fase es de aproximadamente 75 días y comprende, desde el momento posterior a la siembra, hasta que han emergido el primer par de cotiledones.

b) Estado principal 1. Formación de las hojas: Este periodo comienza desde que el primer par de cotiledones ya se encuentran completamente abiertos, hasta que se han formado nueve pares de hojas. Al finalizar esta fase se puede realizar el trasplante definitivo al terreno. Los tiempos posteriores al trasplante y previos a la floración no están del todo definidos, pues las condiciones climáticas y edafológicas, así como las prácticas culturales son las que marcarán la velocidad del desarrollo.

c) Estado principal 2. Formación de las ramas: Una vez llegado a este estado, las plantas de café ya se encuentran implantadas en el terreno definitivo. En esta etapa los cafetos pasan del primer par de ramas visibles a las 90.

d) Estado principal 3. Elongación de las ramas: En este periodo se produce la formación de nudos presentes en las ramas. El rendimiento del cafeto está sujeto a la cantidad de nudos presentes en las ramas laterales que hayan nacido en el año anterior, ya que en ellos es donde se originan las inflorescencias.

e) Estado principal 5. Desarrollo de la inflorescencia: Esta etapa engloba desde que se ven las yemas de las inflorescencias, hasta que se observan las flores con pétalos alargados pero todavía cerrados.

f) Estado principal 6. Floración: Se considera comenzada la etapa de floración cuando el 50% de las flores hayan emergido.

g) Estado principal 7. Desarrollo del fruto y de la semilla: Al inicio de la fructificación los frutos son casi inapreciables, posteriormente comienza un aumento de tamaño, aunque no de peso, y es a partir de la dieciseisava semana desde la floración cuando el grano casi ha alcanzado el desarrollo completo.

h) Estado principal 8. Maduración del fruto y de la semilla: Cuando hayan pasado 25 semanas desde la floración, el fruto se encuentra maduro y listo para ser recolectado.

i) Estado principal 9: Senescencia: Es la fase final y consiste en un periodo de declive para el cafeto. El follaje va cambiando de color, la zona de producción se va trasladando a la parte superior del árbol y comienza la defoliación de la planta. En esta etapa ya se ha concluido el 90% de la cosecha, por lo que se comienzan los tratamientos postcosecha.

La plántula de café emerge entre los 45 y 50 días, después pasa al vivero y del vivero al trasplante definitivo en el campo cuando la planta tiene de cinco a seis meses de edad y esta tenga por lo menos seis pares de hojas verdaderas

(IHCAFE 2001a. Citado por Altamirano, 2012). El café toma tres años desde la germinación de la semilla hasta la producción de frutos (Wintgens, 2009).

Trasladándose a la etapa fenológica en la que la planta de café entra en su fase reproductiva, el tiempo transcurrido de una campaña a otra; dura doce meses, y tiene cuatro etapas bien marcadas (Marín, 2012):

Floración: las yemas se transforman en flores o ramas, hay mayor desarrollo vegetativo, gran producción de ramas y hojas, máxima actividad radicular y mayor formación de pelos absorbentes. Esta etapa presenta una duración de tres meses.

Desarrollo del fruto o llenado de grano: llenado intenso del grano, menor producción de ramas y hojas y menor formación de pelos absorbentes. Esta etapa presenta una duración de cuatro meses.

Cosecha: crecimiento vegetativo mínimo, se presenta la formación de nuevas yemas, menor actividad radicular y degradación de pelos absorbentes. Esta etapa presenta una duración de tres meses.

Descanso: no hay desarrollo de ramas y hojas, no hay absorción de agua y nutrientes, las yemas se diferencian y crecen, pero no se abren. Esta etapa presenta una duración de dos meses.

Desde el momento de la floración hasta la maduración del fruto transcurren aproximadamente 32 semanas, durante este periodo el fruto pasa a través de diferentes estados de desarrollo (Cenicafé, 2007 Citado por Altamirano, 2012), a continuación se presentan los estados del desarrollo del fruto:

Etapa 1: Primeras 7 etapas después de la floración, el crecimiento del fruto es imperceptible y tiene el aspecto de un fósforo.

Etapa 2: Semana 8 a 17 después de la floración. El fruto crece en forma acelerada y adquiere el tamaño final. La semilla es de consistencia gelatinosa.

Etapa 3: Semanas 18 a 25 después de la floración. La semilla completa su desarrollo, se endurece y gana peso.

Etapa 4: Semanas 26 a 32 después de la floración. El fruto ya está fisiológicamente desarrollado y tiene lugar la maduración.

Etapa 5: Después de la semana 32 el fruto se sobre madura y se torna de un color violeta oscuro y finalmente se seca. Hay pérdida de peso.

Requerimientos del cultivo

Condiciones adecuadas para la producción de café

Altitud (m.s.n.m.): 1,000 – 1,600

Precipitación pluvial (mm): 1,000 – 2,500

Temperatura (°C): 18 – 22

Humedad relativa (%): 70 – 95

Luminosidad (horas de brillo solar): 1,500 – 2,500

(Marín, 2012).

ROYA DEL CAFÉ (*Hemileia vastatrix*)

Origen y distribución de la roya

La roya (*Hemileia Vastatrix*) es la enfermedad más importante del café en todo el mundo. Fue descubierto por primera vez en las cercanías del lago Victoria en África oriental en 1861, y más tarde se identificó y estudió en Ceilán (Sri Lanka) en 1867. La enfermedad pronto se extendió a gran parte del sudeste de Asia y, finalmente, todo el café del sur, centro y occidente de las regiones crecientes en el cultivo de café en África. La roya no se conocía en el hemisferio occidental hasta 1970, cuando se encontró en Bahía, Brasil (Hernández, 2005). Otro hongo de la roya es *Hemileia coffeicola* ataca a plantas de café, pero es de menor importancia, y está restringida al centro y occidente de África (Schieber *et al*, 1984).

Importancia nivel mundial de la roya

La Roya del Cafeto (*Hemileia vastatrix*) es una de las enfermedades de mayor importancia económica que afectan el café (Barquero, 2013). El patógeno tiene la capacidad de infectar en menor o mayor grado todas las especies del género *Coffea*, como ocurre con *Coffea canephora* variedad Robusta, pero los mayores índices de daño se aprecian en variedades susceptibles de *C. arábica*, entre las que se encuentran cultivares tradicionales muy apreciados como Typica, Bourbon, Caturra, Catuai, Pache, Maragogipe, entre otros, en los que se presenta con altos índices de incidencia y severidad, reduciendo significativamente su potencial productivo (Almengor, 2015).

La introducción y la detección de la roya en América Latina se presentó de una manera cronológica, donde se cree pudo ser movida por el viento, y humanos. La situación cronológica de su introducción es la siguiente: 1) Nicaragua, 2) introducción a Bolivia, 3) introducción a Perú, 4) propagación en Ecuador, 5) introducción en El Salvador, 6) invasión de Honduras, 7) los extendido en Guatemala, y 8) se extendió a México (Fulton, 1984).

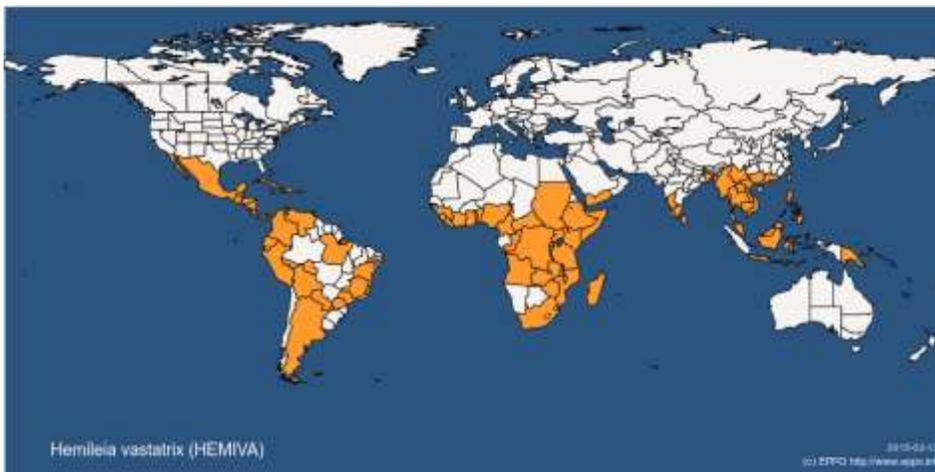


Imagen 3: Distribución mundial de *H. vastatrix*. Créditos EPPO, 2015.

La roya del cafeto es la enfermedad más destructiva del cafeto y la de mayor importancia económica a nivel mundial, debido a que esta enfermedad provoca la caída prematura de las hojas, propiciando la reducción de la capacidad fotosintética así como el debilitamiento de árboles enfermos y en infecciones severas puede ocasionar muerte regresiva en ramas e incluso la muerte de los árboles (APS, 2011. Citado por SIMROCA, 2015). La roya del cafeto ocasionada por el hongo *Hemileia vastratrix* es una de las enfermedades más comunes y distribuidas a nivel mundial (DGSV, 2013). De acuerdo a la EPPO

(2015), la roya del cafeto encuentra distribuida en la mayoría de los países productores de café en el mundo (Imagen 3). El impacto económico de *H. vastatrix* en el cultivo del café no solo se debe a la reducción de la cantidad y la calidad de la producción, sino también a la necesidad de implementar costosas medidas de control en los cultivares susceptibles (CABI, 2013. Citado por SENASICA, 2013).

Importancia nivel nacional de la roya



Imagen 4: Detecciones confirmada de *H. vastatrix* en México. Créditos: SINAVEF-LaNGIF, (SINAVEF, 2013).

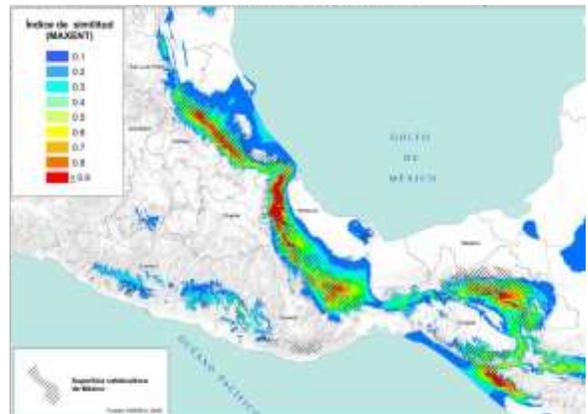


Imagen 5: Distribución potencial de la roya del café en la república Mexicana (SINAVEF, 2013).

La importancia de *H. vastatrix* en México radica en que existe una superficie sembrada del cultivo de café de 737,376.45 hectáreas, de las cuales se cosechan 699,307.33 con una producción de 1,166,025.82 toneladas de café en cereza, cuyo valor de producción es superior a los \$ 559,394,847,000 de pesos (SIAP, 2015.). Actualmente la roya del café se encuentra reportada oficialmente solo en algunos estados productores de café (imagen 4) pero existe un riesgo potencial de su diseminación en el resto de las áreas cafetaleras (imagen 5).

Diseminación de la roya en México

Durante el verano de 1981, el estado de Chiapas en el sur de México, que es el más importante estado productor de café del país, fue invadido por la roya. La roya fue encontrada en unas pocas plantas en Tapachula, cerca de la frontera con Guatemala. En el verano de 1982, la roya se había extendido a través la mayor parte del estado de Chiapas y en la región del Soconusco, pesar de que las corrientes de viento no estaban orientadas en esa dirección (Fulton, 1984). De acuerdo a la tipología de producción en México, basada en el uso de plantas-sombra, presupone un reducido efecto del viento en la movilización de altas cargas de inóculo con un efecto mayor a nivel local o parcelario (DGSV-CNRF, 2013), por lo consiguiente es probable que las uredosporas fueron llevadas a las áreas muy alejadas de esta parte de México por los recolectores de café y por los que migran de una región a otra (Fulton, 1984).

Con base en la NIMF num. 8 de la convención internacional de protección fitosanitaria, en el cual se establecen las características para la determinación de la situación de una plaga en un área, *H. vastatrix* se considera presente en el territorio nacional y sujeta a control oficial (CIPF, 2006). Haciendo una descripción más específica, en México la roya del café se ha reportado en la mayoría de los estados con cultivos de café como: Chiapas, Veracruz, Puebla, Oaxaca, Colima, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Nayarit, Querétaro y San Luis Potosí (SCOPE, 2013 Citado por SENASICA, 2013).

Importancia nivel estatal de la roya

En Puebla, al igual que en Chiapas y Veracruz, la distribución de la severidad promedio de roya a nivel regional ratifica la culminación del ciclo epidémico 2013, éste con el promedio más alto 4.3%. Sin embargo, la epidemia se encuentra entre 6-9% en los municipios Zihuateutla, Xicotepec y Jalpan en el norte y Tlapacoya en la región centro del estado. Estas determinaciones se basan en proyecciones o interpolaciones regionales así como en el análisis de la severidad promedio por municipio (DGSV, 2014).

La severidad que la que la roya se manifiesta en cada uno de las zonas cafetaleras del estado de Puebla es muy variable (Imagen 6).

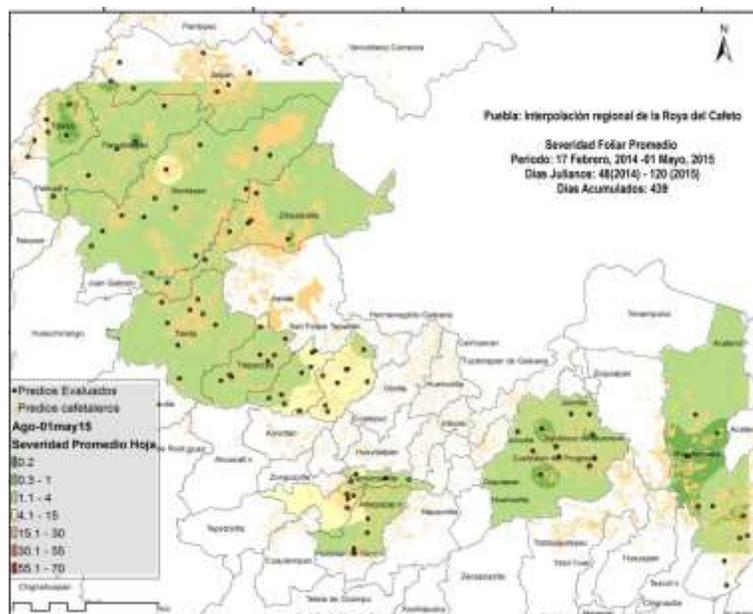


Imagen 6: Distribución regional de roya del café en Puebla estimada mediante la severidad promedio foliar en abril, 2015 (SINAVEF, 2015).

