





REVIEW



Diseases affecting the coffee crop: Elucidating the life cycle of Rust, Thread Blight and Cercospora Leaf Spot

Enfermedades que afectan el cultivo de café: Elucidando el ciclo de vida de Roya, Mal de Hilachas y Cercosporiosis

Anthony A. Moreira-Morrillo¹ ; Jean P. Vélez-Zambrano¹ ; Silvino Intra Moreira² ; Felipe R. Garcés-Fiallos^{1,*} 

¹ Laboratorio de Fitopatología, Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Técnica de Manabí-UTM, Campus Experimental La Teodomira, Km 14, Código postal: EC130105. Santa Ana, Manabí, Ecuador.

² Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70910-000, Brazil.

* Corresponding author: felipe.garces@utm.edu.ec (F. R. Garcés-Fiallos).

Received: 11 June 2023. Accepted: 25 July 2023. Published: 18 September 2023.

Abstract

Coffee (*Coffea* spp.) is the second most significant commodity worldwide, with *C. arabica* being its most representative species. The coffee crop is affected by different fungal diseases that reduce the photosynthetically active area of its leaves and the production of grains. In order of agronomic importance, the rust caused by the biotrophic pathogen *Hemileia vastatrix* is a disease difficult to manage due to its type of reproduction. Another no less important, Thread Blight, caused by the basidiomycetes *Ceratobasidium noxium* (Syn. *Corticium koleroga*) and *C. chavesanum*, affects all aerial tissues of plants. The third disease, Cercospora leaf spot caused by *Cercospora coffeicola*, infects both leaves and grains, making it difficult to manage. Although there is enough scientific information on Rust, very little is known about the etiology, symptomatology, life cycle, and management of Thread Blight and Cercospora leaf spot. High-resolution photographs and micrographs were used and related with available scientific information. In addition, current scientific information on each disease was compiled, and with that, the life cycles were developed. Likewise, this manuscript describes the management of the three diseases based mainly on the use of genetic, cultural, physical, biological, and chemical measures and their integration as a sustainable alternative in the coffee agroecosystem. Current and future challenges in coffee include the evaluation of cultivars, genetic diversity of *Ceratobasidium* spp. and *C. coffeicola*, plant-pathogen interactions, and agroecological management practices.

Keywords: *Coffea* spp.; *Hemileia vastatrix*; *Ceratobasidium* spp.; *Cercospora coffeicola*; Fungal phytopathogens.

Resumen

El café (*Coffea* spp.) es el segundo producto básico de mayor importancia a nivel mundial, siendo *C. arabica* su especie más representativa. El cultivo de café es afectado por diferentes enfermedades fúngicas que reducen el área fotosintéticamente activa de sus hojas y la producción de granos. Por orden de importancia se destacan la Roya causada por el patógeno biotrófico *Hemileia vastatrix* que es de difícil manejo por su tipo de reproducción. Otra no menos importante, el Mal de hilachas ocasionada por los basidiomicetos *Ceratobasidium noxium* (Sin. *Corticium koleroga*) y *C. chavesanum*, que afectan todos los tejidos aéreos de las plantas. La tercera enfermedad, la Cercosporiosis causada por *Cercospora coffeicola* infecta tanto hojas como granos lo que dificulta su manejo. Aunque hay basta información científica sobre la Roya, muy poco se conoce sobre la etología, sintomatología, ciclo de vida y manejo de Mal de hilachas y Cercosporiosis. Se utilizaron fotografías y micrografías de alta resolución y se las relacionó con la información científica disponible. Además, se recopiló información científica actualizada sobre cada enfermedad, y con eso se elaboraron los ciclos de vida. Así mismo, en este manuscrito se describe el manejo de las tres enfermedades basado principalmente en el uso de medidas genéticas, culturales, físicas, biológicas y químicas, y su integración como una alternativa sostenible en el agroecosistema de café. Entre los principales desafíos actuales y futuros en café están la evaluación de cultivares, diversidad genética de *Ceratobasidium* spp. y *C. coffeicola*, interacciones planta-patógenos, y prácticas de manejo agroecológicas.

Palabras clave: *Coffea* spp.; *Hemileia vastatrix*; *Ceratobasidium* spp.; *Cercospora coffeicola*; Fitopatógenos fúngicos.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.035>

Cite this article:

Moreira-Morrillo, A. A., Vélez-Zambrano, J. P., Intra Moreira, S., & Garcés-Fiallos, F. R. (2023). Enfermedades que afectan el cultivo de café: Elucidando el ciclo de vida de Roya, Cercosporiosis y Mal de Hilachas. *Scientia Agropecuaria*, 14(3), 395-412.

1. Introducción

El café (*Coffea* spp.) originario de la provincia etíope de Kaffa, África, es uno de los productos más comercializados a nivel mundial con creciente importancia económica en los últimos 150 años, solo por detrás del petróleo (Daglia et al., 2000; Carvalho et al., 2011; Dechassa, 2019). Aunque el género *Coffea* cuenta aproximadamente con 125 especies, solo *C. arabica* L., y *C. canephora* Pierre ex A. Froehner conocidos como café arábica y robusta, respectivamente, son las especies más representativas con aproximadamente el 99% de la producción mundial (Ogundejí et al., 2019; Pilozo et al., 2022). El café es cultivado en más de 80 países (Lu et al., 2022), considerado un cultivo de importancia económica debido a los ingresos de su producción y la cantidad de personas que dependen de ella para su sustento diario, especialmente en regiones tropicales (Harelimana et al., 2022). Los registros de producción hasta el 2019 en toneladas métricas posicionan a Brasil como el mayor productor a nivel mundial con 3.370 t, seguido de Vietnam y Colombia con 1.606 y 738 t, respectivamente (NationMaster, 2021).

En los últimos años, la producción de cerezas (granos) de café se ha visto afectada negativamente por el cambio climático y baja fertilidad de suelos (Adhikari et al., 2020; Naik et al., 2021; Wang et al., 2015), dificultando grandemente el manejo de sus enfermedades (Kumar et al., 2020). A esto se le puede sumar las malas prácticas agrícolas como el mal uso de pesticidas sintéticos, que resulta en una pérdida de sensibilidad de las moléculas usadas en el manejo de enfermedades fungosas (Kumar et al., 2020). Así, debe considerarse la importancia de las enfermedades en el cultivo de café, ya que estos factores bióticos alteran su estado normal, e interrumpen y modifican sus procesos fisiológicos, ocasionándoles daños considerables (Ventura et al., 2017; Esgario et al., 2022).

Entre las enfermedades que afectan los cafetales sea en un sistema a cielo abierto o bajo un sistema agroforestal, posiblemente las de etiología fúngica son las que más reducen la producción de granos. Entre estas enfermedades, las más importantes en Latinoamérica próximas a la línea ecuatorial, están la Roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome), Mal de hilachas (*Ceratobasidium noxium* (Donk) Roberts) y Cercosporiosis (*Cercospora coffeicola* (Cooke) J. A. Stev. & Wellman). La primera enfermedad puede reducir en hasta un 90% el rendimiento de granos en un cafetal (Sera et al., 2022; Bigirimana et al., 2012). Mal de hilachas afecta prácticamente todos los tejidos aéreos de las plantas de café, reduciendo considerablemente el rendimiento del cultivo

(Belachew et al., 2015). Poco o nada se conoce sobre la interacción entre cafetos y Mal de hilachas. Finalmente, la Cercosporiosis infecta el área foliar y los granos de plantas de café, reduciendo en hasta un 50% el rendimiento de granos (Fernández-Borrero et al., 1982).

Considerando la importancia del cultivo de café y sus enfermedades fúngicas como Roya, Mal de hilachas y Cercosporiosis, en esta revisión literaria se consideró describir a) la sintomatología y etiología de las tres enfermedades, usando para esto figuras y micrografías propias con alta resolución tomadas en campo y laboratorio, respectivamente; b) un ciclo de vida para cada enfermedad tomando en cuenta cada una de las fases dentro de una interacción planta-patógeno usando para esto el software en línea BioRender; y c) el manejo aislado e integrado de cada una de las tres enfermedades.

2. Roya

Etiología

Aunque la roya fue reportada de forma general en 1861 por un explorador inglés en África Oriental (cerca del Lago Victoria) en especies silvestres de café, en 1869 Berkeley y Broome en el este de África y Ceilán, describieron el patógeno y lo nombraron de *H. vastatrix* (Talhinhas et al., 2017). En Latinoamérica, la roya está presente en Brasil (Medeiros, 1970), Nicaragua (OIRSA, 1976), Perú (Echeverri, 1979), El Salvador (Echeverri, 1980), Guatemala (Schieber & Sánchez, 1982), Ecuador (INIAP, 1981), México (Vásquez, 1983) y Venezuela (Silva-Acuña et al., 1997).

Taxónomicamente el agente causal de la roya pertenece al Phylum: Basidiomycota, Clase: Pucciniomycetes, Orden: Pucciniales, Familia: Mikronegeriaceae, Género: *Hemileia*, y Especie: *Hemileia vastatrix* (Aime et al., 2006; Talhinhas et al., 2017; McTaggart et al., 2016). Además de *H. vastatrix*, *H. coffeicola* ha sido reportada como el agente etiológico de la roya polvorienta pero únicamente en cafetales de África (Gil-Vallejo, 2003). Hasta el momento, *H. coffeicola* no ha sido reportada en las zonas cafetaleras del continente americano (Gil-Vallejo, 2003). El basidiomiceto *H. vastatrix* presenta uredosporas mayoritariamente reniformes que miden entre 27 a 34 × 18 a 28 μm, con una superficie convexa y cóncava en la parte superior e inferior, respectivamente (Figura 1 C-E) (Keith et al., 2022). Sus teliosporas tienen forma subsférica y napiforme, son pediceladas con papila terminal, con diámetro de 12 a 27 × 15 a 27 μm, y sus paredes son lisas y delgadas de color amarillo pálido (Fernandes et al., 2009).

Sintomatología

A pesar de no estar claro, se cree que las hojas jóvenes son difíciles de ser infectadas, posiblemente porque el agua tiende a escurrir con mayor facilidad, cuando comparadas con las hojas adultas que son infectadas con facilidad (Rayner, 1961). Sin embargo, en ambos tipos de hojas se presentan pústulas de Roya. Los síntomas comienzan en el haz de hojas con la presencia de pequeñas manchas de color amarillo pálido (Figura 1 A), que se expanden hasta los 2 cm de diámetro (Zambolim, 2016). Posteriormente, aparecen manchas polvorientas de color anaranjado en el envés de hojas denominadas pústulas, que son predecesoras de la diferenciación de las uredias supraestomatales (Figura 1 B) (Zambolim, 2016; Talhinas et al., 2017). Independiente del tipo o sistema de cultivo, la roya causa intensa defoliación en cafetos. Una incidencia de alrededor del 36% puede causar defoliación severa en plantas de café (Figura 2 E), que resulta en una reducción significativa en su producción de granos (Aristizábal & Johnson, 2022).

Ciclo de vida

El basidiomiceto causante de la roya es un patógeno biótrofo (parasito obligado) que depende de su hospedero vivo, el cafeto (Segura-Escobar, 2017). Sin embargo, *H. vastatrix* podría tener hospederos alternos como arvenses del género *Croton*, *Euphorbia* y *Rubus* (Koutouleas et al., 2019). Las uredosporas presentes en cafetos u hospederos alternos conformarían el inóculo primario. Estas estructuras fúngicas pueden ser transportadas por insectos y el viento a cortas y largas distancias, respectivamente (Martínez et al.,

1975). Incluso, el viento podría dispersar uredosporas de *H. vastatrix* a nivel transcontinental (Brown & Hovmøller, 2002). La lluvia también es un factor de dispersión del patógeno a nivel local, afectando favorablemente la intensidad de la enfermedad dentro del cafetal (Figura 2) (Waller, 1982; Brown & Hovmøller, 2002).

Algunas poblaciones de *H. vastatrix* tienen la capacidad de infectar más de una especie de *Coffea* (Ramírez-Camejo et al., 2022). Una vez que las uredosporas alcanzan el haz de las hojas, el patógeno requiere una lámina de agua constante y prolongada en la superficie de por lo menos 8 horas, temperatura entre 21 y 25 °C, y alta humedad relativa (80%), para que dentro de 18 horas estas puedan germinar y producir de uno a tres tubos germinativos (Kushalappa & Eskes, 1989; Zambolim, 2016). En el proceso de infección las hifas del patógeno penetran, para luego colonizar intercelularmente la cámara subestomatal y las células del mesófilo, mediante la abundante formación de haustorios (Figura 2) (Kushalappa & Eskes, 1989; Fernandes et al., 20109; Zambolim, 2016).

