

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2025,
Volumen 9, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS Y METEOROLÓGICAS EN EL DESARROLLO DE LA SEVERIDAD DE LA ROYA DEL CAFÉ

ASSESSMENT OF CLIMATIC AND METEOROLOGICAL CONDITIONS IN THE DEVELOPMENT OF COFFEE RUST SEVERITY

Ramiro Eleazar Ruiz Nájera

Universidad Autónoma de Chiapas, México

Itzayara Alvarado Cruz

Universidad Autónoma de Chiapas, México

Juan Manuel Sánchez Yañez

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, México

José Galdámez Galdámez

Universidad Autónoma de Chiapas, México

Pedro Antonio Núñez Ramos

Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales-IDIAF,
República Dominicana

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.16973

Evaluación de las Condiciones Climáticas y Meteorológicas en el Desarrollo de la Severidad de la Roya del Café

Ramiro Eleazar Ruiz Nájera¹

ramiro.ruiz@unach.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2815-8689>

Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de
Ciencias Agronómicas
Chiapas, México

Itzayara Alvarado Cruz

itzayara.alvarado@unach.mx

<https://orcid.org/0009-0003-6316-3181>

Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de
Ciencias Agronómicas
Chiapas, México

Juan Manuel Sánchez Yañez

syanez@umich.mx

<https://orcid.org/0000-0002-2276-8446>

Biological Research Institute, Universidad
Michoacana de San Nicolas de Hidalgo
México

José Galdámez Galdámez

jose.galdamez@unach.mx

<https://orcid.org/0000-0002-2931-1596>

Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de
Ciencias Agronómicas
Chiapas, México

Pedro Antonio Núñez Ramos

pnunez@idiaf.gov.do

pnunez58@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7580-7931>

Instituto Dominicano de Investigaciones
Agropecuarias y Forestales-IDIAF
República Dominicana

¹ Autor principal

Correspondencia: ramiro.ruiz@unach.mx

RESUMEN

Los factores climáticos y meteorológicos influyen en el desarrollo de la planta de café (*Coffea arabica* L.) y en la severidad de la roya (*Hemileia vastatrix* Berk & Br). El objetivo de esta investigación fue construir el escenario base mediante los datos de temperatura y precipitación de un periodo de 36 años y determinar la influencia de las variables meteorológicas sobre los estados de desarrollo de la planta del café y de la roya durante el ciclo del cultivo 2016-2017. Se analizaron las tendencias o ciclos a largo plazo con medias anuales de TA, PP, severidad; y la evapotranspiración fue mediante un modelo de regresión lineal. Los años más lluviosos fueron 1998 con 2704 mm, 1999 con 2639 mm, 2005 con 2035,7 mm, 2013 con 2356 mm de promedio anual, y el menos lluvioso fue 2012 con 951,09 mm. Las medias anuales de temperatura y precipitación tuvieron una tendencia a la baja respecto a la media del año 1992. La precipitación pluvial (PP), la evapotranspiración ambiental (ETP), la temperatura ambiente (TA) y la humedad relativa (HR) favorecieron la severidad de la roya del café. El total de grados días acumulados (GDA) para las fases fenológicas del café fue de 3696,3; y para la severidad de la roya fue 2237,2 GDA. La comparación de los GDA con la severidad tuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,80; la comparación de la HR con la severidad (R^2) de 0,70, y la comparación de los GDA con la ETP (R^2) de 0,99. Finalmente, la zona cafetalera resultó ser una selva tropical lluviosa con un periodo de sequía en invierno. Los resultados permiten comprobar que el uso del modelo grados días acumulados es muy factible para la predicción de eventos biológicos.

Palabras clave: pronóstico, grados día, roya, tiempo fisiológico



Assessment of Climatic and Meteorological Conditions in the Development of Coffee Rust Severity

ABSTRACT

Climatic and meteorological factors influence the development of the coffee plant (*Coffea arabica* L.) and the severity of rust (*Hemileia vastatrix* Berk & Br). The objective of this research was to construct the baseline scenario using temperature and precipitation data from a 36-year period and to determine the influence of meteorological variables on the developmental stages of the coffee plant and rust during the 2016-2017 crop cycle. Long-term trends or cycles were analyzed with annual means of TA, PP, severity; and evapotranspiration was through a linear regression model. The wettest years were 1998 with 2704 mm, 1999 with 2639 mm, 2005 with 2035.7 mm, 2013 with 2356 mm annual average, and the least rainy was 2012 with 951.09 mm. The annual averages of temperature and precipitation had a downward trend with respect to the 1992 average. Rainfall (PP), environmental evapotranspiration (ETP), ambient temperature (TA) and relative humidity (RH) favored the severity of coffee rust. The total cumulative degree days (GDA) for coffee phenological stages was 3696.3; and for rust severity it was 2237.2 GDA. The comparison of GDA with severity had a coefficient of determination (R^2) of 0.80; the comparison of RH with severity (R^2) of 0.70, and the comparison of GDA with ETP (R^2) of 0.99. Finally, the coffee-growing area turned out to be a tropical rainforest with a dry period in winter. The results show that the use of the accumulated degree days model is very feasible for the prediction of biological events.

Keywords: prediction, degree/day, rust, Physiological duration

Artículo recibido: 11 febrero 2025

Aceptado para publicación: 15 marzo 2025



INTRODUCCIÓN

El clima se define como las condiciones meteorológicas medias que caracterizan a un lugar determinado (SeNaMHi, 2018), es una síntesis del tiempo atmosférico obtenida a partir de estadísticas a largo plazo. Sus principales componentes meteorológicos considerados son la temperatura, la presión el viento, humedad y precipitación (Rodríguez, J, Capa, Á y Portela L. (2004).