Importancia nivel regional de la roya

La incidencia de plagas y enfermedades es otro de los problemas que derivan principalmente del manejo que se le da a las unidades de producción de café; para el caso de la región Xicotepec encontramos que la broca del café es la principal plaga presente en el sistema de cultivo, con un 43.1% ; seguida de la enfermedad del ojo de gallo y el mal de hilachas, con un 19.1% cada una; la roya anaranjada con un 13.3% (Figura 8) (Proyecto estratégico fomento productivo *et al.*, 2011).

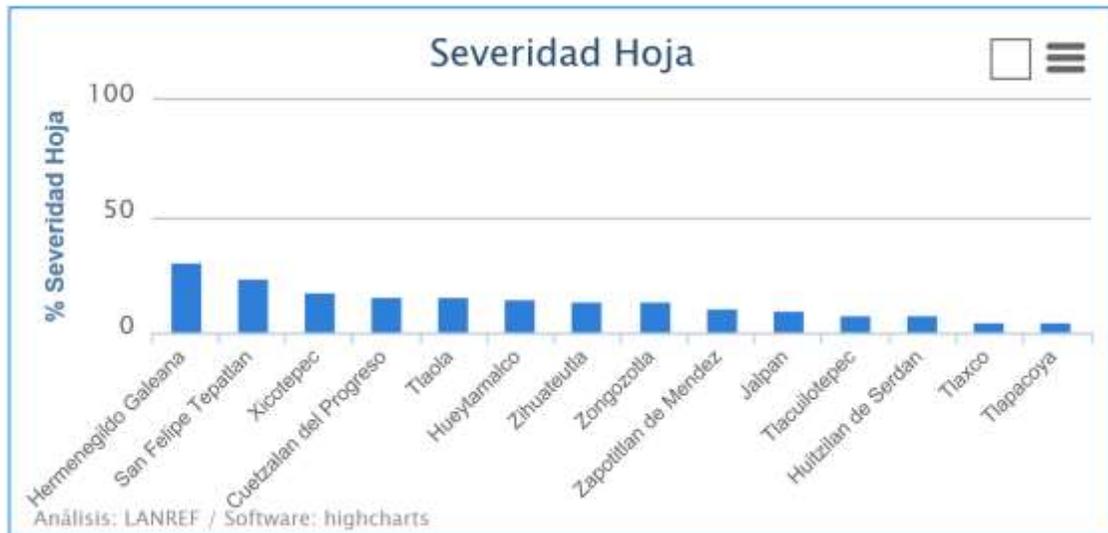


Figura 8: Severidad promedio foliar en 14 municipios de Puebla en Enero, 2015 (SINAVEF, 2015).

Sintomatología de *Hemileia vastatrix*

Inicialmente, sus síntomas se manifiestan con la aparición de pequeñas lesiones o manchas redondas, color amarillo pálido, de 1 a 3mm de diámetro. Gradualmente esta mancha aumenta de tamaño al iniciarse la esporulación y puede alcanzar los 2cm de diámetro, se torna de color naranja y la superficie se vuelve polvosa (Barquero, 2013). Cuando la cantidad de uredospóras aumenta debido a las condiciones climáticas esta suelen tomar un color anaranjado y se desprenden fácilmente. El envés de estas manchas está constituido por varios cientos de miles de uredospóras, que con la ayuda del viento, la lluvia, el paso de animales y personas, el traslado de material vegetativo, etc. se van distribuyendo por las hojas del mismo cafeto, de los cafetos vecinos y de los cafetales cercanos (Guanché, 2013). En un principio las lesiones son pequeñas y con el paso del tiempo si son demasiadas lesiones estas se unen cubriendo toda la hoja y provocando posteriormente su caída (Fulton, 1984).

Los primeros síntomas observables son pequeñas manchas amarillas pálidas en las superficies superiores de las hojas (Imagen 7). Como estas manchas aumentan gradualmente de diámetro, masas de urediniosporas color naranja (= uredosporas) aparecen en las superficies inferiores (Imagen 8). El hongo esporula a través de los estomas en lugar de romper a través de la epidermis como la mayoría de las royas hacen, por lo que no forman las pústulas típicas de muchas royas (Imagen 9). Las lesiones en polvo en el envés de las hojas

pueden ser de color amarillo-naranja a rojo-naranja en color, y existe una variación considerable de una región a otra (APS, 2015).

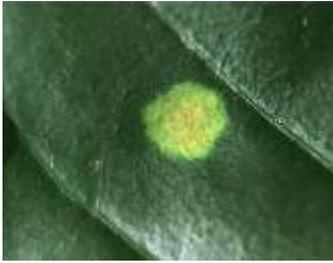


Imagen 7: La roya del café lesión vista desde la superficie de la parte superior de la hoja (APS, 2015).



Imagen 8: La roya del café lesión vista desde la superficie de la parte inferior de la hoja (APS, 2015).



Imagen 9: El uredinios emergen a través de los estomas en lugar de entrar en erupción a través de la epidermis (APS, 2015).

Una de las formas más acertadas para conocer cuál es la situación de la Roya en la finca, es mediante muestreos que determinen la cantidad de enfermedad presente en la finca o lote en particular, considerando su avance en el tiempo. De esta forma se podría tener criterio certero de la condición de la enfermedad y del tipo de combate a implantar y cuando hacerlo. Después de finalizada la cosecha, las plantas de café sufren una defoliación severa por el proceso de recolección en sí y porque la mayor incidencia de la enfermedad coincide con la época final de la cosecha. A pesar de la defoliación indicada y de la que ocurre por otros factores, aún quedan muchas hojas viejas y enfermas que son sostenidas hasta que se presenta un déficit hídrico importante, que usualmente ocurre entre los meses de febrero y marzo; esto conduce a una gran reducción de la enfermedad (Barquero, 2013).

La insatisfacción del caficultor por los precios del café en el mercado mundial durante el año 2012, luego de haber vivido precios altos en periodos anteriores, limitaron la intención de mantener el buen manejo acostumbrado en sus cafetales. El desarrollo de condiciones ambientales menos lluviosas a su vez, fueron percibidas como menos favorables para el desarrollo de plagas en general, provocando un exceso de confianza y reduciendo la atención fitosanitaria de las fincas (Barquero, 2013).

Diseminación de *Hemileia vastatrix* en las plantas

La incidencia de la enfermedad al igual que la severidad se manifiesta de acuerdo a la forma en la que entre en contacto con las condiciones que son favorables para la dispersión de las uredospora. Las uredoporas pueden dispersarse por el viento, por animales, por salpicadura y por el humano (Figura 9, 10).

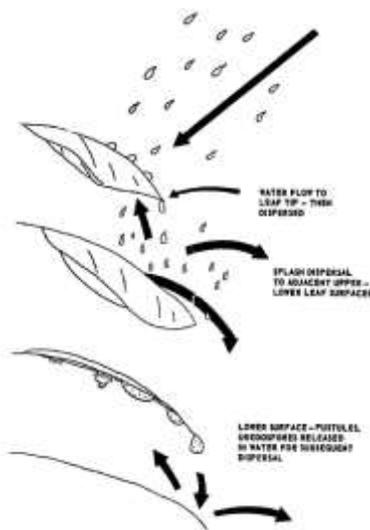


Figura 9: Diseminación de las uredosporas por salpicadura (Fulton, 1984).

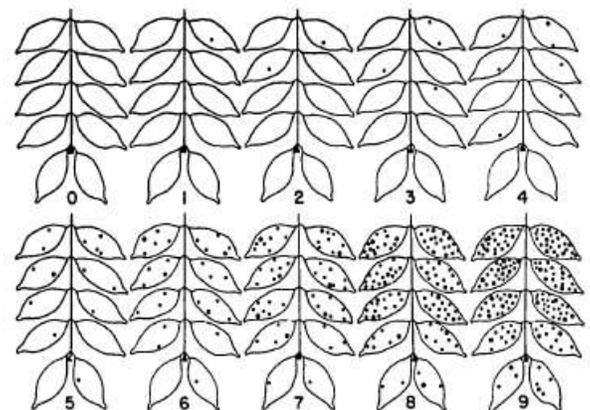


Figura 10: Incidencia de la enfermedad y su distribución a través de las ramas (Fulton, 1984).

En México también se estudió precisamente el desarrollo de la enfermedad, a escala de la planta. La epidemia comenzó a partir de las hojas viejas, localizadas en el interior debajo del cafeto, y poco a poco alcanzó las hojas jóvenes de las bandolas, en las partes más externas y altas de la planta (Figura 11) (Duran, 2013).

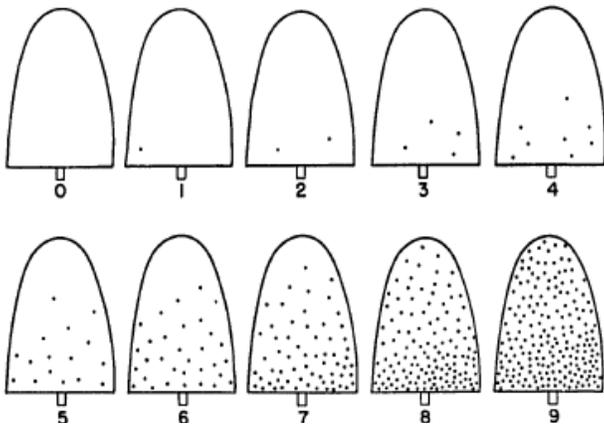


Figura 11: Incidencia de la enfermedad a través de la planta de café (Fulton, 1984).

Con base a lo mencionado por Rivillas *et al.* en 2011 y APS, 2015 se presenta el progreso de los síntomas causados por *Hemileia vastatrix*, durante el proceso de infección de la Roya en las hojas de los cafetos (Imagen 10).

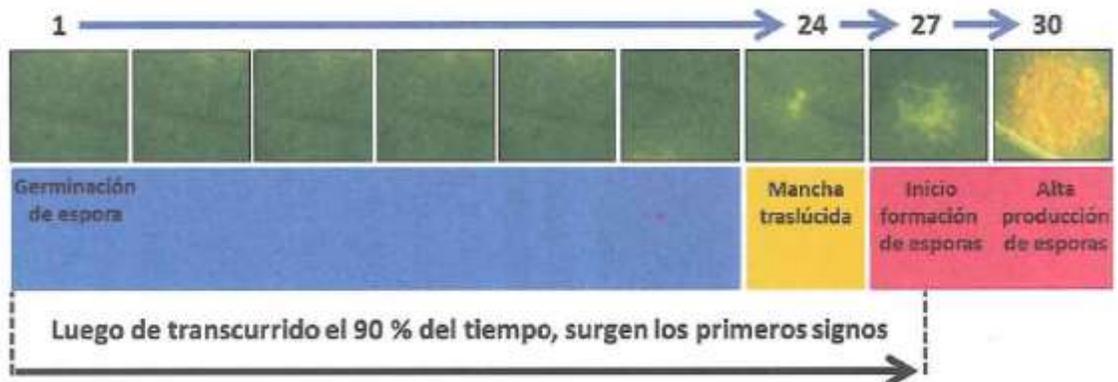


Imagen 10: Progreso de los síntomas ocasionados por *Hemileia vastatrix* (Barquero, 2013).

Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica de *Hemileia vastatrix* es la que se presenta a continuación (EPPO, 2015):

Reino: Fungy (1FUNGK)

Phylum: Basidiomycota (1BASIP)

Clase: Pucciniomycotina (1TELIC)

Subclase: Pucciniomycestes (1PUCCL)

Orden: Pucciniales (1URED0)

Familia: Chaconiaceae (1CHACF)

Género: *Hemileia* (1HEMIG)

Especie: *H. vastatrix* (HEMIVA)

Nombre común: **Español:** “roya de café” o “roya anaranjada del café”

Inglés: “leaf rust of coffee” o “rust of coffee”

Francés: “rouille de la feuille du caféier” o “rouille du caféier”

Alemán: “Rost: Kaffee”

Portugués: “Da ferrugem do cafeeiro”

El proceso infectivo de la roya del cafeto comienza con los síntomas de la enfermedad que aparecen en el envés de las hojas, en donde se observan manchas pálidas que con el tiempo aumentan de tamaño y se unen formando las características manchas amarillas o naranja, con presencia de polvo fino amarillo, ahí es donde producen las esporas del hongo (Rivillas *et al.*, 2011).

Morfología de *Hemileia vastatrix*

La uredinia es pequeña de 0.1 mm de diámetro, densa, dispersa o en manchas redondeadas de unos pocos mm en las primeras infecciones llegando hasta a varios cm en infecciones mayores (Imagen 11), dando una apariencia de polvo amarillento-naranja, luego cambia a pálido amarillento, en el centro de viejas pústulas a veces se convierte tejido en necrótico, esta emerge a través de los estomas, o rara vez a través de la epidermis, está compuesta por hifas clavate cuyas puntas hay una gran cantidad de pedicelos que es donde se producen los racimos de urediniosporas; Las urediniosporas son más o menos reniformes, 26-40 × 18-28 μm, pared hialina al pálido amarillento, de 1-2 μm de espesor, fuertemente verrugosa en el lado convexo, liso en la parte recta o cóncava, verrugas con frecuencia más largas (3-7 μm) en los bordes de esporas (Imagen 12) (Hernández, 2005).

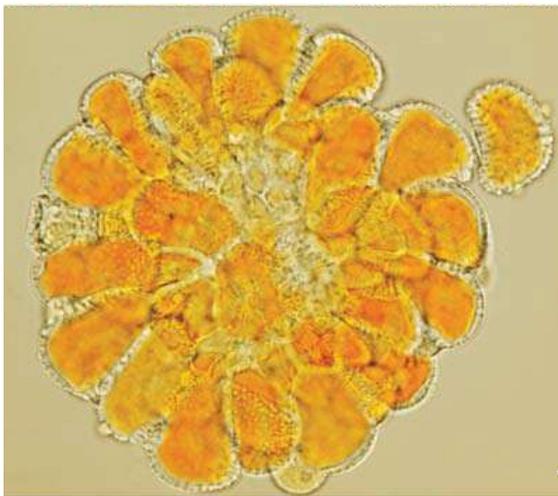


Imagen 11: Uredinias mostrando la disposición de las esporas (Carvalho et al, 2011).



Imagen 12: Urediniosporas (Carvalho et al, 2011).

La telia es similar a la uredinia, pálido amarillento, la teliospora a menudo es producida en la uredinia; la teliosporas es más o menos esférica a limoniforme, con un diámetro de 26-40 × 20-30 micras, con una pared hialina a amarillento, liso, 1 m de espesor, más gruesas en el ápice, con un pedicelo hialino (Imagen 13, 14, 15) (Hernández, 2005).

Las teliosporas, cuya ocurrencia es muy baja, son de forma redondeada de 20-25μ (Castro et al., 2009 Citado por SENASICA, 2013).

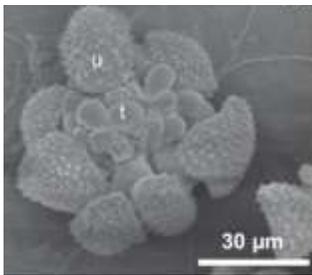


Imagen 13: Uredinioporas y teliosporas (Castro et al., 2009).