El basidiomiceto *H. vastatrix* se reproduce clonalmente en todas las áreas donde este se distribuye, y donde exista una basta población de plantas hospedantes para sustentar su crecimiento (Ramírez-Camejo et al., 2022). El patógeno se reproduce a través de diferentes estructuras sobre tejidos foliares de los cafetos, produciendo uredias y sobre estas uredosporas (reproducción asexual o anamórfica) entre 10 y 25 días, tiempo contabilizado desde el inicio de la infección hasta su producción (Djuikem et al., 2021).

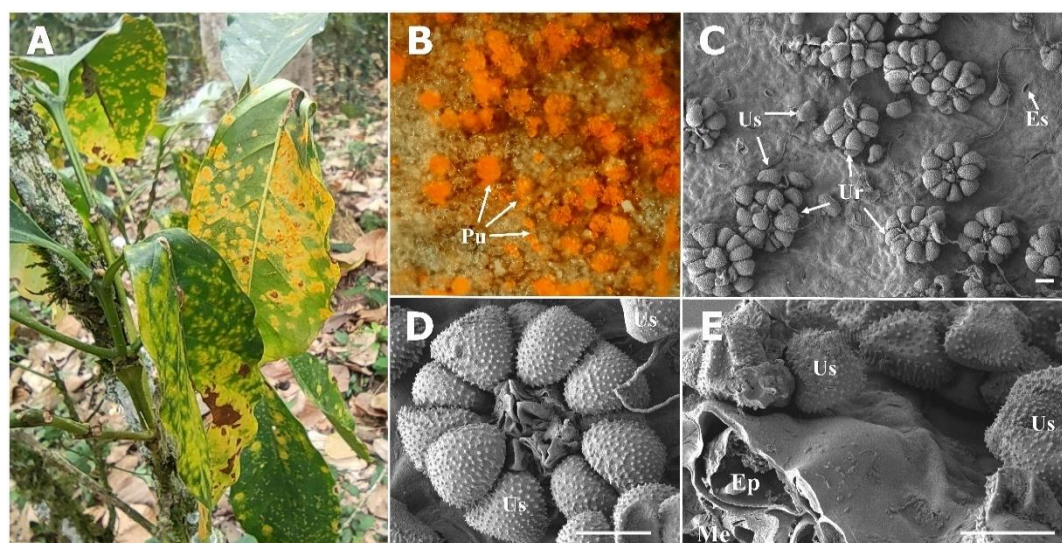


Figura 1. Síntomas de roya y estructuras de *Hemileia vastatrix* en cafetos. A) Lesiones (pústulas) de la roya sobre la superficie del envés de hojas de cafetos. B) Presencia de una mancha polvorienta de color anaranjado o conjunto de pústulas. C) Uredias y uredosporas. D) Uredosporas. E) Uredosporas sobre la epidermis de hojas de cafetos. Ep: epidermis. Es: estomas. Me: mesófilo. Pu: pústulas. Ur: uredias. Us: uredosporas. Barras (C-E): 20 μ m.

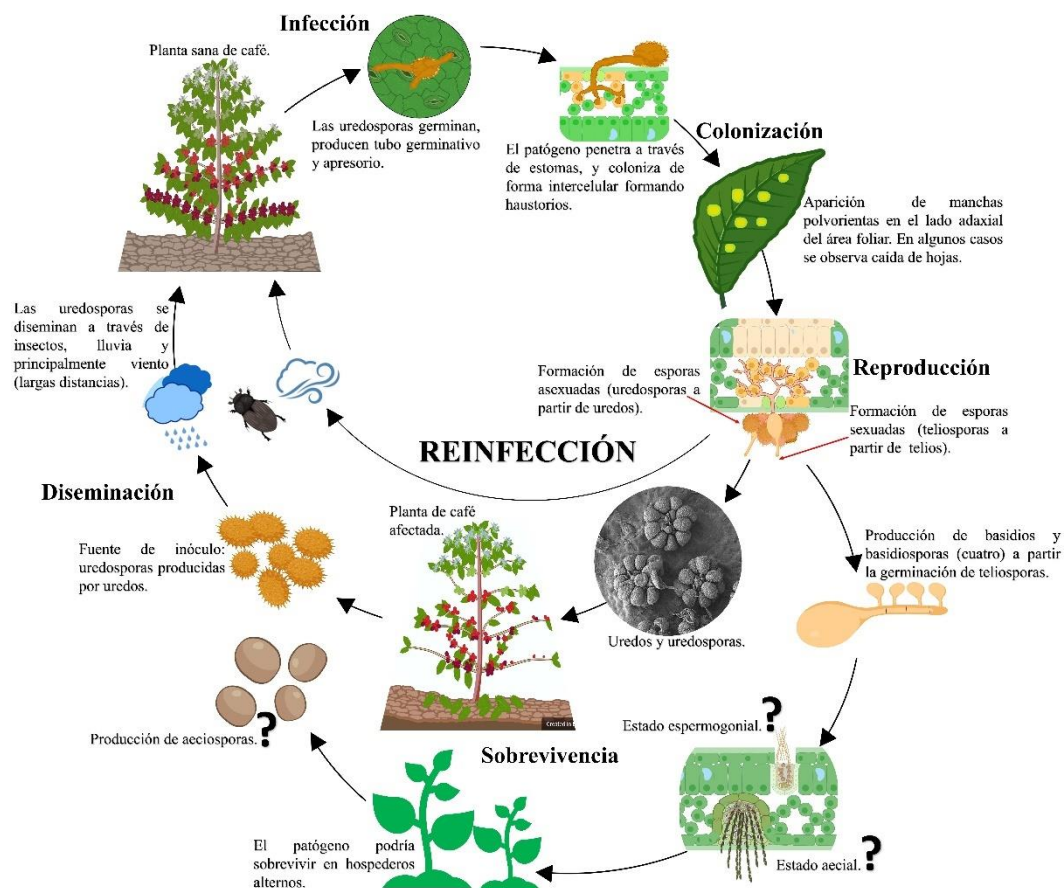


Figura 2. Ciclo biológico de la Roya causada por *Hemileia vastatrix* en plantas de café.

El tiempo dependerá de las condiciones ambientales. Estas estructuras que son observadas en el envés de las hojas aparecen como manchas polvorientas de color anaranjado. Independientemente de la intensidad de la roya, puede darse la defoliación del cafeto (Zambolim, 2016). La producción de uredias y uredosporas es intensa y cíclica en los cafetales, haciendo con que la roya sea clasificada como una enfermedad policíclica. Esto puede ser potenciado principalmente por el viento y precipitaciones pluviales (Figura 2) (Avelino & Rivas, 2013).

El patógeno también produce telios y sobre estos teliosporas (reproducción sexual o teleomórfica). La etapa sexual del ciclo de vida de un hongo causante de la roya es de particular importancia, porque a través de su recombinación facilita el surgimiento de nuevos biotipos (Shattock & Preece, 2000; Ramírez-Camejo et al., 2022). Es posible que uredosporas y teliosporas sean formadas conjuntamente dentro de una misma pústula (Fernandes et al., 2009; Djukem et al., 2021), proceso conocido como criptosexualidad (Carvalho et al., 2011). La formación de las teliosporas es inducida por una

disminución de la temperatura y la pluviosidad en los cafetales (Fernandes et al., 2009). Posteriormente, basidiosporas son formadas a partir de teliosporas por medio de meiosis (McTaggar et al., 2019). Parece ser que esta parte del ciclo biológico de la roya en cafetos aún no está del todo claro. Por ejemplo, se cree que las teliosporas y basidiosporas no son capaces de causar infección en cafetos (Figura 2) (Rodrigues, 1990; Talhinas et al., 2017). Por otra parte, podría ser que las basidiósporas no puedan volver a infectar a la misma especie vegetal (Kolmer et al., 2009). Sin embargo, este proceso no se reporta muy a menudo en la literatura y no se ha sido observado en condiciones de campo (Ventura et al., 2019). Espermogonios y aecios también son estructuras que podrían ser producidas por *H. vastatrix*, pero en tejidos foliares de huéspedes alternos como arvenses, lo que permitiría al patógeno completar su ciclo de la enfermedad (Koutouleas et al., 2019). El desconocimiento de las funciones de ambas estructuras fúngicas del basidiomiceto en la ocurrencia de la Roya en cafetos ha hecho con que el ciclo de la enfermedad sea definido como

incompleto (Figura 2) (Talinhas et al., 2017; Djuikem et al., 2021). Aunque en la actualidad se conoce los posibles hospederos alternativos de la Roya y la participación de espermogonios y aecios de *H. vastatrix* en esas plantas, sigue este misterio que ha desconcertado a la comunidad fitopatológica durante más de 150 años (Koutouleas et al., 2019).

Manejo de la enfermedad

El control genético a través del uso de genotipos resistentes es considerado como una de las mejores estrategias de manejo a largo plazo (de Resende et al., 2021), incluso es un método amigable con el ambiente y económicamente viable (Shigueoka et al., 2014). La piramidación asistida por marcadores de genes de resistencia 'SH' ha sido usada para contrarrestar la roya del café, identificándose hasta el momento los genes 'SH1', 'SH2', 'SH3', 'SH4' y 'SH5'. Sin embargo, genotipos con genes SH1, SH2, SH4 y SH5 ya han sido reemplazados por otros, principalmente debido a la gran diversidad de razas de *H. vastatrix* (Sera et al., 2022). De hecho, continuamente los fitomejoradores han buscado desarrollar nuevos cultivares con resistencia duradera a la roya del café, pero esta labor se ha visto afectada por el apareamiento de nuevas razas del basidiomiceto (Carvalho et al., 2011; Shigueoka et al., 2014). De cualquier manera, genotipos de café con genes SH1, SH2, SH4 y SH5 son importantes en la pirámide de genes para lograr una resistencia duradera a la roya (Sera et al., 2022).

Entre los cultivares de café reportados como resistentes a la roya están Tupi IAC 1669-33 III-3, Tupi IAC 1669-33 II-7 y IAPAR-59 UBS (Sera et al., 2007). Recientemente, Pereira et al. (2020) analizaron los efectos del control genético y químico de plantas de *C. arabica* contra la roya, encontrando que el híbrido Timor MG0277 presenta resistencia a la enfermedad. Otros cultivares de café reportados como resistentes a la roya, son Sacramento MG1 desarrollado a partir del cv. Red Catuaí IAC 81 x selección del híbrido Timor UFV 438-52, Catiguá MG 1, Catiguá MG 2 y Catiguá MG 3, todos tres derivados del cruce artificial entre el cv. Yellow Catuaí IAC 86 y la selección del híbrido Timor Hybrid UFV 440-10, y finalmente Iapar 59 originario del híbrido CIPC H361-4 (Villa Sarchi x híbrido Timor) (Zambolim, 2016).

El uso de medidas culturales en un cafetal es una importante herramienta contra la roya del café. La poda de ramas excesivas, eliminación de brotes jóvenes, control de arvenses, manejo de la densidad poblacional, y correcto plan de fertilización, son medidas importantes para reducir la intensidad de la

Roya en un cafetal (Aristizábal & Johnson, 2022; Sera et al., 2022). Con respecto a la fertilización, Pérez et al. (2019) mencionan que la incorporación de elementos como nitrógeno (N) y potasio (K) puede reducir la severidad de la Roya.

Hay que tener en cuenta que, en Latinoamérica muchos de los cafetales están asociados con especies forestales denominados comúnmente de sistemas agroforestales (SAF). Así, es importante llevar un control de la sombra ejercida por el tipo de especie forestal usada (Lu et al., 2022). Un porcentaje de una sombra excesiva o ausente afecta negativamente el crecimiento y rendimiento del café, debido a la mayor prevalencia de enfermedades foliares como la roya (Durand-Bessart et al., 2020; Mohammednur & Yesuf, 2021). De cualquier manera, la sombra ejercida por especies forestales en un cafetal bajo un SAF aún sigue siendo un factor muy polémico para la producción de café en términos de reducción potencial del rendimiento, y por las interacciones entre las especies arbóreas y las plagas y enfermedades en el cafetal (Koutouleas et al., 2022). Otra medida de manejo amigable con el medio ambiente es el uso de controladores biológicos. Hasta la fecha, se han llevado a cabo estudios acerca del uso de agentes biológicos candidatos para el control de la roya del café, e incluso ya se cuenta con biocontroladores registrados para el control de la enfermedad (de Resende et al., 2021). Especies del género bacteriano *Bacillus* están entre los controladores más estudiados y reportados por su efectividad para reducir la intensidad de la roya, llegando incluso su efecto a ser comparado con el proporcionado por el fungicida y bactericida hidróxido de cobre (Haddad et al., 2009). Según Daivasikamani & Rajanaika (2008), los antagonistas bacterianos *B. subtilis* y *Pseudomonas fluorescens* aislados de suelos de la rizosfera de plantas de café, usados de forma aislada (1×10^9 ufc ml⁻¹) o consorciados (1×10^8 ufc ml⁻¹), inhiben la germinación de uredosporas (> 60%) y reducen la incidencia de Roya (entre 26% y 43%) en condiciones de laboratorio y de campo, respectivamente. No obstante, en la segunda temporada de campo (período posterior al monzón) ellos encontraron una reducción de la enfermedad menor a 15% en comparación con la de la primera temporada (período previo al monzón). Las bacterias no solamente actúan como controladores biológicos de patógenos, sino también como promotores del crecimiento vegetal. Por ejemplo, *B. megaterium* (cepa 109G) es eficaz en reducir la severidad de Roya en hojas de café, pero *Escherichia fergusonii* (cepa 85G) genera un aumento del crecimiento en plántulas de café (Silva et al., 2012).