La diferencia entre el clima y tiempo meteorológico, radica en que la meteorología describe únicamente las condiciones de corto plazo de las variables previamente señaladas de una región en particular. De esta forma, el clima de una región está conformado por sus propios datos estadísticos de dicho lugar o región analizados a lo largo de un plazo relativamente largo, no menor de 30 años (Monkhouse, 1978). Tanto el clima como la meteorología, están sujetos a variaciones inevitables y tienen influencia sobre todos los seres vivos del planeta modificando su crecimiento, desarrollo (Baig, I, Chandio A, Ozturk, I, Kumar P, Khan Z, and Salam M, 2022), fuentes hídricas, los suelos, la biodiversidad y los ecosistemas, incluido el desarrollo social (Fernández-Cortés, Sotto-Rodríguez y Vargas-Marín, L, 2020), como resultado de las pérdidas ambientales y económicas presentes y futuras (Yang, L. N., Ren, M., & Zhan, J, 2023). Estos efectos ya son tangibles; en los últimos 50 años, la temperatura media ha aumentado 1,1 °C, muy por encima de la normal climatológica.

Asimismo, las temperaturas máximas y mínimas presentaron una tendencia hacia un incremento de las noches cálidas y una disminución de las noches frías en todo el país, razón por la que se pronostica que en el periodo que va del 2015 - 2039 se registren cambios en la temperatura media anual en todo el territorio con incrementos entre 1,5 y 2 °C (IPCC, 2023).

Estos cambios de clima están favoreciendo la reproducción y la dispersión de muchos patógenos de plantas cultivadas, constituyendo una amenaza para la seguridad alimentaria, además de modificar su estructura de las poblaciones nativas de plantas, animales, y alterar sus rangos geográficos, fenológicos (Chen, I, Hill, J., Ohlemüller, R., Roy, B., and Thomas, C, 2011) e interacciones entre los cultivos y los patógenos (Bebber, P., Castillo-Delgado, A., and Gurr, J, 2016).

La virulencia de los fitopatógenos está correlacionada con el cambio climático, por lo tanto, es de suma importancia valorar y cuantificar su influencia directa e indirecta, para predecir las pérdidas de carácter económico y ecológico en un futuro cercano. A este respecto Bussell, E. H., Dangerfield, C. E., Gilligan,



C. A., & Cunniffe, N. J, (2019) diseñaron modelos de simulación mediante ordenadores para intentar evaluar las pérdidas causados por fitopatógenos en los cultivos.

En el caso particular del cultivo del café (*Coffea arabica* L.), se ha evaluado el impacto de algunas variables climáticas sobre las fases fenológicas utilizando gráficas ombrotérmicas, que identifican los incrementos de la temperatura y las variaciones de las precipitaciones, así como su alcance sobre el crecimiento y el desarrollo del cultivo (Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C. y Hernández, J, 2009).

La roya del café *Hemileia vastatrix* es el prototipo de hongo que ha registrado una mayor patogenicidad debido principalmente a los cambios en la precipitación y la temperatura, ha favorecido su dispersión en todas las regiones cafetaleras (Pérez-Fernández, Y., González-Santiago, M. V., Escamilla-Prado, E., Cruz-León, A., Rosas-Brugada, M. y Ruiz-Espinoza, F, 2016). Así como el incremento de los daños en el cultivo y de las pérdidas de las exportaciones, cercanas al 37 % según la Organización Internacional del Café, ICO (2019).

En la región cafetalera de Coatepec, Veracruz (México), Se ha acentuado la incidencia y la severidad de la roya del café y de otras enfermedades fúngicas a causa de incrementos de la temperatura máxima (0,2 °C década⁻¹) y mínima (0,3 °C década⁻¹), así como la precipitación pluvial y su intensidad diaria (Parada-Molina, P. C., Cerdán-Cabrera, C. R., Ortiz-Ceballos, G., Cervantes-Pérez, J. y Barradas-Miranda, V. L, 2020a).

En Chiapas (México), en cambio, la variación climática ha sido imperceptible. No obstante, es importante profundizar en el análisis de los casos de Malpaso y Tapachula, donde se han registrado aumentos de la temperatura y disminución de las precipitaciones. Sin embargo, en Altamirano, Motozintla y Tonalá se ha observado una tendencia a incrementar las precipitaciones, según el Consejo Consultivo de Cambio Climático del Estado de Chiapas CCCCCh (2019), originando una modificación de la longitud del periodo de emergencia-antesis o antesis-llenado de grano de los cultivos y sus enemigos naturales (Shim, D., Kyu-Jong, L., and Byun-Woo, L, 2017).

Las variaciones climáticas pueden potenciar o reprimir la incidencia y la gravedad de las enfermedades (Bebber, P. D., Castillo-Delgado, A., and Gurr, J. S, 2016). La sombra de los árboles juega un papel muy importante en la regulación del microclima dentro del sistema de producción de café, ya que



aumenta la cantidad de materia orgánica en el suelo, conserva cantidades importantes de humedad, evita la erosión del suelo e incorpora carbono (Villarreyana, R., Avelino, J. y Cerda, R, 2020), aunque pueden favorecer el incremento de las enfermedades fungosas (Sánchez-Castillo, V., Avendaño-Pizo, Y., Gaviria-Astudillo, A., y Gómez, C, 2018), especialmente la roya, cuya tasa de incidencia y severidad está correlacionada con las temperaturas y las precipitaciones pluviales (Hinnah, F., Sentelhas, P., Alves, C., and Naves, R, 2018).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue construir el escenario base mediante los datos de temperatura y precipitación de un periodo de 36 años y determinar la influencia de las variables meteorológicas sobre los estados de desarrollo de la planta del café y de la roya durante el ciclo del cultivo 2016-2017.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del trabajo de investigación

Para la construcción del escenario climático base de la zona de estudio, se obtuvo información de la estación meteorológica de la finca Cuxtepeques, ubicada en el municipio de La Concordia (Chiapas, México) entre las coordenadas 15°43'51" N y 92° 57' 57" W, a una altitud de 1 550.0 msnm, (Mapcarta, s.f.). Se creó una base de datos con la media anual de las principales variables climáticas durante un período de 36 años (Figura 1).