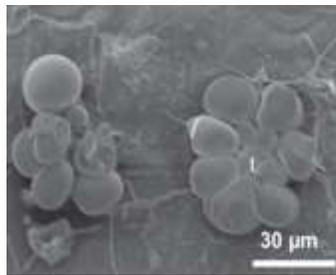


Imagen 14: Telioporas (Castro et al., 2009).

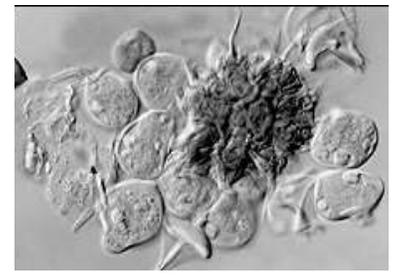


Imagen 15: Telias y teliosporas (Hernández, 2005).

Identificación molecular de *Hemileia vastatrix*

En un trabajo llevado a cabo en el Centro de Investigaciones de Café (CIFC) permitió la caracterización de cerca de 45 razas de roya, que han sido identificados basados en concepto gen-a-gen. Actualmente, existen nueve genes de virulencia (v1-v9) de *H. vastatrix* y se infiere sobre la base de nueve genes (SH1-SH9) (Magalhães, 2010).

Para llevar a cabo el proceso de identificación molecular es necesario realizar una serie de procedimientos dentro de los cuales incluye la extracción de DNA, la utilización de la técnica de PCR para ampliación de la cadena y la identificación in situ del genoma obtenido. A continuación se presenta un procedimiento para la extracción e identificación del genoma de *Hemileia vastatrix*.

Se extrae el ADN genómico de *H. vastatrix* de las hojas, utilizando el kit DNeasy Plant Mini (Qiagen), incluyendo un tratamiento con RNasa siguiendo las recomendaciones del fabricante] (Vieira *et al.*, 2011).

Para la extracción de ADN, se depositan las urediniosporas de roya en tubos Eppendorf, se adicionan 300µL de buffer de lisis (50mM de tris HCl pH 7,5; 50mM de EDTA pH 8,0; 3% de SDS; 1% de Mercaptoetanol) y se macera la solución. Una vez se fraccionadas totalmente las urediniosporas, se destapa el tubo Eppendorf y se introduce en un horno de microondas, al nivel máximo de poder, durante 20s, luego por 15s y por último por 10s, y se tiene cuidado de que no se presente ebullición (Cristancho *et al.*, 2007).

Posteriormente, se adicionan 300µL adicionales de buffer de lisis, se agita el tubo en un Vortex, y se incuba en un baño María a 80°C durante 10min. Una vez los tubos se enfrían, hasta llegar a una temperatura de 50°C, se agregan 10µL de proteinasa K (0,5mg.mL⁻¹), se agita en Vortex y se incuba a 50°C durante 30min. Se agrega 700µL de Fenol:Cloroformo:Isoamilalcohol (25:24:1), se mezcla suavemente hasta obtener una emulsión y se centrifuga a 10.000rpm

durante 10min. El sobrenadante se transfiere a otro tubo y se adiciona el mismo volumen de Cloroformo:Isoamilalcohol (24:1). Se hace una mezcla suave y se centrifuga a 10.000 rpm por 10min; este procedimiento se repite dos veces. El sobrenadante se transfiere a otro tubo y se adicionan dos volúmenes de isopropanol frío para precipitar durante 16 horas. El pellet resultante se obtiene centrifugando los tubos a 10.000rpm durante 5min, se descarta el sobrenadante, y los pellets se lavan con 480µL de etanol al 70% y 120µL de NaCl 5M. El precipitado se seca a temperatura ambiente y se resuspende en 40µL de buffer EB. Se adicionan 12µL de RNAsa A y se incuba a 37°C por 30 min, finalmente para desactivar la enzima se incuba a 65°C por 10 min. (Cristancho *et al*, 2007).

Las concentraciones de ADN genómico se estiman con una Nanodrop 1000 (Thermo Scientific, Waltham, EE.UU.), y se realiza un qPCR en 60 ng de ADN genómico, utilizando primers Hv00099 para la amplificación de la cadena (Vieira *et al.*, 2011).

Filogenética de *Hemileia vastatrix*

Basados en una red datos de 378 genes fijados para 32 especies de hongos se determinó la filogenia de *Hemileia vastatrix* (Figura 12) (Diogo et al., 2009).

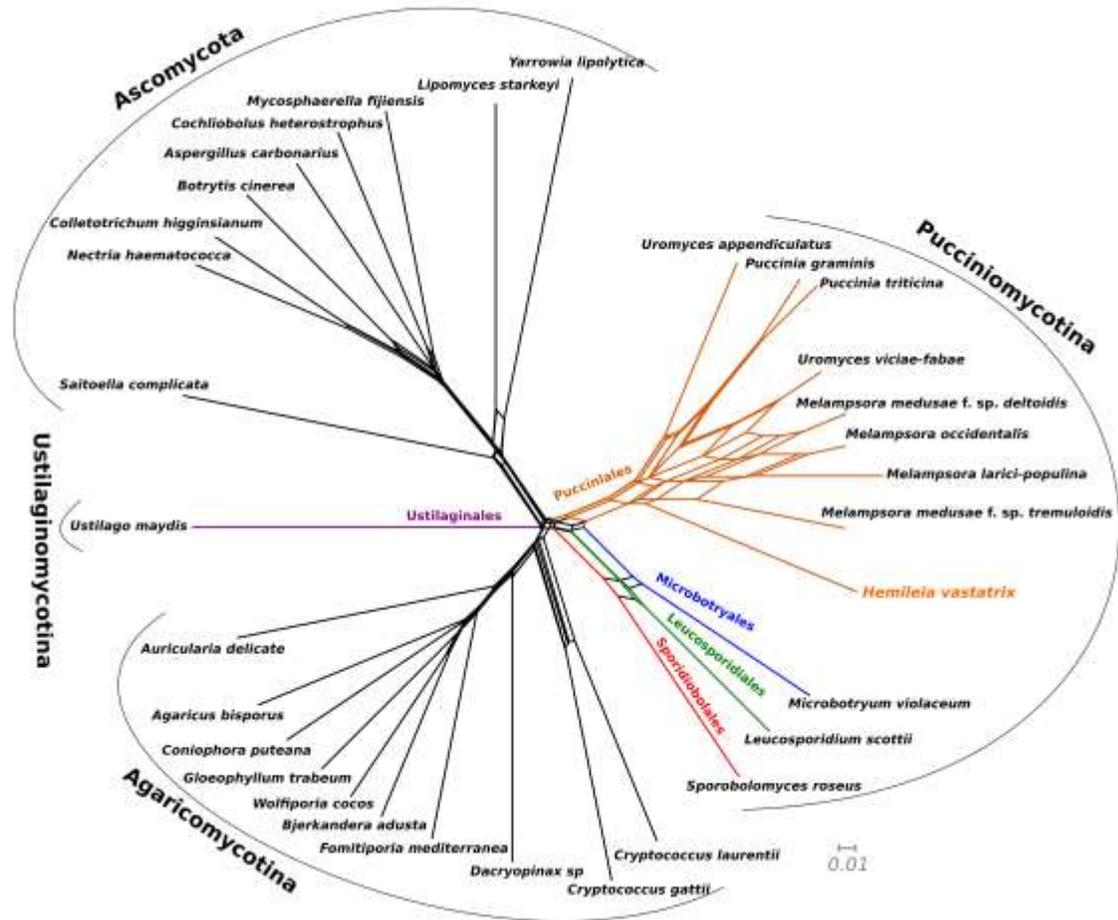


Figura 12: Filogenia de *Hemileia vastatrix* (Diogo et al., 2009).

Ciclo biológico y epidemiología de *Hemileia vastatrix*

Epidemiología

Aunque se supone que es que *Hemileia vastatrix* es heteroica, el ciclo de vida no se conoce por completo. Se conviene generalmente que la roya no completa su ciclo de vida en la planta de café, pero no se conoce ningún hospedante alternativo (Coutinho et al 1995 citado por Hernández, 2005).

El patógeno *H. vastatrix* tiene una dependencia total de la planta de café, debido a que este género es el único hospedero conocido, y sólo puede alimentarse de células vivas de la hoja para crecer y reproducirse. La capacidad de realizar este parasitismo depende de una compleja interacción entre estos dos organismos (Figura 13), de manera que para que una infección sea exitosa y culmine en enfermedad, el hongo debe desactivar señales químicas propias y así pasar desapercibido a los mecanismos de resistencia que tenga la planta (Cristancho et al., 2012 Citado por Alzate, 2015).

Con base en lo mencionado se considera que existen cuatro factores que están implicados en la intensidad de un brote de roya durante cada temporada de lluvia: 1) la cantidad de infección residual en el comienzo de la epidemia; 2) la intensidad y la distribución de la lluvia durante la formación de un brote; 3) la densidad del follaje que influye en la superficie de las hojas y en la cantidad de esporas que pueden germinar en el cual un inoculo puede ser producido; y 4) La forma de la planta. Se encontró que en plantas con años con alto rendimiento la incidencia de la infección por roya es también superior.

Demostrando que la roya es una enfermedad cíclica y severa que varía de año con año (Schieber, 1984).

1) Es necesaria la presencia del hongo capaz de parasitar células vegetales vivas, el cual inicia su ciclo con la diseminación para posteriormente iniciar con la germinación, que es el proceso donde la espora una vez depositada en el envés de la hoja, emite de uno a cuatro tubos germinativos, en un periodo de 6 a 12 horas. La etapa de colonización consiste en que una vez que ha penetrado el hongo desarrolla sus estructuras denominadas haustorios, el tiempo transcurrido hasta ese instante, se le denomina periodo de incubación que puede variar entre 18 y 24 días. Luego de transcurridos los 30 días, después de la colonización, el hongo esta suficiente maduro como para diferenciarse en estructuras llamadas soros, encargados de producir nuevas urediniosporas a razón de 1,600 por mm² de hoja por un periodo de 4 a 5 meses. Una vez dispersadas, pueden iniciar nuevamente el ciclo (Rivillas *et al.*, 2011).

2) En los ambientes con precipitaciones constantes, especialmente en horas de la tarde o noche; con ocurrencia de cielos nublados que implica temperaturas muy altas después del mediodía, o de temperaturas muy bajas en horas de la madrugada, son propios para el desarrollo de epidemias fuerte de roya. Si los periodos lluviosos coinciden con las etapas de formación de frutos y de abundante follaje, entonces ocurren momentos de mayor susceptibilidad del follaje a la infección (Rivillas *et al.*, 2011).

3) El manejo agronómico juega un papel importante en la aparición y desarrollo de la enfermedad, cuando se ejecuta de manera inapropiada o inoportuna actividades propias de manejo del cultivo, que entre ellas resultan altas densidades y/o proliferación de múltiples chupones (brotes que crecen de la base o tronco del árbol). Aplicaciones de fungicidas de manera tardía, por fuera de la epidemia, sub-dosificadas o sobre-dosificadas. Así como las actividades de cosecha, la poda pepena y repela (Rivillas *et al.*, 2011).

4) La gran cantidad de variedades existentes asociado a un estado fisiológico de la planta, puede incrementar o reducir la susceptibilidad a la enfermedad. Así como un limitado desarrollo de raíces por el efecto de suelos arcillosos, ataque de nematodos o palomilla, estrés en el sistema radical o deficiencias nutricionales; y dentro de este estado fisiológico, produce una gran cantidad de frutos, de donde las exigencias a las hojas, en el proceso de llenado de frutos es mayor, bajo estas condiciones los ataques de la roya puede ser mayor. Por esta razón, un año de mayor producción, que coincide con un ataque severo; y un año con disminución en la producción, la enfermedad se ve reducida (Rivillas *et al.*, 2011).

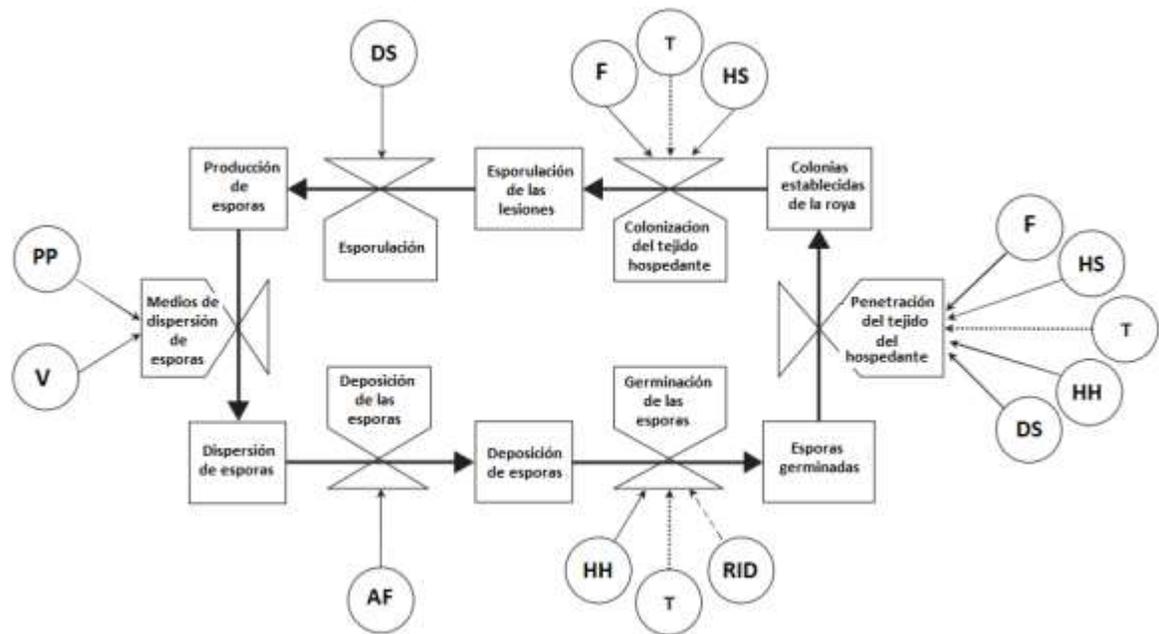


Figura 13: Ciclo biológico y epidemiología de *H. vastatrix*. Fructificación (F), área foliar del dosel (AF), radiación interceptada en el dosel (RID), precipitación (PP), humedad del suelo (HS), humedad disponible en hojas (HH), densidad estomática (DS), temperatura (T), velocidad del viento (V) (Gonzalez *et al.*, 2013)

Ciclo de vida

Urediniosporas germinan sólo en presencia de agua libre (lluvia o rocío); alta humedad por sí sola no es suficiente. Todo el proceso de la infección requiere alrededor de 24 a 48 horas de humedad libre continua, por lo que mientras el rocío pesado es suficiente para estimular la germinación urediniosporas, la infección usualmente ocurre sólo durante la temporada de lluvias (Figura 14, Imagen 16). La variación estacional en la incidencia de la enfermedad se debe principalmente a la variación en las precipitaciones. Donde hay dos estaciones lluviosas por año, hay dos picos en la severidad de la roya del café. La infección se produce en un amplio rango de temperaturas (mínimo 15 ° C / 59 °

F, óptima 22 ° C / 72 ° F, y la máxima de 28 ° C / 82 ° F). La infección se produce sólo a través de los estomas en el envés de la hoja (APS, 2015).