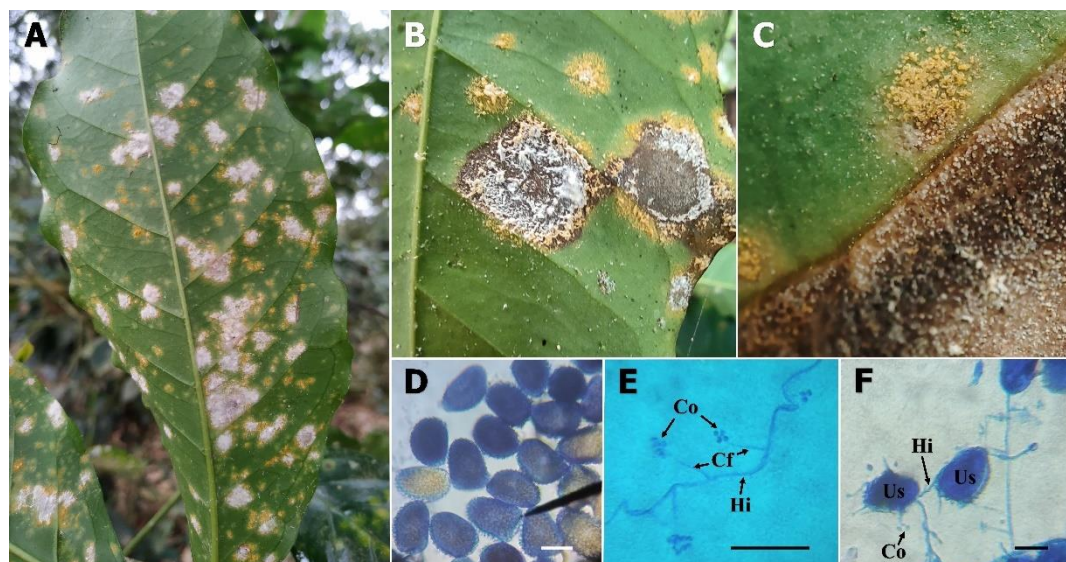


Figura 3. Control biológico ejercido por *Lecanicillium lecanii* (enemigo natural) sobre la roya (*Hemileia vastatrix*) en cafetos. A-B) Presencia de micelio blanquecino sobre las pústulas de Roya. C) Pústulas de Roya (mancha polvorienta de color anaranjado) y aparente necrosis en una zona del envés de la hoja donde *L. lecanii* parasitó a *H. vastatrix*. D) Uredosporas. E) Hifas, conidióforos y conidios de *L. lecanii*. F) Uredosporas parasitadas por hifas de *L. lecanii*. Co: conidios. Cf: conidióforos. Hi: Hifas. Us: Uredosporas. Barras (D–F): 20 μ m.

En dicho experimento se evaluaron un total de 234 bacterias endófitas (217) y hongos (17) aislados de tejidos de café. Aunque especies de *Pseudomonas* también promueven el crecimiento de las plantas y coloniza una amplia gama de ambientes, puede ser un excelente biocontrolador contra la Roya en cafetos (de Sousa et al., 2022). La creciente preocupación por evitar o reducir el uso de plaguicidas y fertilizantes inorgánicos en el cultivo de café, y optar por alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, ha hecho que entre las investigaciones más demandadas estén el uso de microorganismos y sus compuestos en el manejo de enfermedades como la Roya (Castillo et al., 2022).

En los últimos años ha aumentado el interés por el potencial de micoparásitos como *Lecanicillium lecanii*, para el manejo de Roya en cafetos (Jackson et al., 2012; de Resende et al., 2021). *Lecanicillium* muestra un parasitismo cercano al 70% sobre *H. vastatrix* (Gómez-de la Cruz et al., 2018). Sin embargo, *L. lecanii* no es solo un potencial micoparásito natural contra varios patógenos fúngicos como *H. vastatrix* (Hajian-Forooshani et al., 2023). Al contrario, también es un hongo entomopatógeno que puede controlar insectos plagas como cochinilla verde (*Coccus viridis*), mosca blanca (*Bemisia tabaci* biótipo Q) y pulgones (*Plutella xylostella*) (Jackson et al., 2012; Ravindran et al., 2018; Xie et al., 2019).

Epizootias (brotes) de *L. lecanii* en cafetales mexicanos, han sido asociadas con grandes poblaciones

de la cochinilla verde que a su vez están asociadas con su socio mutualista la hormiga anidadora (*Azteca instabilis*) (Jackson et al., 2012). Hay que tener en cuenta que aparte de *L. lecanii*, *H. vastatrix* posee otros tres enemigos naturales principales i.e. un díptero fungívoro, un ácaro fungívoro y un caracol generalista, que contribuirían al mantenimiento del patógeno en niveles bajos en los cafetales (Hajian-Forooshani et al., 2023). Por ejemplo, la producción de enzimas hidrolíticas por micoparásitos destruye las uredosporas (Gómez-de la Cruz et al., 2022). La interacción entre *H. vastatrix* y *L. lecanii* dentro de un cafetal parecen ser complejas y podrían involucrar múltiples mecanismos (Figura 3). Tanto las interacciones complejas no solo entre *H. vastatrix* y *L. lecanii*, sino también con los otros enemigos naturales, siembran la necesidad de dilucidar los mecanismos subyacentes de su relación.

El uso de fungicidas es también usado en el manejo de Roya en cafetos, siendo considerado el más efectivo debido a la variación de la resistencia presentada en cultivares (Zambolim, 2016; Talhahas et al., 2017). Antes de formular un programa de aplicación de fungicidas, se debe tomar en consideración la molécula a ser usada, así como su dosis, frecuencia y tecnología de aplicación, con la finalidad mantener la eficiencia y la relación costo-beneficio (Sera et al., 2022). Normalmente son usados fungicidas de contacto con acción protectora i.e. ditiocarbamatos y cúpricos (cobre metálico o Cu^{2+}) (La Torre et al., 2018; Sera et al., 2022). El cobre es un elemento

esencial muy usado en la agricultura orgánica, siendo de bajo costo, altamente tóxico contra patógenos como el causante de la Roya, de largo período residual, y bajamente tóxico para los mamíferos (de Resende et al., 2021). Algunos de los fungicidas cúpricos son óxido cuproso 50% Cu WP (3,8 kg ha⁻¹), hidróxido cúprico 50% Cu WP (3,8 kg ha⁻¹), y cloruro cúprico 50% Cu WP (7,0 kg ha⁻¹), cualquiera de ellos aplicados al follaje en intervalos de 3 semanas (Mohammednur & Yesuf, 2021). Otra molécula también efectiva contra la Roya y aplicada foliarmente es Flutriafol (0,4 kg ha⁻¹) (Capucho et al., 2013). El fungicida-insecticida Ciproconazol + Thiametoxam (Verdadero® 60 WG, 1,0 kg ha⁻¹) también podría ser aplicado vía drench en plantas de café (Pereira et al., 2020).

El manejo integrado de enfermedades (MIE) busca el uso racional de fungicidas sintéticos (Belan et al., 2020). El MIE propone la integración de varias técnicas, iniciando con la selección de cultivares resistentes denominado de control genético, seguido del cultural, físico, biológico y en última instancia el químico (Gamarra et al., 2016; Zambolim, 2016). Para la integración de estas medidas se debe monitorear constantemente la Roya en el cultivo (Belan et al., 2020), tomando en cuenta la incidencia de la enfermedad que debe permanecer por debajo del umbral de daño ($\leq 5\%$) (Aristizábal & Johnson, 2022). Hoy en día, la Roya podría ser monitoreada con herramientas y técnicas de agricultura de precisión, debido a que brinda información precisa y oportuna (Kumar et al., 2020). Además del monitoreo, está el soporte técnico y los sistemas de pronóstico o predicción de la enfermedad (Motisi et al., 2022; Sera et al., 2022).

3. Mal de hilachas

Etiología

A pesar de que el Mal de hilachas aparentemente está presente en cafetales Sudamericanos, apenas se lo ha reportado en Brasil (Rosseti et al., 1982) y Venezuela (Burt, 1918). La enfermedad fue descrita por primera vez por Cooke en 1876 afectando cafetos en la India, siendo nombrado como *Pellicularia koleroga* Cooke (Tims et al., 1954). Más tarde, Von Höhnel redescubrió el patógeno en 1910, nombrándolo *Corticium koleroga* (Cooke) Von Höhnel 1910 (Tims et al., 1954). Actualmente, otros nombres han sido usados como sinónimos para referirse al patógeno i.e. *Botryobasidium koleroga* (Cooke) Venkatar, *Hypochnus koleroga* Stevens & Hall, *Koleroga noxia* Donk, y *Ceratobasidium noxium* (Donk) P. Roberts (Venkatarayan, 1949; Ceresini et al., 2012). Desde hace años atrás, el Mal

de hilachas ha sido asociado con el complejo de especies del género *Ceratobasidium* (Cavalcante & Sales, 2001). En la actualidad se conoce que la enfermedad puede ser causada por *C. noxium* (Ceresini et al., 2012) y también por *C. chavesanum* (de Melo et al., 2018). Así, taxonómicamente el patógeno corresponde al Phylum: Basidiomycota, Clase: Agaricomycetes, Orden: Cantharellales, Familia Ceratobasidiaceae, Género: *Ceratobasidium*, y Especie: *Ceratobasidium noxium*.

La colonia de *C. noxium* sobre medio de cultivo papa dextrosa agar presenta micelio aéreo generalmente de color blanco y en menor proporción blanco floral (Belachew et al., 2015; Dechassa et al., 2020). Sus hifas son largas, con un ancho entre 3,75 a 5,00 μm (Dechassa et al., 2020), binucleadas y ramificadas en ángulos de 90° similar a las de *Rhizoctonia* (Figura 4 G), y que pueden agruparse formando cordones siendo observados a simple vista (de Melo et al., 2018). Sus basidios son entre oblongos y elipsoides, son más anchos que su hifa base, y sobre estos son producidos basidiósporas fusiformes, lisas, hialinas y delgadas, que miden 10 a 13,75 μm x 3,75 a 5 μm (Figura 4 H, I) (Dechassa et al., 2020). Los basidios tienden a colapsar después de la formación de las basidiósporas (Burt, 1918). Aparte del micelio con ramificaciones de 90°, formación de cordones de hifas, basidios y basidiosporas, otras estructuras como hifopodios y esclerocios han sido asociadas a *Ceratobasidium* (de Melo et al., 2018).

Sintomatología

Los síntomas de Mal de hilachas en plantas de café arábico aparecen diez días después de la infección con *C. noxium*, observándose necrosis en el peciolo, y luego manchas necróticas en el lado inferior de la hoja junto al peciolo hasta transformarse en un tizón foliar (de Melo et al., 2018; Dechassa et al., 2020). Las hojas necrosadas quedan suspendidas mediante un hilo formado por una masa o cordón de micelio del hongo (Figura 4 B, C), similar a hilos de una telaraña (de ahí proviene el otro nombre de la enfermedad "mal del araño") (Castro-Caicedo, 2003; de Melo et al., 2018). Estas estructuras pueden ser observadas incluso en la parte media del tallo hasta los nudos y entrenudos de ramas jóvenes (Dechassa et al., 2020). La enfermedad parece afectar tanto hojas como frutos, tejidos que pueden ser observados colgando por cordones de micelio (Figura 4 B-E). El estrato superior de los cafetos es donde más se observa Mal de hilachas. Si bien esta enfermedad no es capaz de matar la planta, causa intensa defoliación (Figura 4 A) (Castro-Caicedo, 2003).

Ciclo de vida

Aunque la sobrevivencia a largo plazo se da por microesclerocios, basidiósporas y micelio en diferentes especies de *Ceratobasidium*, se desconoce la existencia de estas estructuras en *C. noxium* en el cultivo de café (de Melo et al., 2018). Se cree que el patógeno sobrevive la temporada invernal en forma de micelio en restos vegetales infectados (Burt, 1918), y posiblemente en hospederos alternos (Belachew et al., 2015; de Melo et al., 2018) (Figura 5). Según Samuels et al. (2012), en plantas de cacao cuando su hoja infectada con *C. theobromae* cae durante períodos prolongados de lluvia, las hifas pueden emerger de los restos de tejidos vasculares en la cicatriz de la hoja, y formar basidiomas corticioides blancos sobre y alrededor de la cicatriz. El hongo no sigue esporulando ni sobrevive en las ramas muertas de cacao.