Asimismo, las mediciones de las variables fenológicas y de severidad de la roya durante el ciclo agrícola 2016-2017 se llevaron a cabo en la Ranchería 30 de Agosto, con una altitud de 937 msnm, en el municipio de La Concordia, Chiapas. Esta localidad, situada en el paralelo 15°76'14" N y el meridiano 92°96'64" W, se encuentra en los límites de la zona de amortiguamiento de la reserva de la biosfera El Triunfo. Tiene una precipitación pluvial promedio anual de 1 578 mm y una temperatura media anual de 24,1 °C (Mapcarta, s.f.) (Figura 1).

Escenario base durante 36 años

Con base en la información climática obtenida, se construyó el diagrama ombrotérmico mediante el modelo $P = 2t + 14$ (García, 2004) y, para analizar las tendencias, se utilizó la técnica de suavizado (Smith y Smith, 2007), con la finalidad de eliminar las variaciones a corto plazo y permitir observar las tendencias a largo plazo con mayor claridad.



Estimación del periodo de crecimiento del cultivo de café con disponibilidad de agua

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, por sus siglas en inglés: Food and Agriculture Organization) FAO, (1978; 1981), a partir de la precipitación y la evapotranspiración potencial se derivan cuatro tipos de estación de crecimiento: estación de crecimiento normal cuando la precipitación es superior a la evapotranspiración potencial mínima en un mes; estación de crecimiento intermedia cuando la precipitación es menor que la ETP pero mayor que la ETP (0.5) al menos en un mes; estación de crecimiento húmeda cuando la precipitación es mayor a la ETP todo el año; y estación de crecimiento seca cuando la precipitación es menor que la ETP (0.5) por año. Los cálculos del periodo de crecimiento del cultivo y de la roya, se llevaron a cabo con los datos de precipitación del ciclo de cultivo 2016-2017.

Efecto de la precipitación pluvial (PP), temperatura ambiente (TA) y humedad relativa (HR) sobre la severidad de la roya *H. vastatrix* en el ciclo 2016-2017

Mediante los datos meteorológicos mensuales del ciclo de cultivo 2016 y 2017, se relacionó la severidad de la enfermedad (Figura 2). Teniendo en cuenta la temperatura y la humedad diaria, se realizaron análisis de regresión (Qiu, Y., Fu, B., Wang, J., Chen, L., Meng, Q., & Zhang, Y, 2010). Para obtener los coeficientes, se utilizó el método recomendado por Nutman, F. J., Roberts, F. M., and Clarke, R. T, (1963), que influye sobre la germinación de la urediniospora de la roya en el tejido vegetal en función de la temperatura ambiente.

La humedad relativa se calculó con el modelo sugerido por Castellví, F., Pérez, P. J., Villar, J. M., and Rosell, J. L, (1996).

$$RH = 100 \frac{e_s(T_n)}{e_s(T_m)}$$

Ecuación 1

Donde:

(Tn) presión de saturación de vapor de agua (hPa) para medir el estado de la atmosfera, computado desde la temperatura del punto de rocío (°C), pudiendo reemplazarse por la temperatura mínima (Tn), según lo estableció Castellví *et al.* (1996) y McVicar y Jupp (1999), asimismo, (Tm) se refiere a la presión de vapor saturada (hPa) medida al momento de alcanzar la temperatura horaria promedio (°C).



El método de cálculo de la presión de vapor de saturación (es, en Pa) fue a través de la ecuación sugerida por Tetens (1930), donde la temperatura (T) se mide en grados Celsius (°C).

$$e_s = 610.8 \cdot e^{\left(\frac{17.3T}{237.3+T}\right)}$$

Ecuación 2

Donde:

e: es la presión de vapor de saturación de agua (hPa)

T: es la temperatura absoluta del aire en °C

Desarrollo fenológico del café y severidad de la roya

La severidad se midió sobre la variedad de café Típica, en una superficie de 0.5 ha, donde se seleccionaron 10 plantas al azar mediante el método de muestreo «T» y se tomaron 10 hojas de cada planta, localizadas en tres partes: baja (B), media (M) y alta (A), para estimar la severidad, como lo establece la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria SAGARPA-SENASICA (2019). Los muestreos se realizaron semanalmente desde septiembre de 2016 hasta febrero de 2017 y desde junio de 2017 hasta enero de 2018, periodo en el que la enfermedad estuvo presente.

Para la fenología del cultivo se tomó como base la descripción general de las fases fenológicas del café sugeridas por Ramírez (2014), mediante el cálculo de los GDA acumulados para cada fase a través del método de umbrales de temperatura (Battel, 2017) o del método de onda senoidal (Murray, 2020), el cual asume que las temperaturas de un día de 24 horas siguen una curva senoidal. Se tomó como temperatura base para el cultivo de café 10 °C (Montoya y Jaramillo, 2016) y 16 °C como temperatura límite inferior para la germinación de las urediniosporas (Jong, E. J., Eskes, A. B., Hoogstraten, J. G. J., and Zadoks J. C, 1987; Avelino y Rivas, 2013).