La esporulación se tarda de 10-14 días desde la infección para formar uredinios para así formarse las urediniosporas. Las lesiones continúan creciendo durante un período de 2 a 3 semanas. Una sola lesión producirá 6 esporas y la liberación de alrededor de 300,000 urediniosporas durante un período de 3 a 5 meses. Ciclos secundarios de infección se producen de forma continua durante un tiempo favorable, y la posibilidad de epidemias explosivas es enorme (APS, 2015). Las esporas pueden sobrevivir poco tiempo bajo condiciones secas y cálidas, sin embargo, cuando en la superficie de las hojas permanece humedad por varias horas, las esporas de la Roya pueden sobrevivir más tiempo o bien germinar y penetrar las hojas, perpetuando las infecciones (Barquero, 2013).

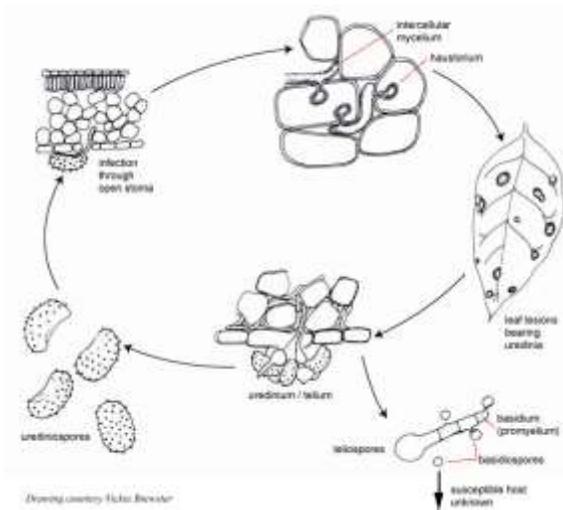


Figura 14: Ciclo biológico de la *Hemileia vastatrix* (APS, 2015)

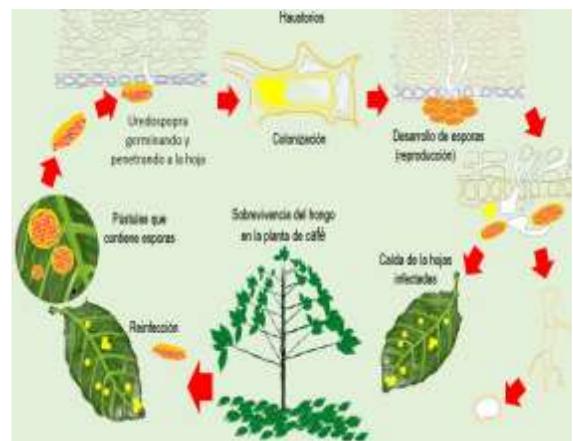


Imagen 16: Ciclo de biológico de *Hemileia vastatrix* en la planta (OIRSA, 2013).

Daños ocasionados por la roya del café

La roya del cafeto se considera importante económicamente ya que es la enfermedad más destructiva del café, la cual daña a los árboles y disminuye su producción al ocasionar la caída prematura de sus hojas infectadas (Guanché, 2013). Los daños severos, mayores al 60%, pueden causar defoliación. Si la infección ocurre en etapas tempranas se puede presentar una reducción en el rendimiento. Pero si se presenta en etapas tardías el efecto se observa en los niveles de amarre de fruto del siguiente ciclo del cultivo (SENASICA, 2013). Las pérdidas en América Latina se calculan en 30% de las cosechas. El impacto socio económico que puede generar una epidemia de roya del cafeto en Latinoamérica es de dimensiones incalculables. Nueve países latinoamericanos exportan café arábigo. En Brasil el cultivo de café representa más del 6% de todas las exportaciones agrícolas. En Colombia dependen de este cultivo más de un millón de familias (AREA, 2015).

Un planteamiento de SENASICA en 2013, dice que varios han sido los intentos para evaluar las pérdidas de producción provocadas por la roya en la zona de Mesoamérica. La idea era no solamente de cuantificar las pérdidas, sino también determinar los umbrales económicos. Se trataba de evaluar a partir de qué nivel de infección, se tenían pérdidas de producción, que justificaban el uso del control químico. En ningún trabajo se logró alcanzar este último objetivo. Se tienen intentos frustrados tanto en México como en El Salvador, Guatemala y Honduras. A pesar de las dificultades algunos autores lograron estimar las pérdidas, aunque el grado de precisión no fuera elevado (Duran, 2013).

Las hojas más susceptibles al ataque de la Roya son las hojas jóvenes. Esto merma de inmediato al cafeto, ya que son precisamente estas hojas, las que están iniciando su período de plena actividad fisiológica, las que aportan la mayor cantidad de nutrientes a la planta. Al ser atacadas por el hongo y quedar entre un 10 y un 30% de su tejido necrosado, dejan de ser funcionales y, como además, el hongo produce etileno, las hojas envejecen y caen prematuramente. Si el ataque es severo, la planta reduce su crecimiento, los frutos no se desarrollan y se generan grandes pérdidas económicas. Si el problema persiste, como la planta se está desfoliando permanentemente, y por tanto debilitándose, se muere en un periodo máximo de 2 años (Guanché, 2013).

Control de *Hemileia vastatrix*

El manejo de los patógenos del cultivo de café siempre ha sido un problema en lo que respecta a las regiones en las que se encuentra los cultivos, ya que varía sus condiciones de propagación y la velocidad de acuerdo a las condiciones ambientales en las que se desarrolle la infestación.

Se han sugerido varias formas de controlar la infestación de estos patógenos como son:

Control químico

La base racional para el manejo químico de la roya del café involucra la fenología de la planta, para lo cual se requiere entender e identificar los periodos de mayor susceptibilidad y factores de manejo que impactarán sobre

la enfermedad. Se deben realizar aplicaciones primeramente de forma preventiva (sistémicos o de contacto) o curativo (sistémicos) para reducir o eliminar infecciones latentes, posteriormente se deben de aplicar productos de contacto en la etapa de "formación de frutos". Durante el "crecimiento y llenado de fruto" se repite la misma estrategia, condicionada por la incidencia de la enfermedad (Experiencia personal-No publicado).

Los fungicidas que contienen cobre son muy eficaces en el control de la roya del café, el cobre tiene un "efecto tónico" en las plantas de café, es decir, que aumenta los rendimientos independientes de su efecto en el control de la roya. Una desventaja del uso de fungicidas que contienen cobre es que estos deben estar presentes en las hojas antes de que la infección se produzca (APS, 2015). Los productos a base de cobre tienen propiedades protectoras en contra de las agresiones de los patógenos por sus efectos sobre la germinación (Avelino *et al.*, 2013), principalmente el oxiclورو de cobre entre otros, estos previenen el establecimiento de esporas y micelios de los organismos patógenos en la superficie de las hojas y de los tallos. Aplicados en aspersion sirven como un depósito de partículas metálicas que liberan iones cobre, tóxicos para las esporas y micelios de hongos cuando existan condiciones para el desarrollo de la enfermedad (SENASICA, 2013).

El sulfato de cobre es un fungicida y bactericida protectante formulado en micro gránulos dispersables en agua. Posee 26% de cobre metálico (122 gr de i.a. / Kg) y es mezclado con 30% de Mancozeb (300 gr de i.a. / Kg) a esta mezcla se le conoce comúnmente con el nombre de Caldo Bordoles. Con el Caldo

Bordeles se han hecho investigaciones para la protección contra la roya del café sin encontrar resultados favorables al tener valores sin diferencia estadística significativa con el testigo sin aplicación alguna (Campos *et al.* 2013). En el caso de la utilización de los cobres, los controles de la roya deben realizarse de tal manera que no se permita al patógeno superar un índice del 10% de infección, para aprovechar que los cobres (preventivos) puedan dar efectos positivos. Se sugiere tres aspersiones con una frecuencia de 30 días entre una y otra. Cuando los índices de infección sobrepasen el 20% se sugiere la aplicación de fungicidas sistémicos, (curativos) (ANACAFÉ, 2015).

Se ha comprobado la eficiencia de los triazoles dentro de los cuales se tienen diferentes materias activas como el triadimefon en aplicación foliar, a una dosis de 250 g de ingrediente activo por hectárea, el propiconazole en aplicación foliar, a una dosis de 178.5 g de ingrediente activo por hectárea, el triadimenol en aplicación al suelo a una dosis de 0.15 a 0.25 g de ingrediente activo por planta, el hexaconazole en aplicación foliar a una dosis de 25 a 50 g de ingrediente activo por hectárea, el cyproconazole en aplicación foliar a una dosis de 20 a 25 g de ingrediente activo por hectárea. Se determinó que una sola aplicación de estos productos no era suficiente en general para controlar la enfermedad, con la excepción del triadimenol. Estos productos tienen un buen efecto protector y curativo mientras las lesiones no esporulen. Cuando las lesiones esporulan, su eficacia es reducida (Avelino *et al.*, 2013). Bajo las

condiciones del experimento, se encontró que el mejor control de la Roya lo ejerció el fungicida sistémico ®Alto 100 (Cyproconazol) (Campos *et al.* 2013).

Existen otras las moléculas disponibles, el azoxystrobin y el pyraclostrobin han demostrado su eficacia contra la roya anaranjada (Avelino *et al.*, 2013). Se han encontrado buenos resultados con las estrobilurinas, las cuales presentan efecto sobre la germinación, penetración y esporulación del patógeno (AREA, 2013). El pyraclostrobin ha sido recomendado en dosis de 150 g de ingrediente activo por hectárea. El azoxystrobin y el cyproconazole pueden usarse en mezcla, con dosis de 150 g y 60 g de ingrediente activo por hectárea respectivamente. (Avelino *et al.*, 2013).

Es difícil pretender que una medida de control de estos patógenos sea de comportamiento universal, debido a la compleja variabilidad de condiciones que la favorecen en los diferentes países donde se presenta. La frecuencia del control puede adaptarse según los resultados de monitoreo. Existen diversos métodos, todos empíricos, que consisten en muestrear cierto número de hojas, y en contar las que están enfermas para deducir la incidencia. La recomendación general es que cuando la incidencia está comprendida entre 5 y 10%, el control puede hacerse con fungicidas protectores. Arriba de 10%, el uso de curativos es indispensable. Cuando la incidencia pasa de 30%, sin embargo, el control podría ser muy complicado aún con curativos (Avelino *et al.*, 2013). Los fungicidas no ayudan a luchar contra la enfermedad una vez que la planta ha sido atacada, y por lo tanto debe ser aplicado de manera consistente y con frecuencia, antes del estallido (Kaiser, 2013).

Control biológico

Al menos existen ocho hongos patógenos que son conocidos a través de evaluaciones de laboratorio para atacar el agente causal de la enfermedad de la roya del café (Perfecto, 2014). A continuación se presentan algunos.

Bacillus subtilis es una bacteria Gram positiva que hace una simbiosis con la planta alimentándose del hongo, usualmente se utiliza para el control de la mosca blanca y *Pythium* en tomate. En un ensayo realizado por Journal Biopesticides esta bacteria ha funcionado en el control de *H. vastatrix* teniendo un índice de esporulación de 19.78% (Daivasikamani y Rajanaika 2009). Según estudios realizados por Bettiol *et al* (1994) y Bettiol y Várzea (1992) *B. subtilis* tiene de 60-100% de protección de follaje al aplicarse en las hojas 24-72 horas previo a la inoculación con *H. vastatrix* (Citado por Guerra *et al.*, 2013). En resultados obtenidos en ensayo de campo *Bacillus subtilis* resulto ser un tratamiento que mostro un mejor desempeño en el tiempo superando al testigo que era sulfato de cobre (Guerra *et al.*, 2013).

Lecanicillium lecanii, puede desempeñar un papel en el control biológico de la roya del café (Jackson *et al.*, 2012), ya que es conocido por colonizar *H. vastatrix* en condiciones de laboratorio, y puede ser uno de los principales agentes de control biológico de *H. vastatrix*, ya que *L. lecanii*, se encuentra comúnmente en las plantaciones de café (Imagen 17) (Perfecto, 2014). Sin embargo, las pruebas de preparaciones del hiperparásito en el campo han demostrado resultados antagónicos y conflictivos. Posiblemente se ha debido a

una formulación inadecuada y el uso de la metodología usual de aspersión empleada con los fungicidas químicos (Rolz *et al.*, 2013).



Imagen 17: La roya del café atacado por el hongo de halo blanco *Lecanicillium lecani* (Perfecto, 2014).

Otro de los posibles agentes de control biológico es *Trichoderma* el cual aprisiona los filamentos o la estructura del hongo patógeno, excreta enzimas y posiblemente antibióticos, con el objeto de crear orificios de entrada en la pared celular del hongo que sufre el ataque, y finalmente penetra y/o extrae nutrientes. El resultado de esta acción es prácticamente el fin del hongo patógeno. Sin embargo en estudios de laboratorio se encontró que el *T. harzianum* creció paralelo a la *H. vastatrix* sin causar ningún efecto directo en ella, sin embargo, en condiciones campo estos 2 hongos podrían competir por nutrientes (Rolz *et al.*, 2013).

Algunas investigaciones sugieren que *Verticilium hemileiae* tiene un efecto positivo en el control de *H. vastatrix*. La aplicación de *V. hemileiae* en plantas cafeto en vivero infectadas previamente con *H. vastatrix* mostró que el mayor nivel de infestación, cantidad de pústulas de roya por hoja y defoliación se

observó en el tratamiento testigo, el cual se inoculó con *H. vastatrix* sin *V. hemileiae*. Por lo cual se llegó a la conclusión que el hongo *Verticillium hemileiae* Bouriquet es un parásito de la roya del café (Díaz *et al.*, 2014).

En algunos experimentos realizados se encontró que los hongos filamentosos *Aphanocladium meliolariae* y *Paecilomyces lilacinus*, redujeron el grado de infección de *H. vastatrix* en un 16-23% en comparación con el control (Imagen 18, 19) (Arriola *et al.*, 1998).