La diseminación de *Ceratobasidium* comienza con la liberación de basidiósporas a partir de basidios

establecidos durante el tiempo húmedo, y que son transportadas por el viento, insectos (probablemente del orden Hemiptera) (Dechassa et al., 2019), y herramientas usadas en labores culturales, hasta alcanzar tejidos de cafetos sanos (Mathew, 1953). Una vez que es iniciado este proceso, este es continuo y cíclico. El factor determinante para que este proceso continúe, es la formación de cordones de micelio del patógeno que se extienden rápidamente entre las ramas afectadas, permitiendo su diseminación hacia otras hojas y ramas de plantas sanas (Dechassa et al., 2019) (Figura 5).

Muy seguramente, bajo condiciones favorables no documentadas como alta humedad relativa y temperatura alrededor de 25 °C (Dechassa, 2019), el patógeno germina produciendo un tubo germinativo y apresorio para penetrar los tejidos vegetales. Un dato muy interesante es que al inicio de las investigaciones con *C. noxium* se creía que el patógeno no penetraba los tejidos aéreos, y que su alimentación era a través de osmosis.

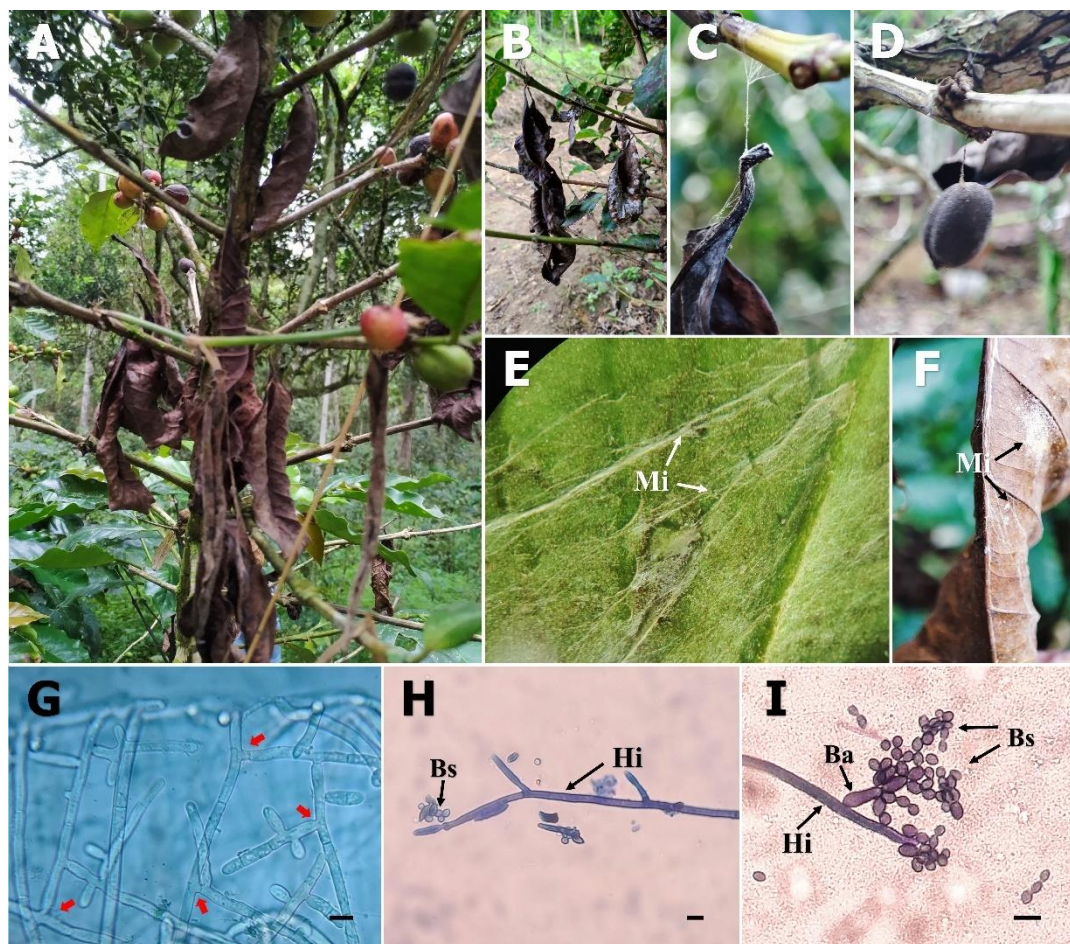


Figura 4. A) Síntomas de Mal de hilachas y estructuras de *Ceratobasidium* spp. en cafetos. A-D) Hojas y granos (cerezas) de café colgando mediante un cordón de micelio. E-F) Micelio del patógeno sobre la superficie de tejidos foliares jóvenes (E) y senescentes (F). G) Hifas formando ángulos de 90° tipo *Rhizoctonia* (flechas rojas). H-I), Hifas, basidios y basidiosporas. Ba: basidios. Bs: basidiosporas. Hi: hifas. Mi: micelio. Barras (G-I): 20 µm.



Figura 5. Ciclo de vida de Mal de hilachas causada por *Ceratobasidium noxium* en plantas de café.

Sin embargo, actualmente se conoce que al igual que otros patógenos, *C. noxium* pasa por un proceso de penetración intracelular para hacer efectiva la infección (Von Höhnel, 1910) (Figura 5).

El patógeno ingresa en las ramas a través de las lenticelas y/o por heridas, mientras que, en las hojas, la infección se da a través de estomas (Narasimhan, 1933). *C. noxium* puede entrar en un periodo de dormancia de 6 a 10 días o de 5 a 8 días en ramas, lo que dependería de la disponibilidad de los estomas (Dechassa, 2020). Posteriormente, el patógeno coloniza el parénquima esponjoso e incluso alcanza el parénquima empalizada (Narasimhan, 1933). El micelio que hasta entonces se encontraba dentro de los tejidos vegetales, emerge en varios puntos del envés de la hoja formando hebras blanquecinas largas de diámetro uniforme, y se extiende a lo largo de la nervadura central y las ramas presentando un color gris pardo hasta producir fructificaciones como basidios y sobre estos las basidiósporas (Figura 5) (Burt, 1918; Dechassa, 2019).

Manejo de la enfermedad

A pesar de la amenaza potencial que representa el Mal de hilachas para los cultivos de café, su escasa información científica hace que su manejo sea complejo (Dechassa, 2019). A esto se podría sumar el desconocimiento por parte de los agricultores, haciendo con que la enfermedad presente una alta intensidad en las plantaciones de café, incidiendo directamente en su alta dispersión y reducido

manejo, como sucede en el suroeste de Etiopía (Teferi et al., 2008; Belachew et al., 2015).

El uso de cultivares resistentes es un punto clave dentro del manejo integrado de Mal de hilachas, no solo consiguiendo reducir significativamente los costos de producción, sino también ofreciendo una alternativa amigable con el medio ambiente (Dechassa, 2019). La información respecto a cultivares con resistencia genética al Mal de hilachas es muy escasa. Hasta la fecha se han evaluado 124 genotipos de *C. arabica*, de los cuales 42 demostraron determinados niveles de resistencia hacia el Mal de hilachas, entre ellos la variedad comercial '74112' considerado como moderadamente resistente (Dechassa et al., 2019). Una buena alternativa ante la falta de cultivares resistentes, es el uso de biocontroladores (Sutton & Peng, 1993). Lo poco que se conoce, es lo mencionado por Jansen (2005), quienes recomiendan el uso de hongos antagonistas como *Gliocladium* spp., *Trichoderma* spp. y *Verticillium* spp.

Otra herramienta de manejo sería el uso de fungicidas. Según Quevedo (2014), la aplicación de moléculas sintéticas para el control de Mal de hilachas puede hacerse de forma preventiva y curativa. Es importante considerar la época, número y frecuencia de aplicación. Autores como Sotomayor y Duicela (1995) mencionan que es suficiente aplicar la dosis recomendada dos veces por año, la primera aplicación durante la abundancia de follaje tierno que ocurre en los primeros días de lluvia, y una segunda aplicación

seis semanas después de la primera. Pueden ser usadas las mezclas de los fungicidas Bavistin® (Carbendazim 50 WP) y Bordeaux al 1% del ingrediente activo (compuesto principalmente por cal hidratada o apagada, hidróxido de calcio y agua) (Sudhakar & Shankara, 1995). Si la incidencia de la enfermedad es alta, es recomendable el uso de fungicidas cúpricos (Müller et al., 2009). Otros fungicidas recomendados por Sudhakar & Shankara (1992) y (1995) para el manejo de Mal de hilachas son Carbendazim 50 WP, Triadimefón 25 WP, Oxicarboxin 20 WP, Propiconazol 25 WP y Tiofanato de metilo M 70 WP.

El MIE en cafetos reduce considerablemente la dependencia de fungicidas sintéticos. La implementación de prácticas culturales cumple un papel importante en el manejo de la enfermedad, pudiendo reducir su desarrollo y diseminación (Quevedo, 2014). Entre estas herramientas están la optimización de sombras dentro de los SAF, ventilación asociada a la disposición de los cafetos (distancia de siembra), y poda de ramillas y ramas marchitas o enfermas (Dechassa, 2019). Las ramas enfermas una vez cortadas se deben quemar, al igual que sus hojas y frutos afectados por *C. noxium* (Müller et al., 2009). Una mayor penetración de luz solar y circulación de aire en el dosel de las plantas de café, reducirían la presión de la enfermedad en el cultivo (Teferi et al., 2008).

4. Cercosporiosis

Etiología

La Cercosporiosis o Mancha de hierro fue descrita por primera vez por Berkeley y Cooke en 1881 afectando hojas de café en Jamaica, y en Sudamérica ha sido reportada solo en Brasil (Noack, 1901; Souza et al., 2011). La enfermedad es causada por el hongo *Cercospora coffeicola*, que puede afectar la planta durante sus diferentes estados fenológicos (Souza et al., 2019; Cooke, 1881; Souza et al., 2010), y causar daños en su producción de granos de hasta 30% (de Paula et al., 2016). Taxonómicamente se ubica dentro del Phylum: Ascomycota; Clase: Dothideomycetes; Orden: Mycosphaerellales; Familia: Mycosphaerellaceae; Género: *Cercospora*; Especie: *Cercospora coffeicola* (EPPO, 2002). El patógeno tiene algunos sinónimos i.e. *C. coffeae*, *C. herrerana*, *Ramularia goeldiana* (formas asexuadas) y *Mycosphaerella coffeicola* (forma sexuada) (Vale et al., 2021; Souza et al., 2012; Botelho et al., 2021).

Los conidióforos suelen encontrarse solos o agrupados (fascículos) (Figura 6 E, G, H), formando

células conidiógenas en su parte superior (Souza et al., 2010). Los conidios son hialinos, con forma acicular a obclavado, semi rectos, con ápice agudo y base truncada, hilios visibles y septados, midiendo entre 40-150 x 2-4 μm (Figura 6F) (Nelson, 2008). Además, el patógeno forma estromas que miden $\pm 50 \mu\text{m}$, globulares y de color marrón oscuro (Nelson, 2008). Al igual que otras especies de *Cercospora* que son consideradas como hemibiótrofas debido su largo período de latencia (Andrade et al., 2021), *C. coffeicola* utilizaría la misma estrategia de colonización del tipo necrótropa para obtener nutrientes, pudiendo incluso matar las células del huésped a través de la producción de especies reactivas de oxígeno y toxinas (Daub et al., 2013).

Sintomatología

Los síntomas de Cercosporiosis en cafetos pueden ser variados, siendo las manchas con centro claro y borde amarillento denominadas como mancha de ojo marrón son las más comunes (Figura 6A), mientras que las menos comunes son las manchas oscuras designadas como mancha negra (Figura 6B) (Andrade et al., 2021). Los síntomas comienzan en el lado adaxial de la hoja, y con el aumento de la infección en estos tejidos las manchas aumentan de tamaño, presentando en el centro de la lesión una coloración blanquecina, borde marrón y halo amarillo (Figura 6C), siendo consideradas en este punto como manchas maduras (Souza et al., 2010). En el centro y próximas a este en cada lesión pueden ser observados signos del patógeno (Figura 6D-H), que no son otra cosa que conidióforos y conidios (Nelson, 2008; Souza et al., 2010).

Los síntomas en granos pueden ser diferentes, dependiendo principalmente de la edad de estos tejidos. Por ejemplo, en cerezas verdes independientemente de su etapa de desarrollo, se pueden observar manchas color marrón oscuro, hundidas, alargadas, y de forma irregular y centro cenizo con borde amarillento, que pueden alcanzar una longitud de hasta 5,8 cm, denominadas de manchas marrones (Nelson, 2008; de Paula et al., 2019) (Figura 6C).