El modelo empleado para el cálculo del incremento diario de las unidades térmicas expresada en grados día, unidades calor, °C d⁻¹ o tiempo térmico diario fue con la ecuación propuesta por Murray (2020) y se incluyeron siete fases fenológicas para el cultivo del café y cuatro para la roya

$$GDA = (T_{Max} + T_{Min})/2 - T_b$$

Ecuación 3

Donde:

GDA = Grados días acumulados



TMax = Temperatura Máxima diaria del aire

TMin = Temperatura Mínima diaria del aire

Tb = Temperatura base

Análisis estadístico

Para las variables severidad y evapotranspiración se utilizó un modelo de regresión lineal, potencia y exponencial simple mediante el paquete estadístico para ciencias sociales (SPSS, por sus siglas en inglés: Statistical Package for the Social Sciences®) versión 26 SPSS y la paquetería de Microsoft Excel 2013® versión (15.0). Correlacionando, días, grados y la severidad de la roya, humedad relativa y severidad de la roya, relación entre los días grados y la evapotranspiración acumulada durante el ciclo del cultivo de café 2016 - 2017.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Escenario base durante 36 años

Las tendencias o ciclo a largo plazo con medias anuales de TA y PP analizadas mediante el modelo de Smith y Smith (2007), correspondió a una serie de 36 años (Figuras 3a y 3b). La TA presentó la tendencia de ir hacia la baja con respecto a la temperatura promedio, disminuyendo aún más a partir del año 1992. Con respecto a la PP se mantuvo ligeramente arriba del promedio, excepto el periodo de 2003 al 2008 que se presentó una disminución de las PP y el promedio de los 36 años analizados fue de 2 000 mm, acentuándose en algunos años más lluviosos que correspondieron a 1998 (2 704 mm), 1999 (2 643.7 mm), 2005 (2 835.7 mm), 2010 (2689.4) y 2013 (2 356 mm) y el año menos lluvioso fue el 2012 con 951.09 mm. (Figura 3b). Estas variaciones en la precipitación pluvial, acentuación de las temperaturas, además del incremento de la severidad de la roya y de otras enfermedades, ya habían sido observadas por los productores de la zona cafetalera.

Los resultados promedios de TA y PP observados en el diagrama del índice ombrotermico se encuentran dentro del rango óptimo para el incremento de la incidencia y severidad de la roya (Figura 4), y coinciden con las encontradas por Barradas (2014) en predios que registraban de 17 °C a 23 °C. Asimismo, Parada-Molina, C. P., Cervantes-Pérez, J., Ruiz-Molina, V. E. y Cerdán-Cabrera, C. R, (2020b). sostienen que los aumentos en la temperatura máxima (0.2 °C década⁻¹), mínima (0.3 °C década⁻¹), precipitación y su intensidad diaria, favorecen la incidencia y severidad de la roya amarilla del café y de otras



enfermedades fungosas, aunque pueden tolerar temperaturas de hasta 28 °C, con óptimas de 21 a 25 °C (De-Oliveira, A. L. E., de-Souza-Rolim, G., da-Silva-Cabral, De-Moraes, J. R., Costa, C. T. S., and de Souza, P. S, 2020), no obstante temperaturas fuera de este rango se retarda significativamente las epidemias (Hinnah *et al.* 2018; Daba, G., Helsen, K., Berecha, G., Lievens, B., Debela, A., and Honnay, O, 2019., Yirga, 2020).

Escenario base del ciclo 2016-2017

La relación de la PP y TA con cada etapa fenológicas del café se observan en la (Figura 5), estas van de febrero a noviembre, con un breve periodo de sequía invernal de noviembre a febrero, este período de sequía no presenta importantes consecuencias para el ambiente, la agricultura, la economía, la salud y la sociedad. Esto se debe a que, en este periodo, la humedad residual se mantiene en óptimas condiciones en el suelo, favorecido por la cantidad de materia orgánica presente y como resultado de una buena distribución de las precipitaciones pluviales durante los meses lluviosos. En la parte inferior de la gráfica, se encuentran las etapas fenológicas, los meses en que se presentaron y su duración.

La altitud, resulta de suma importancia ya que, a medida que esta aumenta, la temperatura disminuye sobre todo en invierno y aumenta la precipitación en las siguientes estaciones del año (García, 2004), influyendo sobre el tiempo de desarrollo, maduración de frutos, y época de cosecha. Asimismo, temperaturas mayores a 24 °C ocasionan un mayor estrés hídrico y acorta la duración del ciclo de vida de la planta, pero también las temperaturas inferiores a 12 °C producen una disminución en la fecundación e incrementa los abortos florales en la etapa de floración (Gil-Mora y Álvarez-Moscoso, 2021).

Estimación del periodo de crecimiento del cultivo de café con disponibilidad de agua

Una vez analizada la información meteorológica de la zona cafetalera de Cuxtepeques quedó clasificada como clima de selva tropical lluviosa, correspondiente a la clasificación hecha por FAO (1978); García (2004), esta categoría corresponde a una precipitación mensual que excede a la evaporación potencial. También es común considerar el período de crecimiento húmedo todo el año como período normal de 365 días. Lo cual se determinó con los datos de precipitación promedio anual obtenidos de la estación meteorológica de la finca Cuxtepeques (Figura 6).



Durante el ciclo del cultivo 2016-2017, el periodo de lluvias tuvo una duración de nueve meses, que va de marzo a noviembre y los valores promedios máximos de PP fue en agosto con 340.3 mm a los 243 días, en tanto que la TA promedio tuvo su máximo (25 °C) en mayo a los 151 días, coincidiendo con el momento en que empieza la prefloración y el incremento de las lluvias, con una duración de 315 días justo cuando inicia la época de cosecha del cafeto. En tanto que la aparición de los síntomas de la roya fue a mediados del mes de junio, en el envés de las hojas, en presencia del 97 % de HR y 23°C en promedio y alcanzó su máxima severidad en diciembre, prolongándose en la mayoría de los casos hasta enero del siguiente año, en plantaciones donde aún no se cosechan (Figura 7), esto coincide con lo establecido por SAGARPA (2019) debido a que la germinación de las esporas necesitan de la presencia de agua libre por lo menos durante seis horas, temperaturas entre 21-25 °C y ambientes de oscuridad. No obstante Avelino y Rivas (2013) sostienen que la roya del café puede aparecer desde los 18 °C con una humedad relativa de 70 a 80 %, condiciones no muy favorables para sus antagonistas ya que bajo esta condición disminuyen su potencial parasitario sobre la roya incrementando fuertemente los daños al follaje de la planta y de esta forma los antagonistas o micoparásitos quedan limitados a invadir el área que ocupa la pústula sobre la hoja