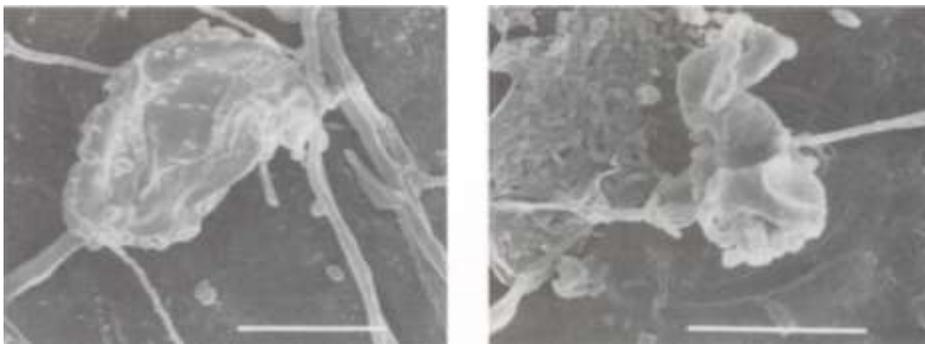


Imagen 18: El "abrazo mortal" de *A. meliolariae* al uredocuerpo de *H. vastatrix* localizado en la estoma de una hoja de café. a) El uredocuerpo ha colapsado, se observan todavía uredosporas en la superficie. Las hifas del hiperparasito se muestran vigorosas y parecen introducirse en el uredocuerpo. b) El colapso del uredocuerpo es completo, a la izquierda se observan abundantes esporas del hiperparasito, e hifas ramificadas que llegan hasta el uredocuerpo. Escala de la barra=20µm (Arriola *et al.*, 1998).

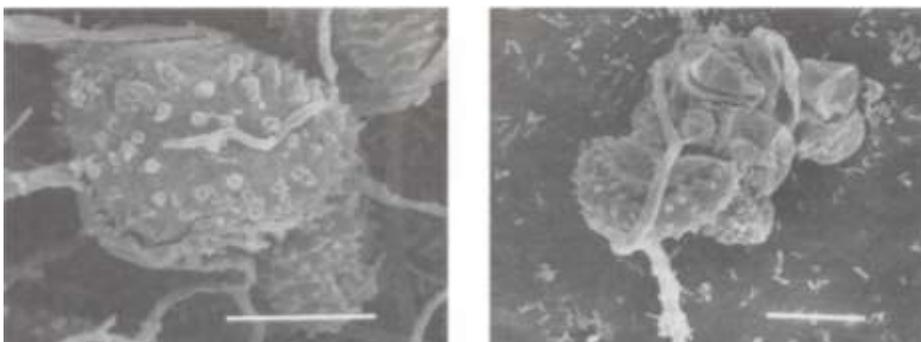


Imagen 19. El "abrazo mortal" de *V. leptobactrum* al uredocuerpo de *H. vastatrix* localizado en la estoma de una hoja de café. a) Se muestra el inicio del colapso del uredocuerpo, el cual contiene en su superficie apreciables uredosporas. Las hifas del hiperparasito se acomodan en varios puntos de la superficie del uredocuerpo, al parecer, penetrándolo. b. El colapso del uredocuerpo es completo. Escala de la barra=20µm (Arriola *et al.*, 1998).

Los agentes de control biológico son un prospecto prometedor para el control de *H. vastatrix*, pero para que el parásito realice el control que se desea deben de facilitarse las condiciones naturales de su acción. Los ensayos demuestran que para que haya un parasitismo son necesarias, además de condiciones atmosféricas y del ecosistema del cafetal, dos condiciones que son: a) que se mantenga permanentemente en el suelo de las plantaciones una densidad elevada del hiperparásito y b) que estén presente los vectores (principalmente insectos). Que transportan al hongo del suelo a las hojas infectadas (Rolz *et al.*, 2013).

Control cultural

La realización de ciertas prácticas agronómicas, como: uso de distancias de siembra apropiadas, poda de cafetos, selección de número de hijos por planta, manejo de la sombra, fertilización adecuada y control de malezas; tienen un efecto directo sobre la capacidad productiva de la plantación, pero además y de forma indirecta si se realizan bien, limitan el progreso de la roya así como de otras enfermedades de los cafetos (Barquero, 2013). En una buena finca cafetalera la primera poda o sea la poda principal, se puede dar al principio de la temporada húmeda, con ligeras podas posteriores de acuerdo con la intensidad de la lluvia y tomando en consideración los nublados imperantes (Guanché, 2013).

Control legal

Con base en la NIMF n° 8 de la convención internacional de protección fitosanitaria, en el cual se establecen las características para la determinación de la situación de una plaga en un área, *H. vastatrix* se considera presente en el territorio nacional y sujeta a control oficial (CIPF, 2006).

Con la finalidad de evitar pérdidas en la calidad y cantidad de producción de café en los ciclos posteriores, a partir de 2013 operará la “Campaña preventiva contra la roya del cafeto”, como parte de un programa integral para el control de la enfermedad en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz, donde se realizarán acciones de muestreo, capacitación a técnicos y productores, divulgación, control cultural y control químico. Así como en los demás estados productores donde el personal técnico de la campaña contra broca del café realizará acciones encaminadas al cumplimiento del objetivo de la estrategia contra la roya del cafeto (SENASICA, 2013).

Control genético

Muchos programas de mejoramiento de café en el mundo tienen como objetivo el desarrollo de materiales resistentes a la roya anaranjada. Uno de los materiales de café más utilizados en estos programas es el Híbrido de Timor, una colección de plantas resultado de un cruce natural entre *C. arabica* y *C. canephora*, en la isla portuguesa de Timor (Cristancho *et al*, 2007).

Los genes involucrados en la respuesta de las plantas a los bioagresores pueden dividirse en dos grandes grupos: los genes de resistencia o genes R que codifican para proteínas involucradas en los procesos de reconocimiento temprano del patógeno; y los genes llamados de defensa (genes D), que generalmente codifican para proteínas involucradas en diferentes mecanismos cuyo objetivo es desencadenar una respuesta de defensa específica una vez el patógeno ha sido reconocido por el huésped (Romero, 2013).

La selección fenotípica por resistencia a roya en café presenta varios factores limitantes. En principio, es un proceso complejo que requiere de tiempo y costosas evaluaciones de campo. Adicionalmente las evaluaciones de la resistencia dependen en buena medida de las condiciones ambientales (especialmente temperatura y precipitación), ya que son éstas las que determinan la dinámica de epidemias. Otros aspectos como el estado fisiológico de la planta y la falta de información sobre las razas de roya prevalentes en las diferentes regiones del país, hacen difícil la adecuada y objetiva evaluación de los materiales (Romero, 2013). A pesar de la compleja interacción que existe entre *Coffea spp.* Y *Hemileia vastatrix* se ha demostrado la existencia de 4 genes de resistencia en *C. arabica* identificados como SH2, SH2, SH4 y SH5, presentes en especies de café semi-silvestres de Etiopía y en variedades comerciales. En la India se ha detectado el gen SH3 en derivados del cruzamiento de *C. arabica* x *C. liberica* y el SH6, proveniente del híbrido de Timor, población en la cual se sugiere la existencia de tres genes adicionales denominados SH7, SH8 Y SH9 (Cuadro 1) (Alvarado *et al*, 2005). Sin embargo

se con base en observaciones se hace evidente la existencia de razas de *H. vastatrix* capaces de vencer los genes SH1, SH2, SH4 y SH5 solos o hasta en combinación de 4 genes (Alvarado *et al*, 2005).

Cuadro 1: Genotipos diferenciales de café y su correspondiente designación en grupos fisiológicos según el tipo de genes de resistencia que portan (Romero, 2013).

Genotipos diferenciales	Genes hospederos	Grupo fisiológico
Bourbon	SH5	E
832/1-HdeT	SH6,?	A
128/2-Dila & Alghe	SH 1	α
HW 17/12, HW 19	SH 1,2,4,5	O
H147/1	SH 2,3,4,5	T
1343/269- HdeT	SH6	R
134/4- S, 12 Kaffa	SH 1,4	I
87/1- Geisha	SH 1,5	C
H 152/3	SH 2,4,5	Y
32/1-DK 1/6	SH 2,5	D
33/1-S.288-23	SH 3,5	G
110/5-S.4 Agaro	SH 4,5	J
S.795	SH 2,3,5	H
1006/10-KP 532	SH 1,2,5	L
H 153/2	SH 1,3,5	Z
635/3-S. 12Kaffa	SH 1,4,5	W
644/18-H. Kawisari	SH ?	M
H 151/1	SH 3,4,5	X
H 419/20	SH 5,6,9	3
H 420/10	SH 5,6,7,9	1

Como lo mencionan algunos autores la resistencia de las plantas de café puede ser vencido por el patógeno en evolución (Magalhães, 2010). Es admitido que *Hemileia vastatrix* tiene las características de una especie con gran potencial evolutivo y tiene alta capacidad de mutación y se sabe que es capaz de dispersarse a largas distancias y tiene capacidad de reproducción sexual y multiplicación asexual (Avelino *et al.*, 2013), los estudios de desarrollo con el objetivo de entender mejor la patogenicidad de este hongo dañino y su interacción con el huésped son cruciales, con el fin de mejorar los programas de mejoramiento que conduzcan a una agricultura más sostenible (Magalhães, 2010).

MATERIALES Y METODOS

Descripción del área de estudio

Localización

El municipio de Xicotepec de Juárez, se localiza en la parte Noroeste del estado de Puebla (Figura 15). Sus coordenadas geográficas son los paralelos 20° 14' 18" y 20° 26' 12" de latitud norte y los meridianos 97° 45' 00" y 98° 03' 06" de longitud occidental. Sus colindancias son al Norte con Jalpan, al Sur con Juan Galindo y Zihuateutla, al Oeste con Zihuateutla y al Poniente con Tlacuilotepec (Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, 2015).

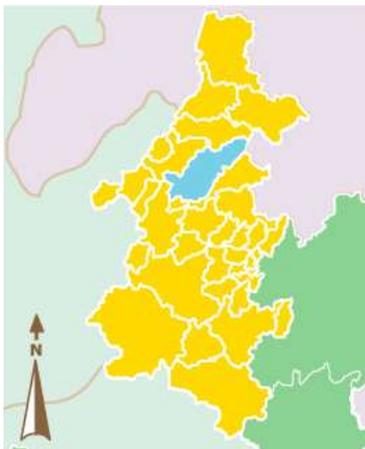


Figura 15: Ubicación de Xicotepec de Juárez, Puebla (Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, 2015).

El experimento se estableció en la localidad llamada “finca Puebla”, Santa Rita, Xicotepec de Juárez, Puebla (Imagen 20), en donde el clima predominante es semi-cálido subhúmedo, presenta una temperatura media anual de 18°C. ubicado a una altitud 534 m.s.n.m. y una ubicación geográfica a: Longitud (dec): -97.814167; Latitud (dec): 20.363056 (Google maps, 2015).



Imagen 20: Ubicación de la “Finca Puebla” (Google maps, 2015).

Clima

En el municipio presenta la transición de los climas templados de la sierra norte, a los cálidos del declive del Golfo; se identifican dos climas: clima semicálido subhúmedo con lluvias todo el año; temperatura media anual mayor de 18°C; temperatura del mes más frío entre -3° y 18°C; precipitación del mes más seco mayor de 40 milímetros; la lluvia invernal con respecto a la anual es menor en un 18 por ciento. Es el clima predominante, se identifica en la porción central y meridional (Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, 2015).

Clima cálido-húmedo con lluvias todo el año; temperatura media anual mayor de 22°C; temperatura del mes más frío mayor de 18°C; la lluvia invernal con respecto a la anual es menor de 18 por ciento; la precipitación del mes más seco es mayor de 60 milímetros. Se identifica en la porción septentrional del municipio (Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, 2015).

Manejo agronómico

El ensayo experimental está en café de la variedad Catauí (susceptible a la roya), a una densidad de 2850 plantas / ha (2 m x 1.75m) con árboles de sombra de diversas especies endémicas de la región. Las actividades de manejo que se realizaron en los ensayos experimentales durante los periodos de evaluación que comprendió de mayo a octubre de 2014 fue la aplicación de los diferentes tratamientos, realización de poda del café y las actividades que normalmente se le realizan al cultivo.

Establecimiento de los ensayos experimentales

El experimento se estableció el día 23 de mayo de 2014. Posterior a esa fecha se realizó una evaluación previa el día 30 de mayo de 2014 y posteriormente se realizó una evaluación el 30 de junio y exactamente cada mes se realizó una evaluación hasta concluir el día 30 de octubre del mismo año.

Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar (DBCA), constituido por 18 tratamientos y 3 bloques.

Realización del croquis del experimento

El croquis del experimento consistió en un diseño de bloques completos al azar con 3 bloques y 18 tratamientos (Figura 16). La unidad experimental estuvo conformada de 9 plantas (3x3), lo cual resultó una superficie de 26.25 m². El

área total fue de 78.75 m² por tratamiento y una superficie total del experimento de 1417.5 m².

U18	U17	U16	U15	U14	U13	U12	U11	U10	U9	U8	U7	U6	U5	U4	U3	U2	U1	
T6	U17	T15	T14	T5	T8	T11	U17	T3	T13	T10	T9	T1	U18	U16	T7	T12	T2	B1
U14	T9	T8	T13	U16	U17	T1	T3	T2	U18	T7	T14	T10	T11	T12	T15	T6	T5	B2
T5	T1	T15	U14	T8	T10	U16	T7	U17	T3	T14	T2	T6	T9	U18	T11	T12	T13	B3

Figura 16: Croquis del experimento

Establecimiento del ensayo experimental y la parcela útil

Estas actividades durante el periodo de evaluación 2014 fueron realizadas en la en la última semana de mayo, lo cual consistió en realizar una división de las unidades experimentales y proceder al etiquetado de cada una de ellas, delimitando las 9 plantas que conformarían a dicha unidad la cual consistió en tres surcos con tres plantas por surco. Dentro de cada ensayo se estableció una parcela útil compuesta de una planta, la cual era la que se encontraba en el centro de las 9 plantas. Y se realizó una poda el día 19 de septiembre de 2015.

Descripción del experimento

Los tratamientos en estudio consistieron en la aplicación de 18 tratamientos (Cuadro 2), utilizando la plantación de café variedad Catauí, para el control de

Hemileia vastatrix, bajo condiciones de campo en la “Finca Puebla”, Xicotepec de Juárez, Puebla. Se realizaron aplicaciones de fungicidas en cada una de las unidades experimentales cada mes durante un periodo de 5 meses, se utilizó equipo de aplicación de mochila motorizada de la marca Honda, realizando previa calibración del equipo de aplicación antes de cada aplicación.