En granos maduros se pueden observar manchas oscuras hundidas con coloración plateada, que pueden ser fácilmente confundidas con las producidas por hongos como *Colletotrichum gloeosporioides*, agente causal de Antracnosis en café; como resultado, se reduce la capacidad fotosintéticamente activa que ocasionaría una maduración prematura de frutos, y repercutiría negativamente en el sabor final del café (Nelson, 2008).

La etiología asociada a los diferentes tipos de síntomas producidos por *C. coffeicola* fue elucidado por Vale et al. (2021). Estos investigadores encontraron que los aislados obtenidos tanto a partir de la mancha marrón como de la negra encontradas en el área foliar de cafetos, presentan las mismas características morfológicas y producen manchas en tejidos en condiciones de invernadero. Esto confirmaría que la especie asociada a ambos tipos de manchas foliares en hojas sería *C. coffeicola*, eso sí, proponiendo un epitipo para esta especie. Los síntomas caracterizados como manchas negras podrían estar asociadas a diferentes condiciones del huésped durante el proceso de infección por el patógeno (Botelho et al., 2019).

Ciclo de vida

Existen pocos estudios sobre la interacción entre café y *C. coffeicola*, especialmente sobre la sobrevivencia del patógeno en los cafetales en compa-

ración con otras especies de *Cercospora*. Khan et al. (2008) demostraron que *C. beticola* sobreviven en forma de estromas sobre restos vegetales depositados en el suelo hasta por 22 meses, perdiendo totalmente su viabilidad luego de 34 meses. Otras especies como *C. capsici* sobrevive de forma latente como micelio y conidios en restos vegetales infectados por 120 días con temperaturas de 30 a 42 °C, y en la superficie del suelo hasta por 165 días (Swamy et al., 2012). Se creería que *C. coffeicola* tendría hábitos de sobrevivencia similares al de las otras especies descritas de *Cercospora* (Figura 7).

La diseminación se daría a través del viento (principalmente durante el día), salpicaduras de lluvia, y por el movimiento de trabajadores y de sus maquinarias y herramientas (Nelson, 2008). Una vez que los conidios alcanzan la superficie adaxial foliar del café, en aproximadamente cuatro horas estos producen un tubo germinativo que crece en dirección a las aperturas estomáticas (Souza et al., 2010).

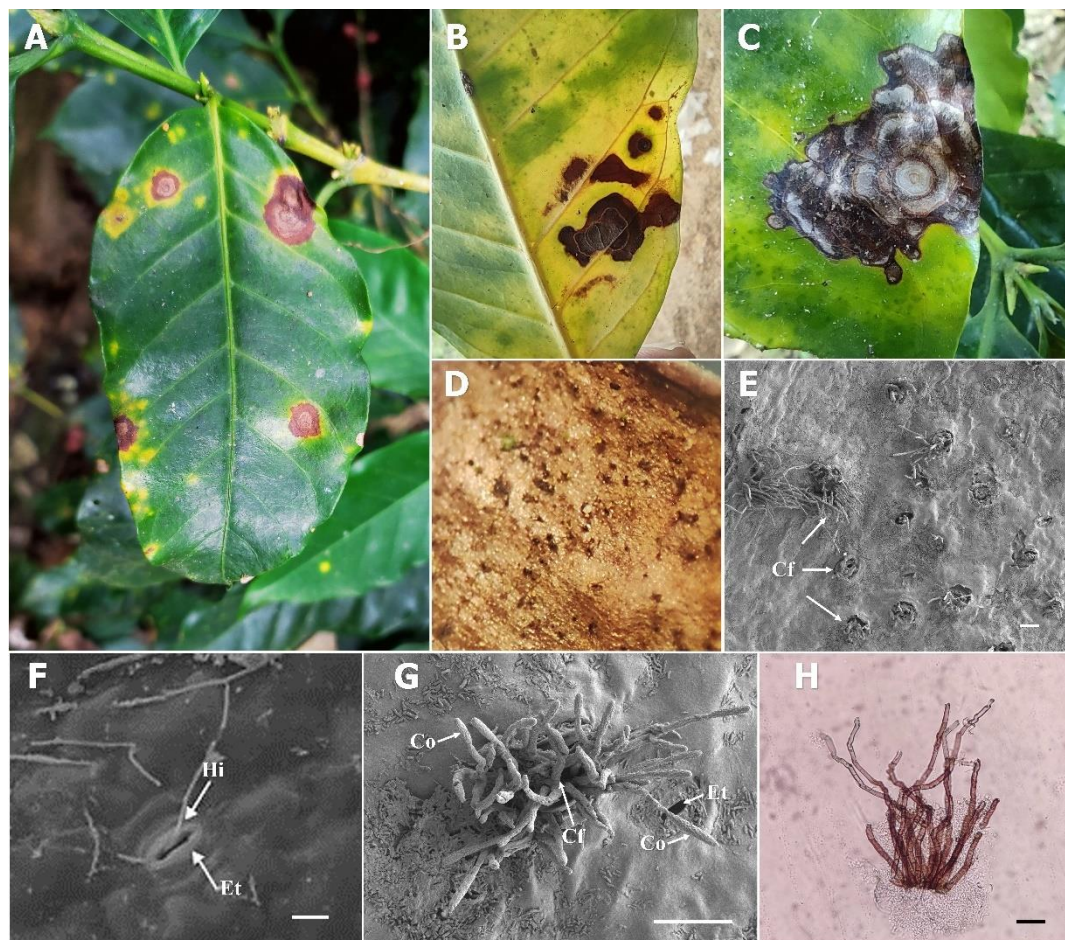


Figura 6. Síntomas de Cercosporiosis y estructuras de *Cercospora coffeicola* en cafetos. A) Mancha foliar marrón con halo amarillento. B-C) Manchas foliares oscuras. D) Lesión foliar presentando conidióforos (pequeños puntos negros). E) Conidióforos observados sobre aperturas estomáticas. F). Germinación de conidios y penetración de hifas a través de aperturas estomáticas. G) Conidióforos y conidios sobre una apertura estomática. H) Conidióforo. Et: estoma o apertura estomática. Co: conidios. Cf: conidióforos. Hi: hifas. Barras (E-H): 20 μ m.

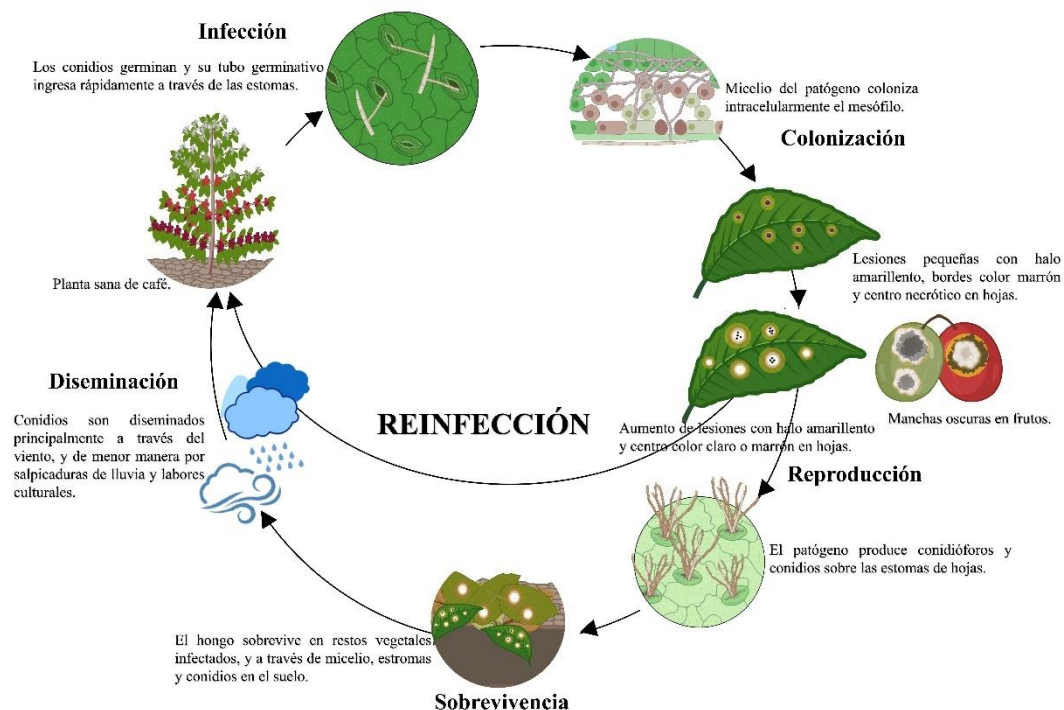


Figura 7. Ciclo biológico de la Cercosporiosis causada por *Cercospora coffeicola* en plantas de café.

Un mal estado de salud de los cafetos y temperaturas entre 20 y 28 °C y humedad ambiental de 36 a 72 h continuas, harían que la infección de *C. coffeicola* en los tejidos sea exitosa (Nelson, 2008). En frutos inmaduros el patógeno penetra a través de heridas en la epidermis sin formación de apresorios, completando la infección en hasta 72 h después de la inoculación (de Paula et al., 2019). El proceso infeccioso o período latente en café puede durar meses, incluso sin observarse síntomas sobre el tejido infectado (Figura 7) (de Paula et al., 2019). Durante el proceso de colonización, *C. coffeicola* produce Cercosporina ($C_{29}H_{26}O_{10}$), una micotoxina inespecífica fotosensible que mata rápidamente las células vegetales en presencia de luz solar y que es un factor de virulencia, esta puede ser encontrada en cualquier lesión producida por el patógeno independientemente del cultivar de café (Vale et al., 2019; Ramos et al., 2022). La colonización de los tejidos por el patógeno es un poco lenta, tardando más de un mes. Las hifas del patógeno crecen en células del parénquima y debajo de la cámara subestomática, donde posteriormente emergerían los respectivos conidióforos (Figura 7) (Souza et al., 2010). Finalmente, la reproducción del patógeno ocurre sobre la superficie de hojas o frutos, mediante la formación de una basta cantidad conidióforos y conidios (Figura 6D-H; 7).

Cercosporiosis podría ser encuadrada como una enfermedad policíclica, esto en gran medida a que

la infección de nuevos tejidos aéreos como hojas y frutos podría darse a través de reinfecciones por parte del patógeno. Una vez el patógeno dentro de los tejidos vegetales este los colonizaría, y posteriormente produciría conidióforos y conidios sobre las aberturas estomáticas de tejidos como hojas, dando lugar a múltiples ciclos subsecuentes dentro del cafetal (Figura 7).

Manejo de la enfermedad

La resistencia contra enfermedades como Cercosporiosis es una de las principales estrategias para tener en cuenta. Actualmente, se conoce el cv. comercial 'Sarchimor MG 8840' presenta resistencia a la enfermedad, seguida de otros genotipos de la colección Sarchimor, seguida de individuos de la colección de germoplasma (Botelho et al., 2017). Otras fuentes de resistencia son las reportadas por Pereira et al. (2019), quienes describen al cultivar 'Big Coffee VL' por presentar características de grano largo, y sus progenies 'M5' y 'P23' poseen buenas características de producción y un alto potencial de resistencia a *C. coffeicola*. Aunque se puede encontrar información sobre resistencia genética en café contra *C. coffeicola*, ésta aún no ha sido explorada a profundidad (Botelho et al., 2017). Otro de los métodos usados para manejar la Cercosporiosis es el cultural, entre estas el riego, y la fertilización orgánica e inorgánica. El riego es una práctica que modifica el microclima del cultivo, interfiere en la luminosidad, temperatura y

humedad relativa del aire, y la intensidad de la enfermedad en cafetos. De hecho, plantas irrigadas presentan 30% menos de incidencia de Cercosporiosis que las no irrigadas (Paiva et al., 2013). Por otro lado, una fertilización con dosis altas de N, K y fósforo (P) reducen considerablemente la Cercosporiosis en hojas, y mantienen un mayor número de hojas y el balance nutricional en plantas de café (Vilela et al., 2022). El uso de abonos verdes intercalados con plantas de café también reduce la incidencia y el número de lesiones de Cercosporiosis en hojas, y la incidencia de pudrición en frutos, ambas enfermedades causadas por *C. coffeicola*, siendo su eficiencia similar a la mostrada por la aplicación de urea (Cardoso et al., 2013). Otras prácticas culturales que podrían reducir considerablemente la enfermedad en cafetos comerciales *i.e.* seleccionar semillas de alta calidad, trasplantar las plántulas a poca profundidad, seleccionar densidades poblacionales razonables, eliminar arvenses, restos de cultivos y tejidos o plantas infectadas, y proporcionar entre 35% y 65% de sombra (Nelson, 2008; Lu et al., 2022).