Desarrollo fenológico del café y severidad de la roya

La productividad del café está altamente correlacionada con el buen desarrollo de cada fase fenológica y los datos de este tipo de análisis podrían ser utilizados para generar modelos que faciliten la programación detallada de actividades, incrementando así la productividad. En este sentido durante el ciclo de cultivo 2016-2017, se identificaron seis fases fenológicas expresadas en tiempo fisiológico: crecimiento foliar (etapa vegetativa), en esa fase tuvo un requerimiento de 417.8 GDA y cinco que corresponden a la etapa (productiva) que son: prefloración (726.6 GDA), floración (1 052.1 GDA), crecimiento del fruto (2 775.2 GDA), maduración del fruto (3 373.5 GDA) y maduración del fruto y corte (3 696.3 GDA) (Figura 8 y Cuadro 1). Se incluyen la etapa vegetativa y productiva, con un periodo de sequía invernal que no afecta el buen desarrollo del cultivo ya que existe buena disponibilidad de agua en el suelo a consecuencia de la buena distribución de lluvias durante todo el año. No así, DaMatta, F. M., Ronchi, C. P., Maestri, M., and Barros, R. S, (2007) registraron en una región cafetalera periodo de sequía invernal ocasionando severos daños a los estados de desarrollo del cultivo de café. Para esta



zona cafetalera, las necesidades térmicas determinadas fueron superiores a las 2 500 GDA determinadas por Jaramillo-Robledo y Gómez-Gómez (2009) entre la fase de floración y la cosecha.

La aparición de la Roya se pudo observar después de que las plantas se habían cubierto de follaje al finalizar la denominada fase foliar para lo cual se requirió 841.8 GDA, le siguió la escala 1 de severidad que corresponde al punto clorótico que va de 0.5 a 1 % de daños y requirió de 1 060.9 GDA, ahí marcó el inicio de la epifitía del hongo y fue a inicios del mes de julio, a partir de ese momento se pudo observar los incrementos de severidad pasando por la escala 2 al completar 1 501.4 GDA con 1 a 5 % de daños, le siguió la escala 3 con 1 970.9 GDA con 6 a 20 % de daños y por último la escala 4 sumando un total de 2 237.2 GDA con 21 a 50 %, la última correspondió a la mayor severidad provocando caída total de hojas (Figura 9 y Cuadro 2) .

Relación entre GDA y HR con la severidad de la roya

En este estudio se encontró que los GDA y la ETA, están correlacionadas directamente con el desarrollo de la severidad de la roya, también con los valores de la HR. En todos los casos, los índices de correlación (r) fueron mayores a 0.8 y estadísticamente significativos ($P \leq 0.05$); mientras que los coeficientes de determinación (R^2) estuvieron entre 70.00 % y 99.32 % correspondiendo el valor más bajo de severidad cuando interactúa con HR y el más alto para los valores ETP. Estos valores altos significan que la severidad obtenida es explicada por la HR en un 70.00 % y en un 99.32 % influyen los GDA (Cuadro 3).

En general, se asume que el incremento de las temperaturas conduce a una mayor demanda de evapotranspiración (Reddy, 2015). Por lo tanto, midiendo solamente los GDA resulta suficiente para establecer una estrategia de control a la roya, además de ser un método sencillo, práctico, y de fácil aplicación para los técnicos y agricultores.

Finalmente, HR y GDA con la severidad de la “roya del café”, están correlacionadas directamente (Figuras 10, 11 y 12). Coincidiendo con lo señalado por Hinnah *et al.* (2018) quienes encontraron que la tasa de severidad está altamente correlacionada con las temperaturas y la humedad.

ILUSTRACIONES, TABLAS, FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la estación meteorológica de la finca Cuxtepeques y Ranchería 30 de Agosto municipio de la Concordia Chiapas, México. Localizada en el paralelo 15°76'14" N y el meridiano 92°96'64" W

Figure 1. Location of the weather station at the Cuxtepeques and Ranch 30 of August farms in the municipality of La Concordia, Chiapas, Mexico. Located on the parallel 15°76'14" N and the meridian 92°96'64" W.