Cuadro 2: Tratamientos utilizados en el ensayo experimental

Clave	Ingrediente activo	Comercial	Dosis
T1	Pyraclostrobin	HeadLine	500mL
T2	Cyproconazol	Alto	500mL
T3	Trifloxytrobin + Tebuconazol	Consist Max	500mL
T4	Testigo absoluto		
T5	Sulfato de cobre pentahidratado		2200gr
T6	(Tiametoxan+Cyproconazol) (Azoxystrobin+ Cyproconazol)	+ Verdadero + Priori Xtra	1000gr 600mL
T7	Pyraclostrobin + <i>Bacillus subtilis</i>	HeadLine Probac BS	+ 500 + 6000mL
T8	Pyraclostrobin + Reguladores de crecimiento	de HeadLine Biozyme	+ 500 + 2000mL
T9	Cyproconazol + Reguladores de crecimiento	de Alto Biozyme	+ 500 + 2000mL
T10	Propiconazol + Reguladores de	Tilt	+ 750 + 2000mL

	crecimiento	Biozyme	
T11	Azoxystrobin	Amistar	500 gr
T12	Propiconazol	Tilt	600mL
T13	Azoxystrobin + Cyproconazol	Priori Xtra	600mL
T14	Clorotalonil	Bravo 720	3000mL
T15	Ac. Fosoforico + Potasio	Nutriphyte	3000mL
T16	Fluaxystrobin	Vigold	500mL
T17	Metil Tiofanato	Metil	1000mL
		tiofanato	
T18	<i>Bacillus subtilis</i> + Clorotalonil	Bravo 720 + Probac BS	6000+3000mL

Características de los ingredientes activos

Dentro de las características generales de los ingredientes activos que forman cada de los fungicidas utilizados en el ensayo experimental son:

Azoxystrobin: Pertenece al grupo C3 del FRAC code list 2014, del sub-grupo químico, methoxy-acrylates, cuyo modo de acción es inhibir la respiración, más específicamente, inhibiendo el complejo III, en el citocromo bc1 (Ubiquinol oxidasa) y en el sitio Qo (Cyt b gene) (FRAC, 2014).

***Bacillus subtilis*:** Pertenece al grupo F del FRAC code list 2014, del sub-grupo químico, *Bacillus* sp. And the fungicidal lipopeptides produced, que son disruptores microbianos de patógenos de las membranas celulares (FRAC, 2014).

Clorotalonil: Pertenece al grupo M del FRAC code list 2014, del grupo de los multisitios de acción, del sub-grupo M5 de los cloronitrilos (FRAC, 2014).

Cyproconazol: Pertenece al grupo G1 del FRAC code list 2014, del sub-grupo químico, triazoles, cuyo modo de acción es actuando en la biosíntesis del esterol en la membrana, más específicamente, en el C14 en la des-metilación de la biosíntesis del esterol (erg11/cyp51) (FRAC, 2014).

Fluaxystrobin: Pertenece al grupo C3 del FRAC code list 2014, del sub-grupo químico, dihydro-dioxazines, cuyo modo de acción es inhibir la respiración, más específicamente, inhibiendo el complejo III, en el citocromo bc1 (Ubiquinol oxidasa) y en el sitio Qo (Cyt b gene) (FRAC, 2014).

Fosfito de potasio: Pertenece al grupo NC del FRAC code list 2014, del grupo de los no clasificados (FRAC, 2014).

Metil tiofanato: Pertenece al grupo B1 del FRAC code list 2014, del sub-grupo químico, tiofanatos, cuyo modo de acción es durante la división celular en la mitosis, más específicamente, en la formación de la β -tubulina durante la mitosis, (FRAC, 2014).

Propiconazol: Pertenece al grupo G1 del FRAC code list 2014, del sub-grupo químico, triazoles, cuyo modo de acción es actuando en la biosíntesis del esterol en la membrana, más específicamente, en el C14 en la des-metilación de la biosíntesis del esterol (erg11/cyp51) (FRAC, 2014).

Pyraclostrobin: Pertenece al grupo C3 del FRAC code list 2014, del sub-grupo químico, methoxy-carbamates, cuyo modo de acción es inhibir la respiración,

más específicamente, inhibiendo el complejo III, en el citocromo bc1 (Ubiquinol oxidasa) y en el sitio Qo (Cyt b gene) (FRAC, 2014).

Sulfato penta-hidratado de cobre: Pertenece al grupo M del FRAC code list 2014, del grupo de los multisitios de acción, del sub-grupo M1/2 de los inorgánicos (FRAC, 2014).

Tebuconazol: Pertenece al grupo G1 del FRAC code list 2014, del sub-grupo químico, triazoles, cuyo modo de acción es actuando en la biosíntesis del esterol en la membrana, más específicamente, en el C14 en la des-metilación de la biosíntesis del esterol (erg11/cyp51) (FRAC, 2014).

Tryfloxistrobin: Pertenece al grupo C3 del FRAC code list 2014, del sub-grupo químico, oximino-acetatos, cuyo modo de acción es inhibir la respiración, más específicamente, inhibiendo el complejo III, en el citocromo bc1 (Ubiquinol oxidasa) y en el sitio Qo (Cyt b gene) (FRAC, 2014).

METODOLOGIA

Evaluación de *Hemileia vastatrix*

La epidemia fue evaluada en cada una de los 18 tratamientos en los tres bloques establecidos, con una evaluación mensual, durante 6 meses considerando la evaluación de diagnóstico, la evaluación se realizó según la escala establecida por SENASICA en 2013 (Cuadro 3, Imagen 21).

Cuadro 3: Nivel de daño ocasionado por *Hemileia vastatrix* (SENASICA, 2013)

Clase	Hoja (%Daño)
0	Sano sin síntomas visibles
1	1-5% de área afectada
2	6-20% de área afectada
3	21-50% de área afectada
4	Más de 50% de área afectada

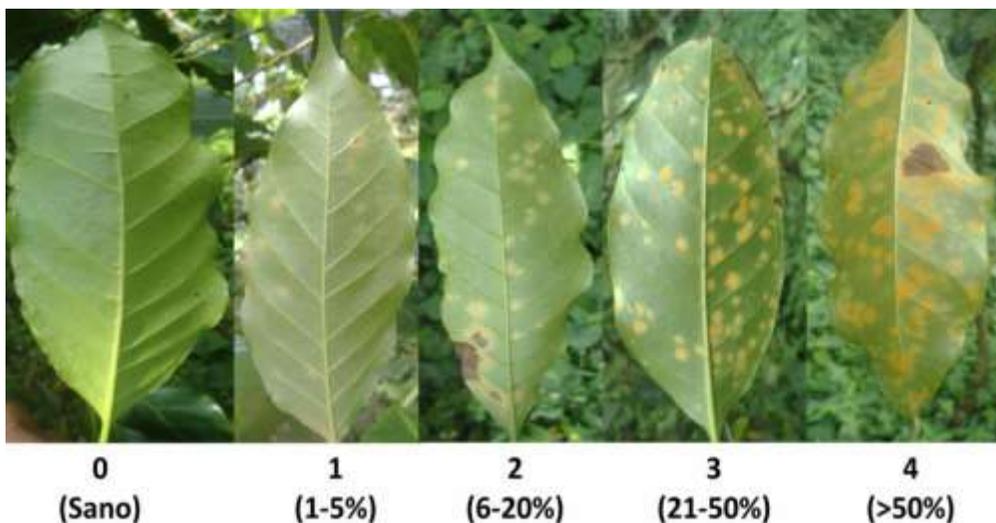


Imagen 21: Escala de severidad de la roya del café en la hoja (SENASICA, 2013).

Análisis de datos de severidad de la roya del café

Una vez que se determinó el nivel de infección por unidad experimental, a los datos generados se les aplicó la fórmula de Townsend y Heuberger para determinar la media ponderada de la severidad:

$$\% I = \sum \frac{n * V}{CM * N} * 100$$

Dónde:

I= media ponderada de severidad

n= número de plantas por cada clase en la escala

v= valor numérico de cada clase

CM= categoría mayor

N= número total de plantas en la muestra

A partir de estos datos del porcentaje de severidad se calcularon los porcentajes de efectividad biológica (E) con la ayuda de la fórmula de Abbott (1925).

$$\%E = [IT - It / IT] * 100$$

E = Porcentaje de eficacia o control.

IT = Infección en el testigo

It = Infección en el tratamiento

Análisis estadístico de los datos

Una vez obtenidos los datos se procedió al análisis de estos con la ayuda del programa de computación SAS (Statistical Analysis System), en donde se realizaron análisis de varianza ($\alpha = 0.05$), y a la par se realizó la comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). Todo esto con el fin de poder identificar si estadísticamente existe algún tratamiento sobresaliente con respecto a las demás. Los análisis de varianza practicados se ejecutaron siguiendo el modelo estadístico correspondiente al diseño de Bloques completos al azar.

RESULTADOS Y DISCUSION

Evaluación previa

Una vez que se realizó el diseño del experimento y se establecieron y delimitaron las áreas en donde se llevaría a cabo el ensayo, se procedió a realizar una evaluación previa el día 30 de mayo para cerciorarse que el porcentaje de severidad fuera similar en cada una de las áreas que conformaría cada una de las unidades experimentales. En esta evaluación previa, se encontró que efectivamente la presencia de la roya en cada una de las plantas era nula.

Primera evaluación

En esta primera evaluación realizada el día 30 de junio de 2014, en el cual al considerar cada uno de los valores del porcentaje de severidad en la comparación de medias (Tukey $\alpha = 0.05$) de cada uno de los tratamientos (Cuadro 4) estos indicaron que existe una diferencia numérica y estadística en el porcentaje de severidad para cada uno de estos.

En lo que respecta al porcentaje de eficacia (Cuadro 4) se apreció que estadísticamente los tratamientos que presentaron un mejor control fueron los que tienen como ingrediente activo estrobilurinas y triazoles, por el contrario se observó que el tratamiento a base de cobre y a base de fosfitos (®Nutri phyte), fueron los que presentaron un mayor porcentaje de severidad y por lo consiguiente una menor eficacia, esto concuerda con lo mencionado por

Avelino *et al.* en 2013 y por la APS en 2015. En esta comparación múltiple de media igualmente podemos apreciar muy claramente las diferencias estadísticas que existen entre el testigo absoluto y los tratamientos que se encuentra a partir del grupo BCDE de medias, ya que estos presentan una eficacia mayor al 50%.

Se observó que el Cyproconazol (Alto) fue el tratamiento que presento la menor incidencia teniendo una eficacia del 99.33% (Cuadro 4), el cual es un excelente control, y en este caso este comportamiento es similar al observado por Campos *et al.* en el 2013.

Cuadro 4: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la primera evaluación.

Tratamiento	% Severidad	Tukey ($\alpha = 0.05$)	% EB Abbot
Testigo absoluto	11.667	A	0.00
Nutri Phyte	8.333	AB	28.33
Sulfato de cobre	7.500	ABC	35.00
Prontius 500	6.667	ABCD	41.67
Probac BS + Bravo 720	6.667	ABCD	41.67
Bravo 720	5.000	BCDE	56.67
Consist Max	5.000	BCDE	56.67
Tilt + Byozime	4.167	BCDE	65.00
Head Line + Probac Bs	3.333	BCDE	68.33
Head Line + Byozime	3.333	BCDE	70.00

Amistar	2.500	DEC	76.67
Alto + Byozime	2.500	DEC	78.33
Tilt	2.500	DEC	78.33
Verdadero + Priori Xtra	1.667	DE	85.00
Vigold	1.667	DE	85.00
Priori Xtra	1.667	DE	86.67
Head line	0.833	E	91.67
Alto	0.833	E	99.33

Segunda evaluación

En la segunda evaluación (30 de julio de 2014), comparando los valores del porcentaje de severidad de cada uno de los tratamientos (Cuadro 5) se observó que el ®Prontius logro incrementar ligeramente su eficacia, a diferencia del ®Nutri phyte el cual disminuyo. En esta segunda evaluación se pudo apreciar que tal como lo mencionan Avelino *et al.* en 2013 la mezcla estrobirulinas con triazoles son una buena alternativa para controlar la roya del café, en este caso la mezcla de estos ingredientes activos está representado por el ®Consist Max (trifloxystrobin + tebuconazol) el cual presento una eficacia del 100% al igual que ®Amistar y ®Head Line + ®Probac BS en donde ambos tratamientos contienen estrobilurinas como ingrediente activo.

Cuadro 5: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la segunda evaluación

Tratamiento	% Severidad	Tukey ($\alpha = 0.05$)	% EB Abbot
Testigo absoluto	10	A	0
Nutri Phyte	7.5	AB	21.67
Sulfato de cobre	5.833	ABC	39.44
Prontius 500	5.833	ABC	43.89
Probac BS + Bravo 720	4.167	BCD	54.44
Bravo 720	4.167	BCD	61.67
Priori Xtra	3.333	BCD	67.22
Tilt + Byozime	3.333	BCD	71.67
Tilt	2.5	BCD	73.89
Alto	1.667	DC	85
Verdadero + Priori Xtra	1.667	DC	80.56
Alto + Byozime	1.667	DC	82.22
Head line	1.667	DC	85
Head Line + Byozime	0.833	DC	91.67
Vigold	0.833	DC	91.67
Amistar	0	D	100
Head Line + Probac Bs	0	D	100
Consist Max	0	D	100

Tercera evaluación

En la tercera evaluación (30 de agosto de 2014), comparando los valores del porcentaje de severidad de cada uno de los tratamientos (Cuadro 6) se observó que los tratamientos conformados por el testigo absoluto, ®Nutri phyte, sulfato de cobre y ®Prontius, se colocaron dentro de los tratamientos que presentaron un mayor porcentaje de severidad y por lo tanto una eficacia menor al 50%. A excepción del tratamiento ®Headline + ®Probac BS, todos los tratamientos que tiene como ingrediente activo algún triazol o una estrobilurina sobresalieron del resto y coincide con lo que menciona Avelino *et al.* en el 2013, una vez más se confirmó que la mezcla de estrobilurina + triazol presenta un menor porcentaje de severidad, por lo que claramente se observó ese comportamiento, con el ®Consist max que presento una eficacia del 100% al igual que el tratamiento alto + Byozime y coincide con lo que mencionó Campos *et al.*, (2013).

Cuadro 6: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la tercera evaluación

Tratamiento	% Severidad	Tukey ($\alpha = 0.05$)	% EB Abbot
Testigo absoluto	9.167	A	0
Nutri Phyte	7.5	A	19.44
Prontius 500	6.667	AB	30.56
Sulfato de cobre	5.833	ABC	36.11
Bravo 720	5.833	ABC	36.11
Probac BS + Bravo 720	5	ABCD	44.44

Head Line + Byozime	5	ABCD	47.22
Head Line + Probac Bs	2.5	BCDE	75
Amistar	2.5	BCDE	72.22
Priori Xtra	2.5	BCDE	72.22
Tilt	2.5	BCDE	75
Tilt + Byozime	1.667	CDE	83.33
Verdadero + Priori Xtra	1.667	CDE	80.56
Vigold	0.833	DE	91.67
Alto	0.833	DE	91.67
Head line	0.833	DE	91.67
Consist Max	0	E	100
Alto + Byozime	0	E	100

Cuarta evaluación

En la cuarta evaluación (30 de septiembre de 2014) se apreció que los tratamientos conformados por el testigo absoluto, ®Nutri phyte, sulfato de cobre, ®Prontius fueron los tratamientos que mostraron una mayor severidad (2.5-5.8%), reflejada por lo consiguiente en su eficacia (0-55%) (Cuadro 7). La disminución del porcentaje de severidad de los tratamientos en comparación con las evaluaciones anteriores se puede deber a que al cultivo se le realizó una poda el día 19 septiembre, el cual logro disminuir la incidencia de la roya, ya que la intensidad del brote está determinada por la cantidad de área foliar, la penetración de luz en los estratos, la distribución de las ramas dentro de la

misma planta entre otras (Schieber, 1984 y Rivillas *et al.* 2011). El manejo agronómico juega un papel importante en la aparición y desarrollo de la enfermedad, motivo por el cual se cree que en la evaluación realizada en esta fecha se logró observar una disminución considerable de la severidad de la enfermedad, lo cual no podemos atribuirla completamente a los tratamientos, ya que al eliminar ramas se logró una mejor aireación, mejor penetración de la luz y la eliminación de algunas fuentes de inóculo.