Con respecto al control biológico se han reportado algunos biocontroladores potenciales contra Cercosporiosis en café. Según Sirinunta & Akarapisan, (2015), encontraron que aislados de *B. megaterium* y *B.adius* aplicados en plántulas de café en condiciones de invernadero reducen la enfermedad en más del 50%. Hongos también han sido reportados como potenciales biocontroladores de la Cercosporiosis, por ejemplo, *Trichoderma*. Este hongo aplicado en plantas adultas puede reducir la enfermedad en más del 50%, pudiendo ser comparado incluso con la eficiencia mostrada por el fungicida Bordeaux (Bhandari et al., 2021). También existen reportes del hongo saprófito *Phialomyces macrosporus*, que reduce el crecimiento, esporulación y viabilidad de *C. coffeicola* hasta en un 40%, debido probablemente a su producción de compuestos volátiles y no volátiles (Laborde et al., 2018). El uso de moléculas sintéticas para el control de Cercosporiosis se torna casi necesario en regiones cafetaleras húmedas, usando fungicidas como clorotalonil y estrobilurinas y sus mezclas, pero respetando las dosis, frecuencias y rotaciones (Lu et al., 2022). También los triazoles estarían dentro del grupo de fungicidas a ser tomados en cuenta. Por ejemplo, tebuconazol 25,9 EC (1 mL L⁻¹) y la mezcla trifloxistrobina 25% + tebuconazol 50% WG (2 g L⁻¹) reducen considerablemente la incidencia de Cercosporiosis en cafetos (Machenahalli et al., 2019). Mezclas de estrobilurinas y triazoles como azoxistrobina + ciproconazol (500 mg L⁻¹) reduce totalmente la germinación de esporas y el creci-

miento micelial de *C. coffeicola* (Carvalho et al., 2022). Aunque se conozca la eficiencia de estas mezclas en el manejo de Cercosporiosis, otra opción sería la aplicación de Acibenzolar-S-metil, que proporciona un control mayor al 50% de la Cercosporiosis en plantas de café (Patrício et al., 2008). En las regiones húmedas también podrían usarse productos más ecológicos, como la aplicación temprana de cobre (de Lima et al., 2022). Algunas medidas de manejo integrado aplicables al cultivo de café para el control de Cercosporiosis comienzan con su monitoreo constante mediante el análisis de suelo y tejidos y ejecución de varias prácticas culturales (ver el segundo párrafo del ítem manejo de Cercosporiosis). También, dentro del MIE se pueden incluir al uso de biocontroladores, y aplicación temprana de fungicidas especialmente en regiones húmedas. Así mismo, no se debe obviar el uso de cultivares resistentes a la Cercosporiosis, como una de las más herramientas más importantes para su manejo integrado (Ogundeji et al., 2019).

5. Desafíos actuales y futuros

Entre las enfermedades que más afectan los cafetos a nivel mundial está la Roya, situándose como la más importante a nivel mundial, seguida de Mal de hilachas y Cercosporiosis. Así como su orden de importancia, existe una correlación inversa con el conocimiento generado a partir del estudio de estas enfermedades, encontrando basta información sobre la roya, pero muy poco sobre las otras dos, especialmente sobre Mal de hilachas. Por ejemplo, se conoce poco o nada sobre los cultivares resistentes y la diversidad del agente causal en café. De hecho, hasta hace poco se conoce que el agente causal de Mal de hilachas no solo sería *C. noxium*, sino también *C. chavesanum*. Todo eso sin duda dificulta la implementación de estrategias de manejo efectivas para la enfermedad.

A pesar de que en esta revisión se ha abordado de forma general a la Roya, Mal de hilachas y Cercosporiosis en el cultivo de café, uno de los principales objetivos fue elucidar el ciclo de cada una de ellas. Esto ha hecho que nos demos cuenta de que aún faltan investigaciones, enfocadas principalmente en la interacción entre tejidos de café y los fitopatógenos *Ceratobasidium* spp. y *C. coffeicola*. De hecho, hasta ahora se desconoce la variabilidad genética de ambos agentes causales, ni la importancia de sus estructuras fúngicas en el cultivo de café, lo que podría ser investigado en los siguientes años. También, sobre la Roya hay preguntas sin resolver, como ¿cuáles son los hospederos alternos de *H. vastatrix*?

Otro de los desafíos para tener en cuenta está la evaluación de la respuesta de cultivares comerciales y genotipos promisorios de café a las enfermedades en estudio, especialmente a Mal de hilachas y Cercosporiosis tanto en condiciones de invernadero como de campo. Así mismo, la optimización de reguladores biológicos (biocontroladores) o químicos (fungicidas sintéticos), regulación de la sombra ejercida por especies arbóreas (SAF) o por la misma arquitectura o densidad poblacional de los cafetos, incorporación de abonos orgánicos o inorgánicos, e implementación de sistemas de riego, también estarían dentro de los retos investigativos en el cultivo de café, si se desea aumentar de manera sostenible el rendimiento de cerezas en dicho agroecosistema. Es importante el diseño e implementación de prácticas de manejo agroecológico que promuevan la generación de interacciones ecológicas beneficiosas que contribuyan a la protección de los cafetos a mediano y largo plazo (Castillo et al., 2022). Finalmente, es crucial actualizar las técnicas de control ecológicas y respetuosas con el medio ambiente, y comprender cómo funcionarán en el futuro cambio climático, haciendo con que mejore la percepción de los agricultores sobre las interacciones entre los servicios de regulación y el cambio climático (Harelimana et al., 2022).

6. Conclusiones

Entre las enfermedades que afectan negativamente los cafetos tanto a cielo abierto como bajo un sistema agroforestal, están Roya (*H. vastatrix*), Mal de hilachas (*C. noxium*) y Cercosporiosis (*C. coffeicola*). Esas enfermedades producen síntomas en tejidos aéreos de cafetos, reduciendo su rendimiento de granos en hasta 90%. Aunque *H. vastatrix* es catalogado como uno de los fitopatógenos más importantes en el cultivo de café, otros como *C. noxium* y *C. coffeicola* podrían fácilmente ser también clasificados como factores bióticos significativos, especialmente en regiones lluviosas. Aún se desconoce el papel de algunas de las estructuras de *C. noxium* y *C. coffeicola* en los procesos de sobrevivencia, diseminación, infección, colonización y reproducción dentro de un cafetal. El manejo sugerido de las tres enfermedades es mediante la integración de medidas que principalmente buscan reducir el uso de fungicidas sintéticos i.e. seleccionar cultivares resistentes, monitorear constantemente las enfermedades usando herramientas convencionales o técnicas de agricultura de precisión, usar o desarrollar sistemas de pronóstico o predicción de las enfermedades, optimizar la sombra dentro de los SAF, suministrar la ventilación asociada a la

disposición de los cafetos, realizar podas, mantener un programa de fertilización adecuado y manejo de arvenses, usar biocontroladores, y usar fungicidas especialmente en regiones húmedas.

ORCID

- A. Moreira-Morrillo  <https://orcid.org/0000-0003-4060-3044>
 J. Vélez-Zambrano  <https://orcid.org/0000-0002-0709-6338>
 S. Intra-Moreira  <https://orcid.org/0000-0003-4693-8806>
 F. Garcés-Fiallos  <https://orcid.org/0000-0002-1795-4439>

References

- Adhikari, M., Isaac, E., Paterson, R., & Maslin, M. (2020). A review of potential impacts of climate change on coffee cultivation and mycotoxigenic fungi. *Microorganisms*, 8(10), 1625. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101625>
- Aime, M. C. (2006). Toward resolving family-level relationships in rust fungi (Uredinales). *Mycoscience*, 47(3), 112-122. <https://doi.org/10.1007/s12067-006-0281-0>
- Andrade, C. C. L., de Resende, M. L.V., Moreira, S. I., Mathioni, S. M., Botelho, D. M. S., et al. (2021). Infection process and defense response of two distinct symptoms of Cercospora leaf spot in coffee leaves. *Phytoparasitica*, 49, 727-737. <https://doi.org/10.1007/s12060-021-00902-2>
- Aristizábal, L. & Johnson, M. (2022). Monitoring coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) on commercial coffee farms in Hawaii: Early Insights from the First Year of Disease Incursion. *Agronomy* 12 (5), 1134. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051134>
- Avelino, J., & Rivas, G. (2013). La roya anaranjada del café. *Archive ouverte HAL*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/Hal-01071036/>
- Belachew, K., Teferi, D. & Hagos, L. (2015). Coffee thread blight (*Corticium koleroga*): a coming threat for Ethiopian coffee production. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 6(9), 303. <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000303>
- Belan, L., de Jesus Junior, W. C., de Souza, A. F., Zambolim, L., Filho, J. C., Barbosa, D. H. S., & Moraes, W. B. (2020). Management of coffee leaf rust in *Coffea canephora* based on disease monitoring reduces fungicide use and management cost. *European Journal of Plant Pathology*, 156 (3), 683-694. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01917-6>
- Bhandari, S., Nepal, S., Banshtola, R., & Thapaliya, B. (2022). Ecofriendly management of Cercospora leaf spot, *Cercospora coffeicola* (Berk & M.A. Curtis) disease of coffee in Gulmi. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 7(127), 111-123. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2022-07.13>
- Bigirimana, J., Njoroge, K., Gahakwa, D., & Phiri, N. (2012). Incidence and severity of coffee leaf rust and other coffee pests and diseases in Rwanda. *African Journal of Agricultural Research*, 7(26), 3847-3852. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.955>
- Botelho, D., De Resende, M., Andrade, V., Pereira, A., Patricio, F., et al. (2017). Cercosporiosis resistance in coffee germplasm collection. *Euphytica*, 213(6), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10681-017-1901-9>
- Botelho, D. M. dos S., de Resende, M. L. V., de Rezende, J. C., Júnior, P. M. R., de Andrade, C. C. L., Alves, E., & Armal, D. C. (2019). Difference between isolates from brown eye spot and black spot lesions in coffee plants. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 54, e01423. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.01423>
- Botelho, D. M. dos S., de Resende, M. L. V., Teixeira, A. R., Santiago, W. D., Pozza, E. A., et al. (2021). Cercosporin production by *Cercospora coffeicola* isolates: spectrophotometry and HPLC quantification and image analysis. *Chemical Papers*, 76(4), 2567-2572. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01965-5>