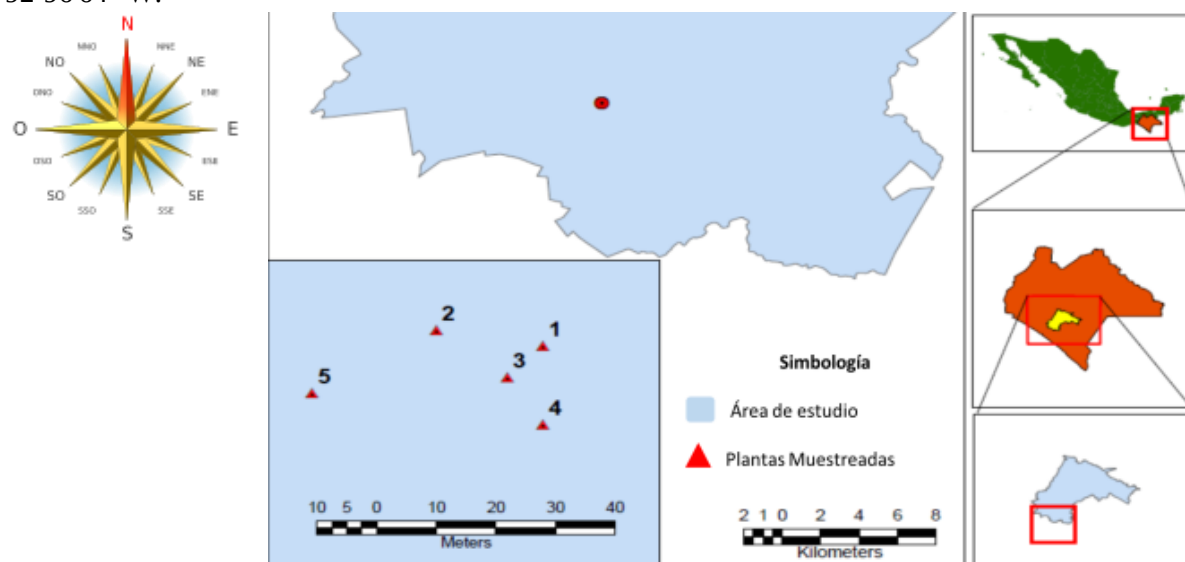


Figura 2. Escala para cuantificar la severidad de la roya: fuente SADER_SENASICA; DGSV-SINAVESF-LANREF

Figure 2. Scale for quantifying rust severity, source: SADER_SENASICA; DGSV-SINAVESF-LANREF



Figura 3. Serie de: a) temperatura y b) precipitación pluvial (PP) en un periodo de 38 años expresada como media móvil de cinco años, para observar su tendencia.

Figure 3. Graphs: a). temperatures and b). rainfall over a 38-year period expressed as a five-year moving average, to observe the trend.

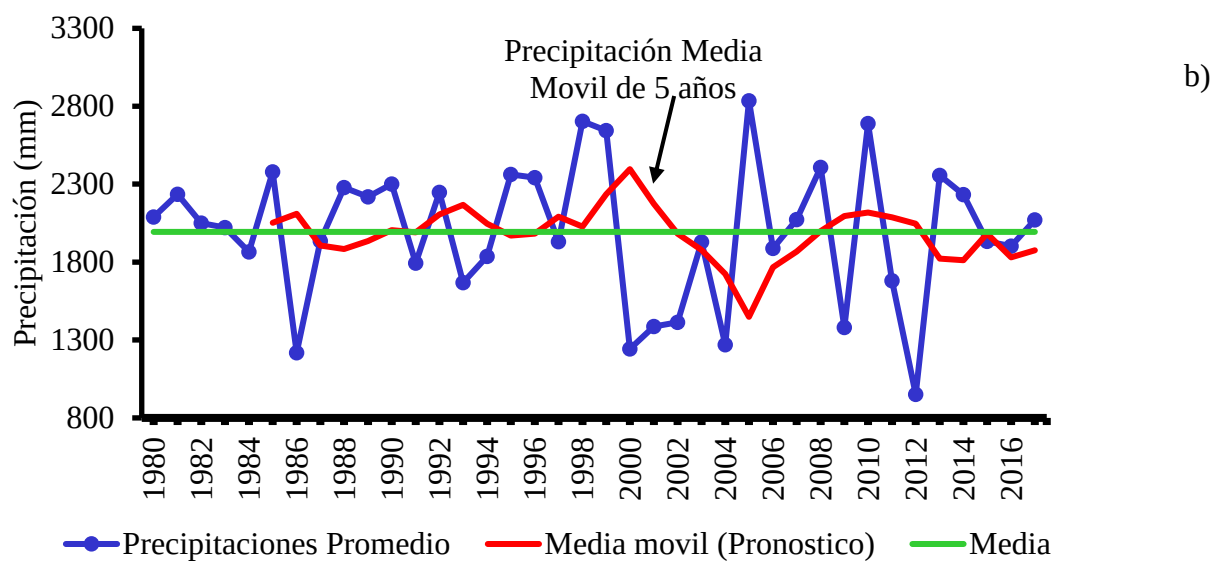
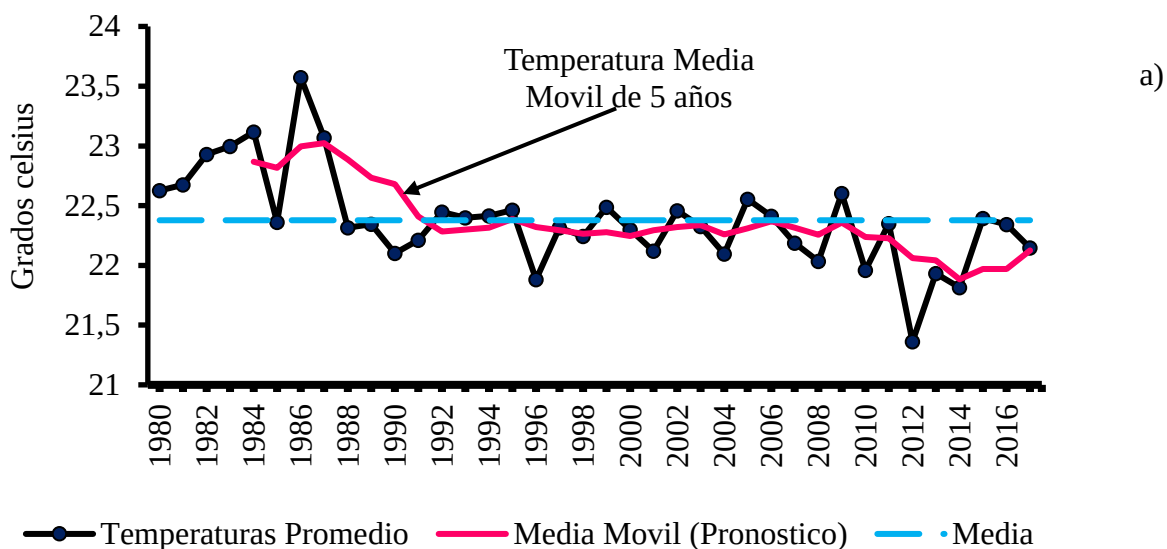


Figura 4. Promedio de precipitación y temperaturas de un periodo de 36 años y su relación entre el desarrollo del cultivo del café y la enfermedad roya anaranjada *H. vastatrix*

Figure 4. Average rainfall and temperatures over a 36-year period and their relationship with coffee crop development and the orange rust disease *H. vastatrix*.