Cuadro 7: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la cuarta evaluación

Tratamiento	% Severidad	Tukey ($\alpha = 0.05$)	% EB Abbot
Testigo absoluto	5.833	A	0
Nutri Phyte	3.333	B	44.444
Sulfato de cobre	2.5	B	55.556
Prontius 500	2.5	B	55.556
Bravo 720	1.667	BC	72.222
Amistar	0	C	100
Head Line + Probac Bs	0	C	100
Alto + Byozime	0	C	100
Alto	0	C	100
Priori Xtra	0	C	100
Probac BS + Bravo 720	0	C	100
Head line	0	C	100

Consist Max	0	C	100
Head Line + Byozime	0	C	100
Tilt	0	C	100
Tilt + Byozime	0	C	100
Verdadero + Priori Xtra	0	C	100
Vigold	0	C	100

Quinta evaluación

En la quinta evaluación (30 de octubre de 2014) al considerar cada uno de los valores del porcentaje de severidad de los tratamientos (Cuadro 8) estos indicaron que existe una diferencia numérica y estadística en el porcentaje de severidad. En un principio se observó que los tratamientos que se encuentran con una menor eficacia se comportaron de una manera similar durante las 4 evaluaciones realizadas anteriormente. En el cuadro 8 se observa que el tratamiento conformado por el sulfato de cobre fue de los que presento una mayor severidad de roya y por lo tanto una menor eficacia, contrario a lo planteado por la APS EN 2015, pero si hay una similitud con lo que reporto Campos *et al.* en 2013.

Se observó una diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes tratamientos (Cuadro 8) y así mismo se fue observando durante el periodo de evaluación que las estrobirulinas, los triazoles y la mezcla de estos fueron los que presentaron una menor severidad de *Hemileia vastatrix* y por lo consiguiente una mayor eficacia, confirmando así lo planteado por Avelino *et al*,

en 2013 y AREA en 2013. De igual forma se encuentra que el Cyproconazol (®Alto) fue el tratamiento que presento la menor incidencia teniendo una eficacia del 82.047%, el cual es un buen control, y en este caso este comportamiento es similar al observado por Campos *et al.* en 2013 (Cuadro8).

Cuadro 8: Comparación de medias del porcentaje de severidad en la quinta evaluación

Tratamiento	% Severidad	Tukey ($\alpha = 0.05$)	% EB Abbot
Testigo absoluto	6.3889	A	0
Nutri Phyte	4.5833	AB	26.17
Prontius 500	4.3056	ABC	32.281
Sulfato de cobre	3.75	BCD	40.234
Bravo 720	3.75	BCD	40.234
Head Line + Byozime	3.0556	BCDE	51.433
Probac BS + Bravo 720	2.7778	BCDE	56.433
Tilt + Byozime	2.6389	BCDE	58.275
Alto + Byozime	2.6389	BCDE	58.743
Amistar	2.5	BCDE	58.918
Head Line + Probac Bs	2.3611	BCDE	61.14
Verdadero + Priori Xtra	2.2222	BCDE	67.544
Head line	1.9444	CDE	69.474
Vigold	1.9444	CDE	71.52
Consist Max	1.5278	ED	73.333

Tilt	1.5278	ED	74.269
Priori Xtra	1.1111	E	80
Alto	1.1111	E	82.047

Comportamiento de los tratamientos durante el periodo de evaluación

En los gráficos claramente se puede observar el comportamiento de todos los tratamientos durante el periodo de evaluación que comprendió del 30 de junio al 30 de octubre de 2014 (Figura 17, 18). Además se observó que después del testigo absoluto, los tratamientos que consisten en el ®Nutri phyte, ®Sulfato de cobre y ®Prontius fueron los que presentaron el mayor porcentaje de severidad, y por lo consiguiente una menor eficacia durante el periodo de evaluación. Aunque de igual forma se puede observar que el sulfato de cobre al final del periodo de evaluación presentaron una menor severidad y un ligero incremento en su eficacia en comparación de la primera evaluación, esto se puede deber a lo que mencionó ANACAFÉ en 2015. De igual manera el comportamiento del ®Nutri phyte (Fosfito de potasio) durante el periodo de evaluación se observa que al final logra demostrar un ligero incremento en la eficacia del producto, esto se puede deber a lo que menciona EDA en 2008, que el hecho de que no se haya observado un mejor comportamiento durante todo el periodo de evaluación se puede deber a la dosis aplicada y a la frecuencia con la que se realizó la aplicación, ya que se menciona que la dosis de los fosfitos como

Ácido fosforoso o fosfonatos de potasio o calcio va a depender de la concentración, pero de forma general son de 3 a 5 litros por hectárea aplicados cada 14 días en época de baja presión y 5 a 7 litros cada 7 a 14 días en épocas de alta presión (EDA, 2008).

En el grafico (Figura 17, 18) también se puede observar que tanto los triazoles como los las estrobilurinas, ya sea solas o en mezcla fueron de los tratamientos que presentaron un menor porcentaje de severidad y por lo tanto una mayor eficacia, tal como lo han demostrado ensayos realizados anteriormente por Avelino *et al.* (2013), AREA (2013) y Campos *et al.* (2013).

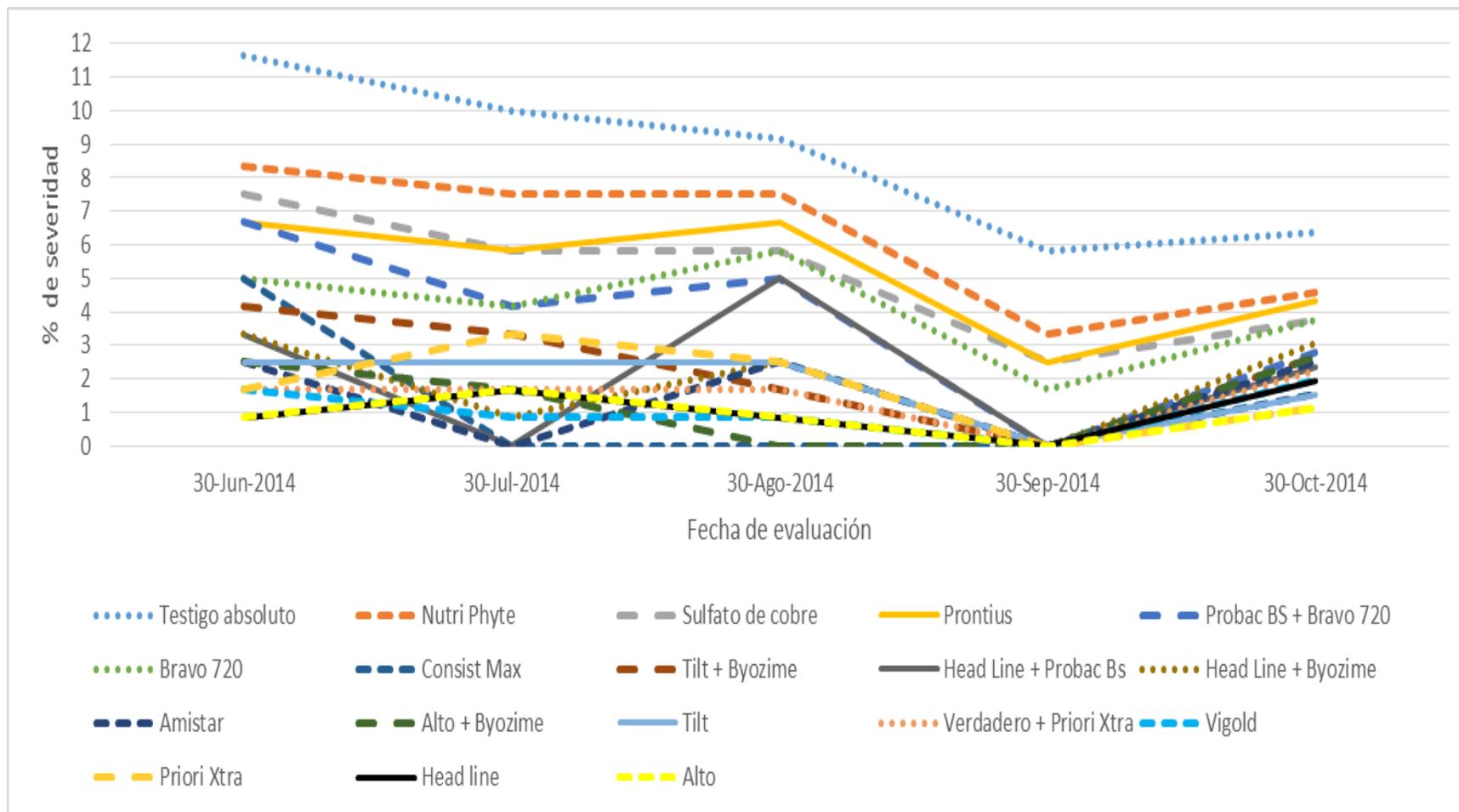


Figura 17: Porcentaje de severidad de los tratamientos durante el periodo de evaluación.

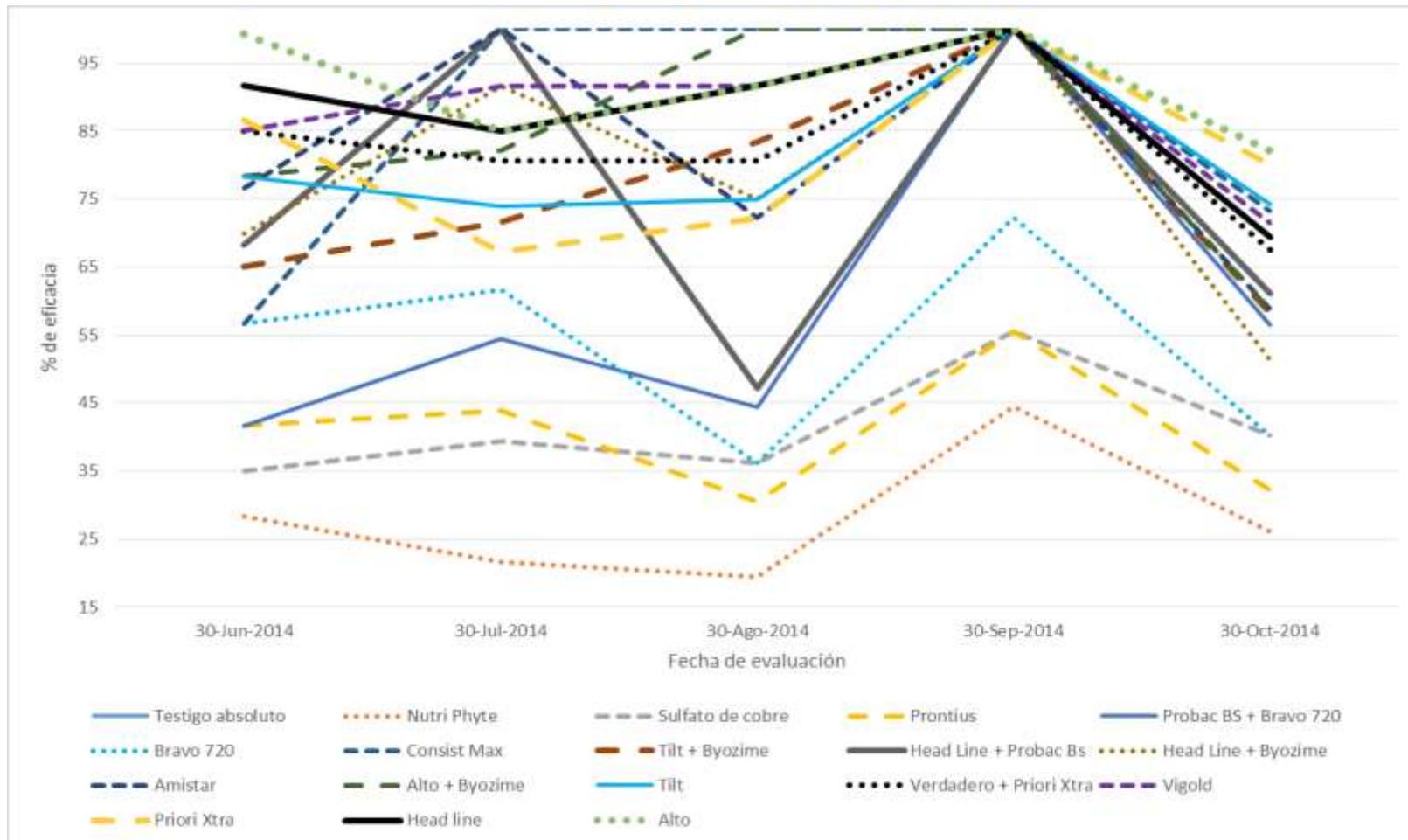


Figura 18: Porcentaje de eficacia de los tratamientos durante el periodo de evaluación.

CONCLUSIÓN

Los tratamientos compuestos por Fosfito de potasio, sulfato de cobre y tiofanato metílico, a una dosis de 3000mL, 2200gr y 1000mL respectivamente fueron los que presentaron una menor eficacia (19-55%) en el control de la roya del café (*Hemileia vastatrix*).

El alto (cyproconazol) a una dosis de 500mL presento una eficacia de 82-100% y el tilt (propiconazol) a una dosis de 600mL presento una eficacia de 73-100% durante el periodo de evaluación.

El Headline (pyraclostrobin) y amistar a dosis de 500mL y 500 gr respectivamente fueron de los tratamientos que presentaron una mayor eficacia (70-100%) en el control de la roya del café durante el periodo de evaluación.

Los tratamientos que tenían como componente estrobilurinas y triazoles (Consist Max y Priori Xtra a 500mL y 600mL respectivamente) presentaron una eficacia de 56-100% en el control de la roya.

Los tratamientos mezclados con una agente biológico y reguladores de crecimiento (Headline+Probac BS (500mL+6000mL); Headline+Biozyme (500mL+2000mL); Alto+ Biozyme (500mL+200mL)) presentaron una eficacia de 42-100%.

Los tratamientos que tenían como componentes en su ingrediente activo alguna estrobilurina o algún triazol ya sea solos o en mezcla, mostraron ser una solución para el control de la roya del café (*Hemileia vastatrix*).