- Botelho, D. M. dos S., de Resende, M. L. V., Andrade, V. T., Guerra-Guimarães, L. de C., Andrade, A. C., & Abrahão, J. C. de R. (2022). Heritability of aggressiveness components in *Cercospora coffeicola* isolates. *European Journal of Plant Pathology*, 164(4), 495-505. <https://doi.org/10.1007/s10658-022-02573-z>
- Brown, J. K. N., & Hovmöller, M. S. (2002). Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science*, 297(5581), 537-541. <https://doi.org/10.1126/science.1072678>
- Burt, E. A. (1918). *Corticium* Causing *Pellicularia* disease of the coffee, Hypochnose of Pomaceous fruits and *Rhizoctonia* disease. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 5(2), 119-132. <https://doi.org/10.2307/2990106>
- Capucho, A., Zambolim, L., Lopes, U., & Milagres, N. (2013). Chemical control of coffee leaf rust in *Coffea canephora* cv. conilon. *Australasian Plant Pathology*, 42(6), 667-673. <http://dx.doi.org/10.1007/s13313-013-0242-y>
- Cardoso, R. M. de L., Chaves, J., Fantin, D., & Lourenço, V. (2013). Efficiency of green manures for *Cercospora* leaf spot management in coffee plants. *Tropical Plant Pathology*, 38(2), 122 - 127. <https://doi.org/10.1590/s1982-56762013000200005>
- Carvalho, C., Fernandes, R., Almeida-Carvalho, G., Barreto, R., & Evans, H. (2011). Cryptosexuality and the genetic diversity paradox in coffee rust, *Hemileia vastatrix*. *Plos One* 6(11), e26387. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0026387>
- Castillo, N. E. T., Acosta, Y. A., Parra-Arroyo, L., Martínez-Prado, M. A., Rivas-Galindo, V. M., et al. (2022). Towards an eco-Friendly coffee rust control: Compilation of natural alternatives from a nutritional and antifungal perspective. *Plants*, 11, 2745. <https://doi.org/10.3390/plants11202745>
- Castro-Caicedo, B. L. (2003). Mal de Hilachas o Arañera. En L. F. Gil Vallejo, B. L. Castro Caicedo, & G. Cadena (Eds.), *Enfermedades del café en Colombia* (pp. 133–136). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0025_16
- Cavalcante, M., & Sales, F. (2001). Ocorrência da queima-do-fio (*Pellicularia koleroga*) em cafezais em Rio Branco. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa Acre, Rio Branco.
- Ceresini, P. C., Costa-Souza, E., Zala, M., Furtado, E. L. & Souza, N. L. (2012). Evidence that the *Ceratobasidium*-like white-thread blight and black rot fungal pathogens from persimmon and tea crops in the Brazilian atlantic forest agroecosystem are two distinct phylopecies. *Genetics and Molecular Biology*, 35(2), 480-497. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572012005000032>
- Cooke, M. (1881). *Cercospora coffeicola*. *Grevillea* 9, 99.
- Daivasikamani, S., Rajanaika. (2009). Biological control of coffee leaf rust pathogen, *Hemileia vastatrix* Berkeley and Broome using *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens*. *Journal of Biopesticides*, 2(1), 94-98.
- Daub, M., Herrero, S., & Chung, K. (2013). Reactive oxygen species in plant pathogenesis: The role of perylenequinone photosensitizers. *Antioxidants & Redox Signaling* 19, 970–989. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.5080>
- Dechassa, N. (2019). Occurrence, distribution, biology and management of coffee thread blight (*Corticium koleroga* (Cke) Hoehnel): a review. *Journal of Environment and Earth Science*, 9(2), 1-6. <https://doi.org/10.7176/JEES/9-2-01>
- Dechassa, N., Chala, A., Shikur, E. & Belachew, K. (2019). Evaluation of coffee genotypes to coffee thread blight disease in southwestern Ethiopia. *Pest Management Journal of Ethiopia* 22, 73-88.
- Dechassa, N., Chala, A., Belachew, K., & Shikur, E. (2020). Morphological characterization of *Corticium koleroga*, cause of thread blight on arabica coffee. *Pharmaceutical Science and Technology*, 4(2), 31-39. <https://doi.org/10.11648/j.pst.20200402.12>
- de Lima, R. F., de Oliveira Aparecido, L. E., Torsoni, G. B. Chiquito, A. G., Moraes, J. R., & Rolim, G. de S. (2022). Agroclimatic zoning for the incidence of brown eye spot on coffee under climate change scenarios. *Theoretical and Applied Climatology* 149, 1471–1496. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04123-3>
- de Melo, M., Matos, K., Moreira, S., Silva, F., Conceição, G., et al. (2018). Two new *Ceratobasidium* species causing white thread blight on tropical plants in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 43, 559–571. <https://doi.org/10.1007/s40858-018-0237-x>
- de Paula, P., Pozza, E., Santos, L., Chaves, E., Maciel, M., & Paula, J. (2016). Diagrammatic scales for assessing brown eye spot (*Cercospora coffeicola*) in red and yellow coffee cherries. *Journal of Phytopathology*, 164(10), 791-800. <https://doi.org/10.1111/jph.12499>
- De Paula, P. H. A., Pozza, E. A., Alves, E., Moreira, S. G., Paula, J. C. A., & Santos, L. A. (2019). Infection process of *Cercospora coffeicola* in immature coffee fruits. *Coffee Science*, 14(1), 127-130.
- de Resende, M. L. V., Pozza, E. A., Reichel, T. & Botelho, D. M. S. (2021). Strategies for coffee leaf rust management in organic crop systems. *Agronomy*, 11(9), 1865. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091865>
- Daglia, M., Papetti, A., Gregotti, C., Berte, F., & Gazzani, G. (2000). *In vitro* antioxidant and *ex vivo* protective activities of green and roasted coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 1449–1454. <https://doi.org/10.1021/jf990510g>
- De Sousa, L. A., Cipriano, M. A. P., Da Silva, M. L., Patrício, F. R. A., Freitas, S. D. S., Carazzolle, M. F., & Mondego, J. M. C. (2022). Functional genomics analysis of a phyllospheric *Pseudomonas* spp with potential for biological control against coffee rust. *BMC Microbiology*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12866-022-02637-4>
- Djuikem, C., Grogard, F., Wafo, R., Touzeau, S. Bowong, S. (2021). Modelling coffee leaf rust dynamics to control its spread. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, 16, 26. <https://doi.org/10.1051/mmnp/2021018>
- Durand-Bessart, C., Tixier, P., Quinteros, A., Andreotti, F., Rapidel, B., Tauvel, C., & Allinne, C. (2020). Analysis of interactions amongst shade trees, coffee foliar diseases and coffee yield in multistrata agroforestry systems. *Crop Protection*, 133, 105137. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105137>
- Echeverri, J. (1979). La roya del café en el Perú. Boletín de Promecafé (Costa Rica) no. 2:2-3.
- Echeverri, J. (1980). Fitomejoramiento genético del café con énfasis en resistencia a la roya (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) en México, Centroamérica y Panamá. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). 110 p.
- EPO. (2002). *Cercospora coffeicola* (CERCCO) EPO Global Database. EPO Global Database. Recuperado 24 de noviembre de 2022, de <https://gd.eppo.int/taxon/CERCCO>.
- Esgario, J., de Castro, P., Tassis, L., & Krohling, R. (2022). An app to assist farmers in the identification of diseases and pests of coffee leaves using deep learning. *Information Processing in Agriculture*, 9(1), 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.01.004>
- Fernandes, R., Evans, H., & Barreto, R. (2009). Confirmation of the occurrence of teliospores of *Hemileia vastatrix* in Brazil with observations on their mode of germination. *Tropical Plant Pathology*, 34(2), 108–113. <https://doi.org/10.1590/s1982-56762009000200005>
- Fernández-Borrero, O., Cadena, G., Lopez, D., Buitrago, S., & Arango, B. (1982). La mancha de hierro del caféto (*Cercospora coffeicola* Berk. & Cooke), biología, epidemiología y control. In: 10 Colloque Scientifique International Sur le Café, Salvador (Brasil), pp 11–14.
- Gamarra, D., Suarez, G., Samaniego, J., & Izarra, H. (2016). Caracterización y manejo integrado de la roya amarilla del café en Selva Central del Perú. *Convicciones*, 2(1), 6-17.
- Gil-Vallejo, L. (2003). Roya harinosa: *Hemileia coffeicola* Maub. et Rog. *Enfermedades del caféto en Colombia*, 213-216. https://doi.org/10.38141/10791/0025_27.

- Gómez-De La Cruz, I., Pérez-Portilla, E., Escamilla-Prado, E., Martínez-Bolaños, M., & Carrión-Villanovo, G., Hernández-Leal, T. (2018). Selección *in vitro* de micoparásitos con potencial de control biológico sobre roya del café (*Hemileia vastatrix*). *Mexican Journal of Phytopathology*, 36 (1). <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1708-1>
- Gómez-de la Cruz, I., Guillén-Navarro, K., Huerta-Palacios, G., García-Fajardo, L.V., & Martínez-Bolaños, M. (2022). Enzyme activity of three mycoparasite isolates and their effect on Coffee Leaf Rust (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.). *Symbiosis*, 88, 47–59. <https://doi.org/10.1007/s13199-022-00885-6>
- Haddad, F., Maffia, L. A., Mizubuti, E. S., & Teixeira, H. (2009). Biological control of coffee rust by antagonistic bacteria under field conditions in Brazil. *Biological Control*, 49 (2), 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.02.004>
- Hajian-Forooshani, Z., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2022). Novel community assembly and the control of a fungal pathogen in coffee agroecosystems. *Biological Control*, 177, 105099. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105099>
- Harelimana, A., Rukazambuga, D. & Hance, T. (2022). Pests and diseases regulation in coffee agroecosystems by management systems and resistance in changing climate conditions: a review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 129, 1041–1052. <https://doi.org/10.1007/s41348-022-00628-1>
- INIAP. (1981). Políticas y objetivos del programa de investigación en café. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria informativo Técnico, No. 1, Estación Exp. Tropical, Pichilingue, Ecuador.
- Jackson, D., Skillman, J., & Vandermeer, J. (2012). Indirect biological control of the coffee leaf rust, *Hemileia vastatrix*, by the entomogenous fungus *Lecanicillium lecanii* in a complex coffee agroecosystem. *Biological Control*, 61(1), 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2012.01.004>
- Jansen, E. (2005). Plant Protection in Coffee Recommendations for the Common Code for the Coffee Community Initiative. Common Code for the Coffee Community, 52.
- Keith, L., Sugiyama, L., Brill, E., Adams, B., Fukada, M., et al. (2022). First report of coffee leaf rust caused by *Hemileia vastatrix* on coffee (*Coffea arabica*) in Hawaii. *Plant Disease*, 106 (2), 761. <https://doi.org/10.1094/pdis-05-21-1072-pdn>
- Khan, J., Rio, L., Nelson, R., Rivera-Varas, V., Secor, G., & Khan, M. (2008). Survival, dispersal, and primary infection site for *Cercospora beticola* in sugar beet. *Plant Disease*, 92 (5), 741-745. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-5-0741>
- Kolmer, J. A., Ordonez, M. E., & Groth, J. V. (2009). The Rust Fungi. In: Encyclopedia of Life Sciences (ELS). John Wiley & Sons, Ltd: Chichester
- Koutouleas, A., Jørgen Lyngs Jørgensen, H., Jensen, B., Lillesø, J. B., Junge, A., & Ræbild, A. (2019). On the hunt for the alternate host of *Hemileia vastatrix*. *Ecology and Evolution*, 9(23), 13619-13631. <https://doi.org/10.1002/ece3.5755>
- Koutouleas, A., Sarzynski, T., Bordeaux, M., Bosselmann, A. S., Campa, C., et al. (2022). Shaded-coffee: A nature-based strategy for coffee production under climate change? A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 877476. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.877476>
- Kumar, M., Gupta, P., Madhav, P., & Sachin. (2020). Disease Detection in Coffee Plants Using Convolutional Neural Network. 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). <https://doi.org/10.1109/icc48766.2020.9138000>
- Kushalappa, A., & Eskes, A. (1989). Advances in coffee rust research. *Annual Review of Phytopathology*, 27 (1), 503-531. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.27.090189.002443>
- Laborde, M., Botelho, D., Rodríguez, G., Resende, M., de Queiroz, M., et al. (2018). *Phialomyces macrosporus* reduces *Cercospora coffeicola* survival on symptomatic coffee leaves. *Coffee Science, Lavras*, 14 (1), 1-11. <http://dx.doi.org/10.25186/cs.v14i1.1448>
- la Torre, A., Iovino, V., & Caradonia, F. (2018). Copper in plant protection: Current situation and prospects. *Phytopathol. Mediterr*, 57, 201–236. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-23407
- Lu, L., Tibpromma, S., Karunarathna, S., Jayawardena, R., Lumyong, S., Xu, J., & Hyde, K. (2022). Comprehensive review of fungi on coffee. *Pathogens*, 11(4), 411. <https://doi.org/10.3390/pathogens11040411>
- Machenahalli, S., Ranjini, A., Giri, S., Sudhaand, M., & Daivasikamani, S. (2019). Efficacy of fungicides against coffee brown eye spot disease caused by *Cercospora coffeicola*. *Journal of Plant Diseases Sciences*, 14(2), 124-128.
- Martínez, J., Palazzo, D., Karazawa, M., Monteiro, M., & Reu, N. (1975). Presença de esporos de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br., agente causal da ferrugem do cafeeiro, em diferentes altitudes, nas principais áreas, cafeiras dos Estados de São Paulo e Paraná (Brasil). *Biológico*, 41, 77–88.
- Mathew, K. (1953). Studies on black rot of coffee. Doctoral Dissertation. *University of Madras Botany laboratory*, India, Madras.
- Medeiros, A. (1970). Informe sobre *Hemileia vastatrix* en café, en Bahia, Brasil. Comi. Exec. Pl. Recup. Econ. Rural Lav. Cacaueira, Rio de Janeiro 41.
- McTaggart, A., Shivas, R., van der Nest, M., Roux, J., Wingfield, B., & Wingfield, M. (2016). Host jumps shaped the diversity of extant rust fungi (Pucciniales). *New Phytologist*, 209(3), 1149-1158. <https://doi.org/10.1111/nph.13686>
- McTaggart, A. R., du Plessis, E., Roux, J., Barnes, I., Fraser, S., et al. (2019). Sexual reproduction in populations of *Austropuccinia psidii*. *European Journal of Plant Pathology*, 156(2), 537-545. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01903-y>
- Mohammednur, T. & Yesuf. (2021). Review on coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) and its management in Ethiopia. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, 8, 5-13. <https://doi.org/10.22259/2349-476X.0804002>
- Motisi, N., Bommel, P., Leclerc, G., Robin, M-H., Aubertot, J-N., et al. (2022). Improved forecasting of coffee leaf rust by qualitative modeling: Design and expert validation of the ExpeRoya model. *Agricultural Systems*, 197, 103352. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103352>
- Müller, A., Berry, D., Avelino, J., & Biesse, D. (2009). Coffee Diseases. In: Wintgens, J. N. Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers, pp. 495-549. <https://doi.org/10.1002/9783527619627.ch18>
- Naik, B. S., Kim, S., Seenaiyah, R., Basha, P. O., & Song, E. Y. (2021). Coffee cultivation techniques, impact of climate change on coffee production, role of nanoparticles and molecular markers in coffee crop improvement, and challenges. *Journal of Plant Biotechnology*, 48(4), 207-222. <https://doi.org/10.5010/jpb.2021.48.4.207>
- Narasimhan, J. (1933). Black rot of coffee in Mysore. *Phytopathology*, 23, 875-886.
- NationMaster. (2021). Coffee Production - Source FAO. Obtenido de: <https://www.nationmaster.com/nmx/ranking/coffee-production-fao>
- Nelson, S. (2008). *Cercospora* leaf spot and berry blotch of coffee. *Plant Diseases*, 41, 1-6.
- Noack F. (1901) Die Krankheiten des Kaffeebaumes in Brasilien. *Z Pflkrankh Pflschutz*, 11, 196–203.
- Ogundéji, B., Olalekan-Adeniran, M., Orimogunje, O., Awoyemi, S., Yekini, B., Adewoye, G., & Bankole, I. (2019). Climate hazards and the changing world of coffee pests and diseases in Sub-Saharan Africa. *Journal of Experimental Agriculture International*, 41(6), 1-12. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v41i630429>
- OIRSA. (1976). Informe sobre la situación y acción tomada en la República de Nicaragua con relación a la roya del café (*Hemileia vastatrix*). Departamento de Sanidad Vegetal, OIRSA, San Salvador, El Salvador. 30 pp.