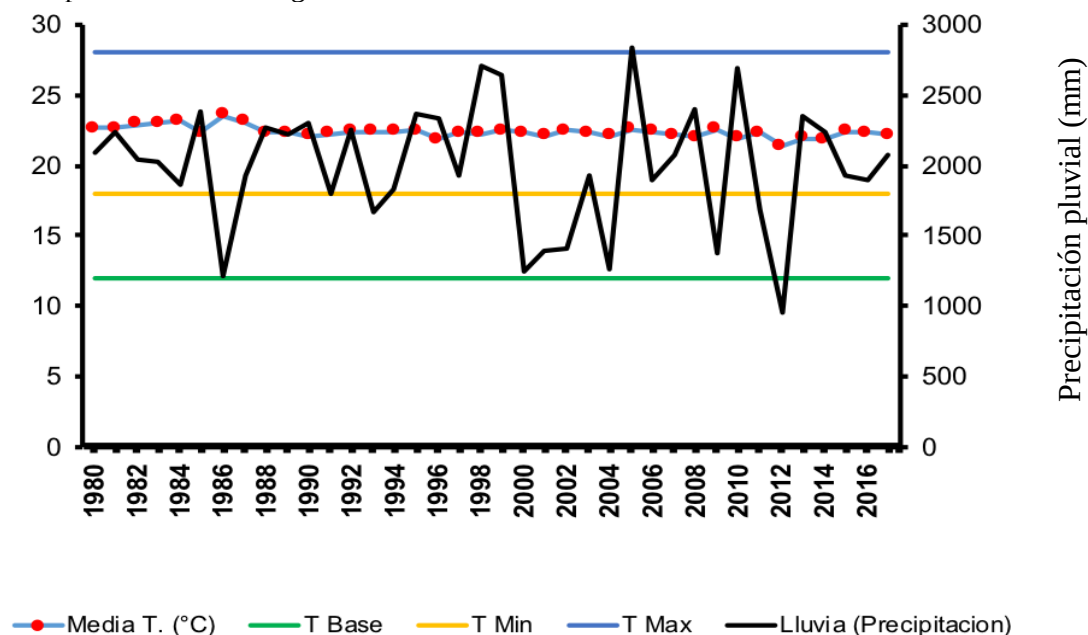


Figura 5. Escenario base. Diagrama ombrotérmico anual, señalándose temperatura, precipitación promedio mensual y las etapas fenológicas del cultivo del café.

Figure 5. Base scenario. Annual ombrothermal diagram, showing temperature, average monthly precipitation and phenological stages of the coffee crop.

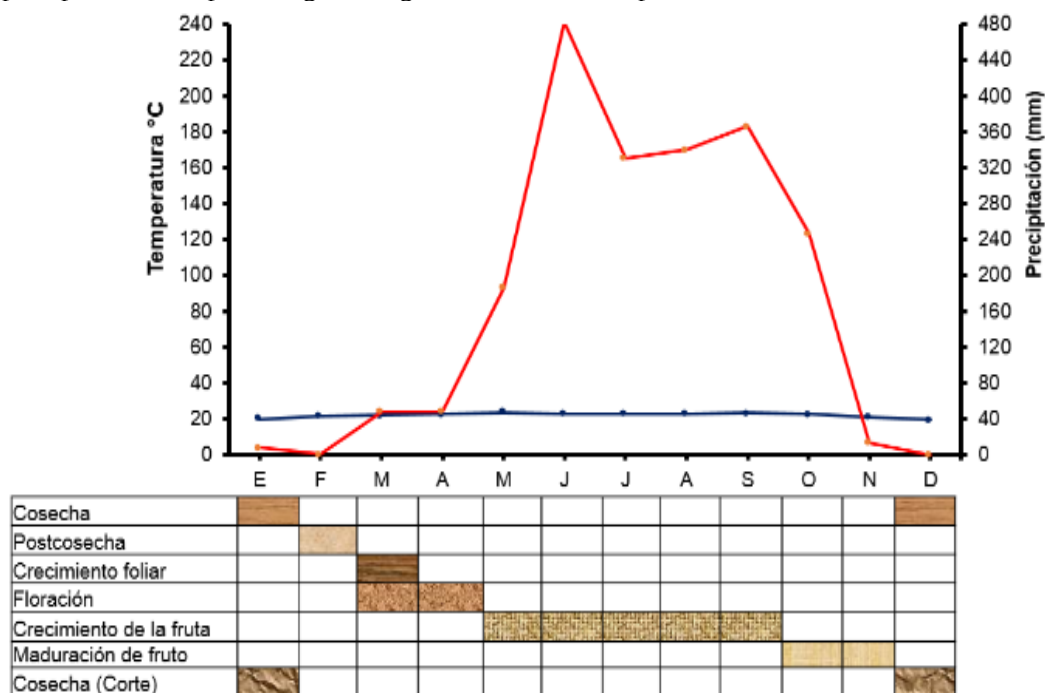
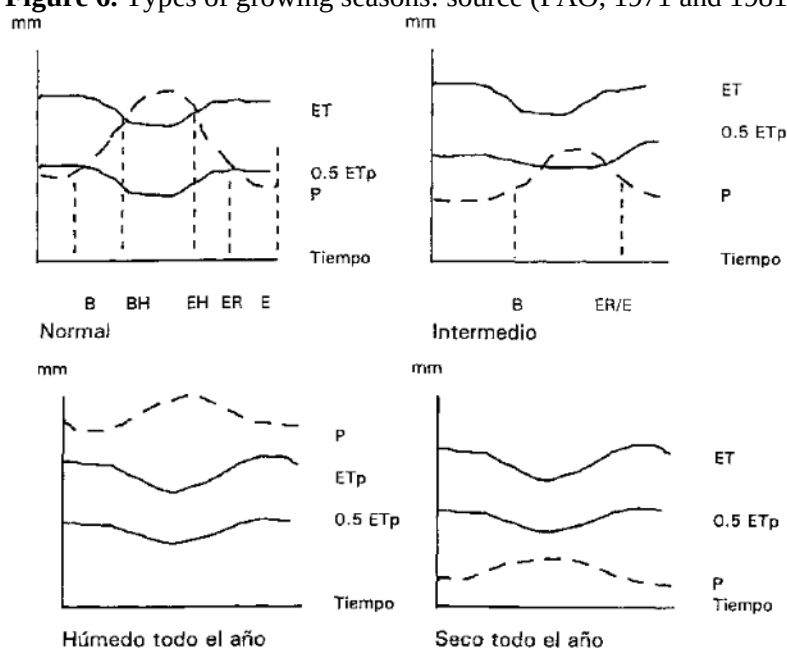