La aplicación individual de un ingrediente activo en comparación con la aplicación de dos ingredientes activos formulados dentro de un mismo producto mostraron un comportamiento estadísticamente igual, bajo las condiciones en las que se desarrolló este estudio.

LITERATURA CITADA

- Abad R., G. 2014. Calendario fenológico del café. Escuela de ingeniería agropecuaria. UTPL. 7p.
- Abbot, W.S. 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. J. Econ. Entomol. 18: 265-267.
- Agencia de servicios a la comercialización y desarrollo de mercados agropecuarios (ASERCA). 2015. "Panorama agropecuario semanal del café. Consultado en línea el 10 de agosto de 2015: <http://www.infoaserca.gob.mx/panorama/semanal.asp?de=cafe>
- Agriculturers red de especialistas en agricultura (AREA). 2015. Todo sobre la roya del cafeto (*Hemileia vastratrix*) –medidas preventivas y control. Consultado 20 agosto de 2015: <http://agriculturers.com/todo-sobre-la-roya-del-cafeto-hemileia-vastratrix-medidas-preventivas-y-control/>
- Almengor C., O.G. 2015. Manejo integrado de la roya anaranjada (*Hemileia vastatrix* Berk y Br.). Folleto técnico. ANACAFÉ. CEDICAFÉ. 18p.
- Altamirano T., J. A. 2012. Influencia de la variabilidad climática sobre la producción de café (*Coffea arabica* L.) en Honduras. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Escuela de posgrado. 108p.
- Alvarado A., G.; Moreno R.; L. G. 2005. Cambio de virulencia de *Hemileia vastatrix* en progenies de caturra por híbrido de Timor: Cenicafé 56 (2): 110-126. 2005.
- Arcila P., J.; Farfán V., F.; Moreno B., A.M.; Salazar G., L.F.; Hincapié G., E. 2007. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Cenicafé. 309 p.

- Asociación nacional del café (ANACAFÉ). 2013. La Roya del Café es una enfermedad temible pero puede controlarse. Consultado 21 de agosto de 2015:https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Recomendaciones_Control_Roya
- Asociación nacional del café (ANACAFÉ). 2015. Enfermedades y su control. Consultado 21 de agosto de 2015: https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Caficultura_ControlEnfermedades
- Arcila, P. J.; Buhr, L.; Bleiholder, H.; Hack, H.; Meier, U. & Wicke, H. 2002. "Application of the extended BBCH-scale for the description of the growth stages of Coffea sp". Annals of Applied Biology 141: 19-27.
- Arriola, M. C.; Chet, I.; Rölz, C. 1998. Hongos que atacan la roya del café: un breve comentario. Universidad del valle de Guatemala (8): 2-6 pp.
- Asociación Mexicana de la Cadena Productiva del Café, A.C., (AMECAFE). 2012. Plan integral de promoción del café de México. AMECAFE. 63p.
- Avelino, J.; Rivas, G. 2013. La roya anaranjada del cafeto. CIRAD-CATIE-IICA/PROMECAFE. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>, 47 p.
- Alzate O., N. 2015. Importancia del gen SH3 y su relación con la resistencia a la enfermedad roya del cafeto *Hemileia vastatrix* bajo la modalidad de compilación bibliográfica. 88 p.
- Barquero M., M. Algunas consideraciones sobre el ojo de gallo. Revista Informativa. 13. 14 p.
- Barquero M., M. 2013. Recomendaciones para el combate de la roya del cafeto (*hemileia vastatrix* berk et br.). Instituto del café de Costa Rica. Centro de investigaciones en café (CICAFE) recomendaciones. 63p.

- Bustamante, José; Sarmiento, Avelino; Casanova, Anabel; Contreras, Eligio; Yáñez, Cecilia; Romero, Cristina; Peña, Isbelia; Verenzuela, Alex; Morales, Nelly; Garnica, José; Colmenares, Nélica. 2001. Caracterización de resistencia incompleta a *Hemileia vastatrix* en genotipos de café (*Coffea arabica* L.) Variedad Bramón I. Bioagro, vol. 13, núm. 2, 2001, pp. 65-70.
- Campos A., O. G.; J. C., Gento R.; Santos C., D.; J.N., Reyes M. y Jasinto M., R. 2013. Análisis sobre eficiencia de fungicidas contra la roya del cafeto. El Cafetalero. Cedicafé-Anacafé. Consultado 19 de agosto de 2015: <https://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=16TEC:Eficiencia-fungicidas-roya>
- Carvalho, C. R.; Fernandes, R.C., Carvalho G., M. A.; Barreto, R.W.; Evans, H.C. (2011) Cryptosexuality and the Genetic Diversity Paradox in Coffee Rust, *Hemileia vastatrix*. PLoS ONE 6(11): 7p. e26387. doi:10.1371/journal.pone.0026387
- Castro F., R.; Harry C., E.; R. W., Barreto. 2009. Confirmation of the occurrence of teliospores of *Hemileia vastatrix* in Brazil with observations on their mode of germination. Tropical Plant Pathology, vol. 34, 2, 108-113 pp.
- Centro de estudios de finanzas públicas. 2001. El mercado del café. Cámara de diputados. 35p.
- Convención internacional de protección fitosanitaria (CIPF). 2006. CIPF-Normas internacionales para medidas fitosanitarias (NIMF) N°8. Determinación de la situación de una plaga en un área. FAO, Roma. 159 p.
- Cristancho A., M.; Escobar O., C.; Ocampo, J.D. 2007. Evolución de razas de *Hemileia vastatrix* en Colombia. Cenicafé 58(4): 340-359 pp.

- Diaz V., V. M.; Pinzón R., E. P.; Pérez Q., J. N.; Cabrera A., M. E.; Magallanes C., R.; De Coss F., M. E. 2014. El hongo *Verticillium hemileiae* Bouriquet, alternativa para el control de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk et Br.). Agro productividad, Año 7, Vol. 7, Num. 3, 58-62 pp.
- Diogo N. S.; Vieira, A.; Talhinhos, P.; Azinheira, H. G.; Silva, M. C.; Fernandez, D.; Duplessis; Sébastien, Paulo, Octávio S., Batista, Dora. 2009. Phylogenetic analysis of *Hemileia vastatrix* and related taxa using a genome-scale approach. CIFC/IICT 4 p.
- Dirección general de sanidad vegetal (DGSV)-Centro nacional de referencia fitosanitaria (CNRF). 2013. Desarrollo de un prototipo de trampa para uredosporas de roya del cafeto bajo los principios de impactación, deposición y escurrimiento. LANREF. 12p.
- Dirección general de sanidad vegetal (DGSV). 2013. Manual técnico para el manejo preventivo de la roya del cafeto. DGSV. 26p.
- Dirección general de sanidad vegetal (DGSV). 2014. Situación epidemiológica de la roya del café en Chiapas, Veracruz y Puebla. 11p.
- Duran L., J. A. 2013. Epidemiología de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) durante las épocas seca y lluviosa en tres niveles altitudinales de El Salvador. 60 pp.
- Estado de Puebla. 2015. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Consultado 26 de abril de 2015: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21197a.html>

- Entrenamiento y desarrollo de agricultores (EDA). 2008. El uso del ácido salicílico y fosfonatos (fosfitos) para activación del sistema de resistencia adquirida de la planta. Boletín técnico de producción. 3p.
- European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO). 2015. Consultado 10 de agosto de 2015: <https://gd.eppo.int/taxon/HEMIVA>
- European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO). 2015. Consultado 11 de agosto de 2015: <https://gd.eppo.int/taxon/COFAR>
- Fulton, R. H. 1984. Coffee rust in the Americas. The American Phytopathological Society St. Paul, Minnesota. 120p.
- Fungicides Sorted by Mode of Action (FRAC).2014. Fungicides Resistance Action Committee FRAC Code List, Bélgica, 2014.
- González G., R.; Mora A., G.; Calderón E., M. C. 2013. Estrategia y acciones de vigilancia epidemiológica de la roya del café mediante monitores aerobiológicos. GAGARPA-SENASICA. Ppt 56 pp.
- Google maps. 2015. La ceiba. Visitado por Delesma. Disponible en: <https://www.google.com.mx/maps/place/Villa+%C3%81vila+Camacho,+Pue./@20.3863063,97.8765629,13z/data=!4m2!3m1!1s0x85d09b7e61d5bd3b:0xad2fb6bb10fdb02>
- Guanché G., J. L. 2013. Evaluación del impacto provocado por la roya del café (*Hemileia vastatrix*), en los municipios de Zacapa y Gualan, departamento de Zacapa, 2013. 76p.

- Guerra B., J. O.; Welchez A., J. A. Evaluación de la efectividad de cuatro fungicidas biológicos en el control del hongo de la roya de café *Hemileia vastatrix*. 22 p.
- Hernández, J.R. 2005. Invasive Fungi. Coffee Leaf Rust - *Hemileia vastatrix*. Systematic Mycology and Microbiology Laboratory, ARS, USDA. 7 March 2005. Invasive Fungi. Coffee Leaf Rust - *Hemileia vastatrix*. Consultado 18 agosto de 2015: <http://nt.ars-grin.gov/taxadescriptions/factsheets/index.cfm?thisapp=Hemileiavastatrix&printtype=>
- Jackson, D.; Zemenick, K.; Huerta, G. 2012. Occurrence in the soil and dispersal of *Lecanicillium lecanii*, a fungal pathogen of the green coffee scale (*Coccus viridis*) and coffee rust (*Hemileia vastatrix*). Tropical and subtropical agroecosystems, 15 (2012): 389-401 pp.
- Kaiser, M. 2013. Coffee Leaf Rust in El Salvador: then, now, and from here on. 13p.
- Magalhães V., A. C. 2010. Identification and expression analysis of genes putatively involved in pathogenicity of *Hemileia vastatrix* to *Coffea arabica*. Facultad de ciencias. Universidad de Lisboa. 72P.
- Marín C., G. 2012. Producción de cafés especiales. Manuel técnico. Lima: Equipo técnico del proyecto Fondo empleo, Programa Selva Central – desco, 2012. 50p
- Masaba D. M. 1998. Coffee Physiology and Breeding. Vol. 25. Centre for Arid Zone Studies. University of Wales. 53 P.

- Moll F. S. 2015. *Café: Producción, Consumo y Distribución Mundial*. CABI. Consultado en línea el 11 de agosto de 2015: <http://cabi.com/blackbox/?p=7359>
- Mora S., N. 2008. *Agrocadena de café*. Ministerio de agricultura y ganadería. Dirección regional Huetar Norte. 49p.
- Organización internacional del café (ICO). 2015. *Acerca del café*. Consultado en línea el 16 de agosto de 2015: http://www.ico.org/es/botanical_c.asp?section=Acerca_del_caf%E9#bot
- Organización internacional del café (ICO). 2015. *Informe del mercado del café, Marzo 2015*. International Coffee Organization 5p.
- Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA). 2013. *Guía de Campo para la Identificación de Síntomas de la Roya del Café (Hemileia vastatrix)*. Programa Regional de Apoyo al Control de la Roya del Café. Julio 2013.
- Perfecto I., J., Vandermeer, S. M., Philpott. 2014. *Complex Ecological Interactions in the Coffee Agroecosystem*. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2014. 45:137–58 First published online as a Review in Advance on September 24, 2014. 25p.
- Proyecto estratégico fomento productivo (PEFP), SAGARPA, COFUPRO, INCA RURAL, AMECAFÉ, SISTEMA PRODUCTO CAFÉ, y CRUO-UACH. 2011. *Plan de innovación de la cafeticultura en el estado de Puebla*. 108p.
- Proyecto estratégico fomento productivo (PEFP), SAGARPA, COFUPRO, INCA RURAL, AMECAFÉ, SISTEMA PRODUCTO CAFÉ, y CRUO-UACH. 2011. *Diagnóstico de la cafeticultura en el estado de Puebla*. 48p.

- Rivillas O., C.A.; Castro T., A.M. (2011). Ojo de gallo o gotera del cafeto. Boletín técnico Cenicafé 37. 25 p
- Rivillas O., C.A.; Serna G., C. A.; Cristancho A., M. A.; Gaitán B., A. L. 2011. La roya del café en Colombia. Impacto, manejo y costos del control. CENICAFÉ. 51p.
- Rolz A., C.E., De Leon F., L.R.; Paniagua, O. 2013. Evidencia de un antagonismo in vitro de especies de *Trichoderma* contra *Hemileia vastatrix* (Roya del Café). De la Universidad del Valle de Guatemala (25); 61-65.
- Romero G., G. 2013. Desarrollos de marcadores funcionales ligados a la resistencia genética contra la roya del café. Universidad nacional de Colombia. 138p.
- Schieber, E.; George A., Zentmyer. 1984. Coffee rust in the western hemisphere. The American Phytopathological Society. Plant Disease. 89-93pp.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2015. "Cierre de producción de cultivos cíclicos y perennes 2015". Consultado en línea el 10 de agosto de 2015: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>
- Servicio nacional de sanidad, inocuidad y calidad agroalimentaria (SENASICA). 2013. Roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berkeley y Broome). Dirección general de sanidad vegetal-Sistema nacional de vigilancia epidemiológica fitosanitaria. México, D.F. Ficha técnica No. 40. 27 p.

- Sistema de monitoreo de la roya del cafeto (SIMROCA). 2015. Roya del cafeto. Consultado en línea el 10 de agosto de 2015: <http://www.siafeson.com/simroca.php>
- Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria (SNAVEF). 2013. Ficha técnica de la roya del cafeto. Dirección general de sanidad vegetal. 28p.
- Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria (SNAVEF). 2015. Situación epidemiológica de la roya del cafeto y otros riesgos fitosanitarios asociados al cultivo del café en Chiapas, Veracruz, Puebla, Oaxaca y Guerrero. Enero, 2015. 15p.
- Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria (SNAVEF). 2015. Situación epidemiológica de la roya del cafeto y otros riesgos fitosanitarios asociados al cultivo del café en Chiapas, Veracruz, Puebla, Oaxaca y Guerrero. Abril, 2015. 16p.
- The American Phytopathological Society (APS). 2015. Coffee rust (*Hemileia vastatrix*). Consultado en línea el 27 de Abril de 2015: <http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/fungi/Basidiomycetes/Pages/CoffeeRust.aspx>
- The American Phytopathological Society (APS). 2015. Coffee rust (*Hemileia vastatrix*). Consultado en línea el 18 agosto de 2015: <http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/fungi/Basidiomycetes/Pages/CoffeeRust.aspx>
- Vieira, A. P.; Talhinhos; A., Loureiro; S. Duplessis. D., Fernandez; M. C., Silva; O. S., Paulo, H. G., Azinheira. 2011. Validation of RT-qPCR reference

genes for in planta expression studies in *Hemileia vastatrix*, the causal agent of coffee leaf rust. *Fungal Biology* 115 (2011). 891-901pp.

- Wintgens, N. 2009. *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. Ed. Jean Nicolas Wintgens. 2 ed. Weinheim, DE. 982 p.