- Paiva, B. R. T. L. (2013). Progress of *Cercospora* leaf spot in coffee under different irrigation management systems and planting densities. *Coffee Science*, 8(2), 158-167.
- Patrício, F., Almeida, I., Barros, B., Santos, A., & Frare, P. (2008). Effectiveness of acibenzolar-S-methyl, fungicides and antibiotics for the control of brown eye spot, bacterial blight, brown leaf spot and coffee rust in coffee. *Annals of Applied Biology*, 152 (1), 29-39. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00187.x>
- Pereira, F., Carvalho, S., Viana, M., Vidal, D., Ferreira, G., Silva, J., & Sâmia, M. (2019). Selection of coffee progenies with large beans resistant to rust and *Cercospora* leaf spot. *Coffee Science*, 14 (1), 67. <https://doi.org/10.25186/cs.v14i1.1529>
- Pereira, D., Nadaleti, D., Rodrigues, E., Silva, A., Malta, M., Carvalho, S., & Carvalho, G. (2020). Genetic and chemical control of coffee rust (*Hemileia vastatrix* Berk et Br.): impacts on coffee (*Coffea arabica* L.) quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101 (7), 2836-2845. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10914>
- Pérez, C., Pozza, E., Pozza, de Freitas, A., Silva, M., & da Silva, D. (2019). Impact of nitrogen and potassium on coffee rust. *European Journal of Plant Pathology*, 155 (1), 219-229. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01765-4>
- Pilozo, W., Indacochea, B., Castro, A., Vera, M., & Ortega, J. (2022). Principales enfermedades causantes de la pérdida de rendimientos de los cultivos de café arábigo (*Coffea arabica* L.) en la zona sur de Manabí, Ecuador. UNESUM-Ciencias: *Revista Científica Multidisciplinaria*, 6 (2), 117-134.
- Quevedo, J. (2014). Evaluación de tres niveles de sombra y aplicación de oxiclورو de cobre para el control de koleroga (*Pellicularia koleroga* Cooke), en el cultivo del café (*Coffea arabica* L.), en el patrimonio agrario colectivo Morelia, San Pedro Yepocapa, Chimaltenango, Guatemala, CA (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Ramírez-Camejo, L. A., Earnvijarn, A., Díaz-Valderrama, J. R., Karlsen-Ayala, E., Koch, R., et al. (2022). Global analysis of *Hemileia vastatrix* populations shows clonal reproduction for the coffee leaf rust pathogen throughout most of its range. *Phytopathology*, 112, 643-652. <https://doi.org/10.1094/phyto-06-21-0255-r>
- Ramos, J., de Resende, M., & Andrade, M. (2022). Quantification of cercosporin from coffee leaves infected by *Cercospora coffeicola*. *Australasian Plant Pathology*, 51, 429-432. <https://doi.org/10.1007/s13313-022-00868-7>
- Ravindran, K., Sivaramakrishnan, S., Hussain, M., Dash, C. K., Bamisile, B. S., Qasim, M., & Liande, W. (2018). Investigation and molecular docking studies of bassianolide from *Lecanicillium lecanii* against *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Comparative Biochemistry and Physiology C-toxicology & Pharmacology*, 206-207, 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2018.03.004>
- Rayner, R. W. (1961). Germination and penetration studies on coffee rust (*Hemileia vastatrix* B. & Br.). *Annals of Applied Biology*, 49(3), 497-505. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1961.tb03641.x>
- Rodrigues, C. (1990). Coffee rusts: history, taxonomy, morphology, distribution and host resistance. *Fitopatologia Brasileira*, 15, 5-9.
- Rosseti, V., Alves, M., Clement, C. (1982). Ocorrência de *Pellicularia koleroga* empomare scitricosna amazonia. *Fitopatologia Brasileira* 7, 518-526.
- Samuels, G. J., Ismaiel, A., Rosmana, A., Junaid, M., Guest, D., McMahon, P. L., Keane, P. J., Purwantara, A., Lambert, S., Rodriguez-Carres, M., & Cubeta, M. A. (2012). Vascular streak dieback of cacao in southeast Asia and Melanesia: in planta detection of the pathogen and a new taxonomy. *Fungal Biology*, 116(1), 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2011.07.009>
- Segura-Escobar, M. (2017). Efectos de la sombra de cashá (*Chloroleucon eurycyclum*) en el cultivo del café (*Coffea arabica*) sobre los procesos de esporulación, dispersión a través del agua y deposición de *Hemileia vastatrix*, en Turrialba, Costa Rica. <http://agritrop.cirad.fr/583603/>
- Sera, G., Sera, T., Ito, D., Azevedo, J., Mata, J., Doi, D., & Ribeiro, C. (2007). Selection for durable resistance to leaf rust using test-crosses on IAPAR-59 and Tupi IAC 1669-33 cultivars of *Coffea arabica*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 50 (4), 565-570. <https://doi.org/10.1590/s1516-89132007000400001>
- Sera, G., de Carvalho, C., de Rezende, J., Pozza, E., Matiello, J., et al. (2022). Coffee leaf rust in Brazil: Historical events, current situation, and control measures. *Agronomy*, 12 (2), 496. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020496>
- Schieber, E., & Sánchez, A. (1982). First report of Coffee rust in Guatemala. *Plant Disease*, 66, 855-856.
- Shattock, R. C., & Preece, T. F. (2000). Tranzschel revisited: modern studies of the relatedness of different rust fungi confirm his law. *Mycologist*, 14(3), 113-117. [https://doi.org/10.1016/s0269-915x\(00\)80086-5](https://doi.org/10.1016/s0269-915x(00)80086-5)
- Shigueoka, L., Sera, G., Sera, T., Fonseca, I., Mariucci, V., et al. (2014). Seleção de progênies de café arábica com resistência à ferrugem alaranjada. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 14 (2), 88-93. <https://doi.org/10.1590/1984-70332014v14n2a16>
- Silva, H., Tozzi, J., Terrasan, C., & Bettiol, W. (2012). Endophytic microorganisms from coffee tissues as plant growth promoters and biocontrol agents of coffee leaf rust. *Biological Control*, 63 (1), 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2012.06.005>
- Sirinunta A., & Akarapisan, A. (2015). Screening of antagonist bacteria for controlling *Cercospora coffeicola* in arabica coffee. *Journal of Agricultural Technology*, 11(5): 1209-1218.
- Sotomayor, H.I. & Duicela, G.L. (1995). Control Integrado de las principales enfermedades foliares del café en el Ecuador. Estación Experimental Tropical Pichilingue. Programa Nacional de Cacao y Café Quevedo – Ecuador. P 49.
- Souza, A. G. C., Maffia, L. A., & Mizubuti, E. S. G. (2012). Cultural and aggressiveness variability of *Cercospora coffeicola*. *Journal of Phytopathology*, 160(10), 540-546. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2012.01947.x>
- Souza, A., Rodrigues, F., Maffia, L., & Mizubuti, E. (2010). Infection process of *Cercospora coffeicola* on coffee leaf. *Journal of Phytopathology* 159, 6-11. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2010.01710.x>
- Sudhakar, B., & Shankara, B. (1992). In vitro studies on the efficacy of fungicides against *Koleroga noxia* on Coffee. *Coffee Research*, 22, 57-64.
- Sudhakar, B., & Shankara, B. (1995). Effect of bavistin 50 WP and Bordeaux mixture for the control of black rot and their impact on coffee yield. *Coffee Research*, 25, 35-41.
- Sutton, C., & Peng, G. (1993). Manipulation and vectoring of biocontrol organisms to manage foliage and fruit diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 1, 473-493.
- Swamy, K. M., Naik, M. K., ..., & Rekha, D. (2012). Survival ability of *Cercospora capsici* infecting chilli (*Capsicum annum*). *Journal of Mycopathological Research*, 50(2), 341-343.
- Talhinhas, P., Batista, D., Diniz, I., Vieira, A., Silva, D., Loureiro, A., Tavares, S., Pereira, A., Azinheira, H., Guerra-Guimarães, L., Várzea, V., & Silva, M. (2017). The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. *Molecular Plant Pathology*, 18 (8), 1039-1051. <https://doi.org/10.1111/mpp.12512>
- Teferi, D., Adugna, G., Jafuka, C., Tesfaye, S., Zeru, A., & Mesfin, S. (2008). Dynamics of sporadic diseases of coffee in Ethiopia: A review. In: Diversity and Knowledge; Proceeding of National Workshop Four Decades of Coffee Research and Development in Ethiopia. pp. 267-270.
- Tims, C., Mills, J., & Exner, B. (1954). Thread Blight (*Pellicularia koleroga*) in Louisiana. *Plant Disease*, 38, 634-637.
- Vale, P. A. S., De Resende, M. L. V., Botelho, D. M. D. S., Pozza, E. A., Ogoshi, C., Monteiro, A., Costa, B. M., & Vasconcelos, V. D. (2019). Temperature, incubation time and virulence of *Cercospora coffeicola* in the production of cercosporin. *Journal of Phytopathology*, 167(7-8), 371-379. <https://doi.org/10.1111/jph.12802>

- Vale, P. A. S., de Resende, M. L. V., dos Santos Botelho, D. M. dos S., de Andrade, C. C., Alves, E., et al. (2021). Epitypification of *Cercospora coffeicola* and its involvement with two different symptoms on coffee leaves in Brazil. *European Journal of Plant Pathology*, 159, 399–408. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-02170-y>
- Vásquez, G. (1983). Coffee rust in Mexico. *Plant Disease*, 67(4), 450. <https://doi.org/10.1094/pd-67-450>
- Venkatarayan, S. (1949). The validity of the name *Pellicularia koleroga* Cooke. *Indian Phytopathology*, 2, 186–189.
- Ventura, J., Costa, H., & Lima, I. (2017). Manejo de pragas do café conilon. In: Ferrão RG, da Fonseca AFA, Ferrão MAG, de Muner LH, editors. *Café Conilon*. Vitória, ES, 2nd ed., Incaper. p. 434–79.
- Ventura, J., Costa, H., & Lima, I. (2019). Conilon coffee disease management. En R. G. Ferrão, A. F. A. da Fonseca, M. A. G. Ferrão & L. H. de Muner (Eds.), *Conilon Coffee* (3.a ed.). Incaper.
- Vilela, M. S., Resende, L. S., Pozza, E. A., Netto, P. M., Roteli, K. de C., & Guimarães, R. J. (2022). Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on the incidence of brown eye spot in coffee crop in vegetative stage. *Tropical Plant Pathology*, 47, 672–684. <https://doi.org/10.1007/s40858-022-00523-y>
- Von Höhnelt, F. (1910). Fragments Zur Mykologie. X. Sitzungber. K. Akad. Wiss. Wien, Math-Natur. Wiss. Klass. 199. 395.
- Waller, J. M. (1982). Coffee rust – epidemiology and control. *Crop Protection*, 1, 385–404. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(82\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0261-2194(82)90022-9)
- Wang, N., Jassogne, L., van Asten, P., Mukasa, D., Wanyama, I., Kagezi, G., & Giller, K. (2015). Evaluating coffee yield gaps and important biotic, abiotic, and management factors limiting coffee production in Uganda. *European Journal of Agronomy*, 63, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.11.003>
- Xie, T., Jiang, L., Li, J., Hong, B., Wang, X., & Jia, Y. (2019). Effects of *Lecanicillium lecanii* strain JMC-01 on the physiology, biochemistry, and mortality of *Bemisia tabaci* Q-biotype nymphs. *Zoological Science*, 7, e7690. <https://doi.org/10.7717/peerj.7690>
- Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 41 (1), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>