Figura 6. Tipos de periodos de crecimiento: fuente (FAO, 1971 y 1981)

Figure 6. Types of growing seasons: source (FAO, 1971 and 1981)



B - Comienzo del periodo de crecimiento
 BH - Inicio del periodo húmedo
 EH - Final del periodo húmedo
 ER - Final de la estación de las lluvias
 E - Final del periodo de crecimiento
 P - Precipitaciones
 Etp - Evapotranspiración potencial

Figura 7. Relación entre precipitación, humedad relativa, temperatura y severidad de la roya

Figure 7. Relationship between precipitation, relative humidity, temperature and severity of rust

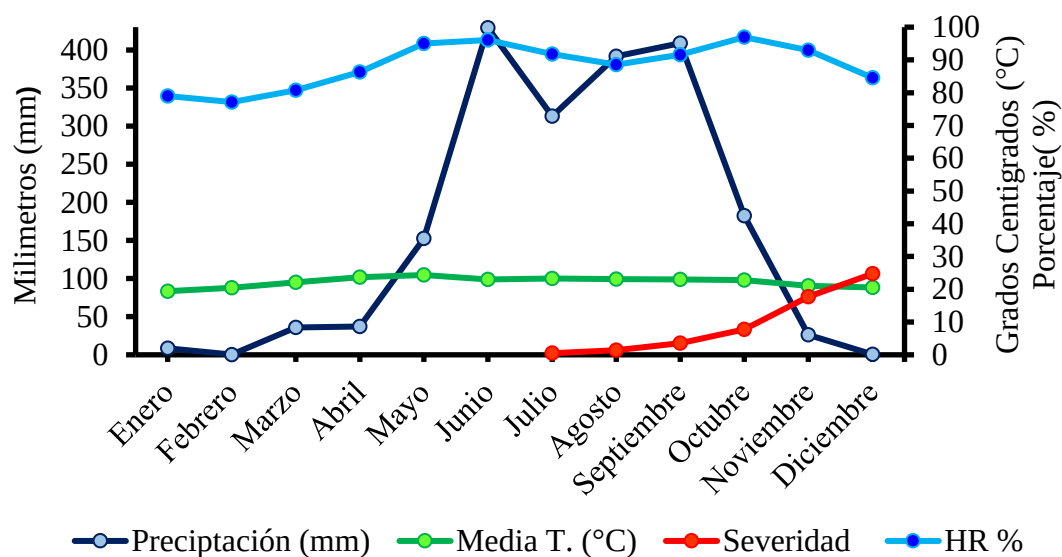
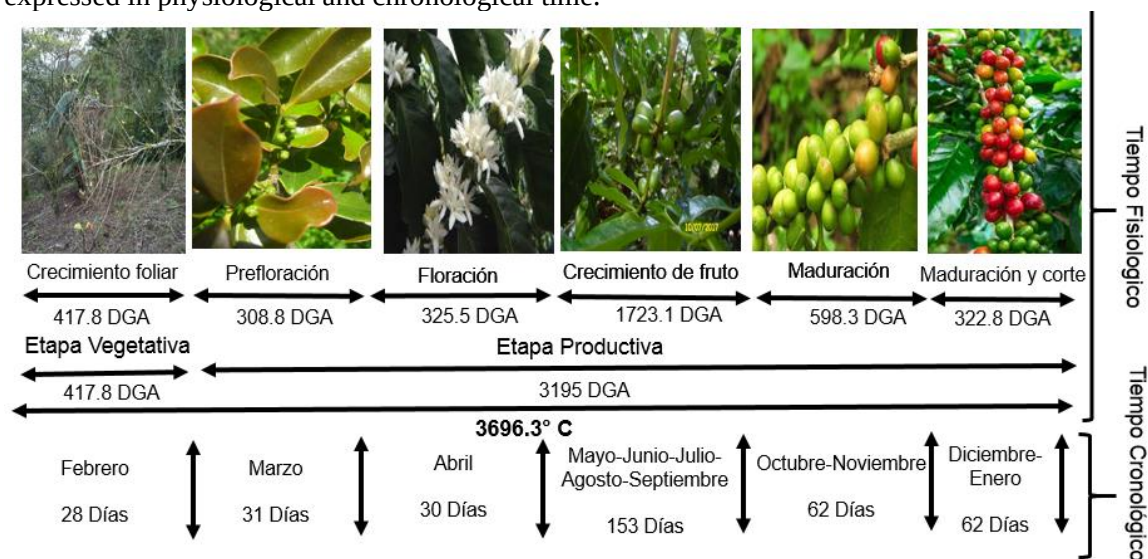


Figura 8. Grados-día acumulados para la estimación de las fases fenológicas del cultivo del café expresados en tiempo fisiológico y cronológico

Figure 8. Accumulated degree-days for the estimation of the phenological phases of coffee cultivation expressed in physiological and chronological time.



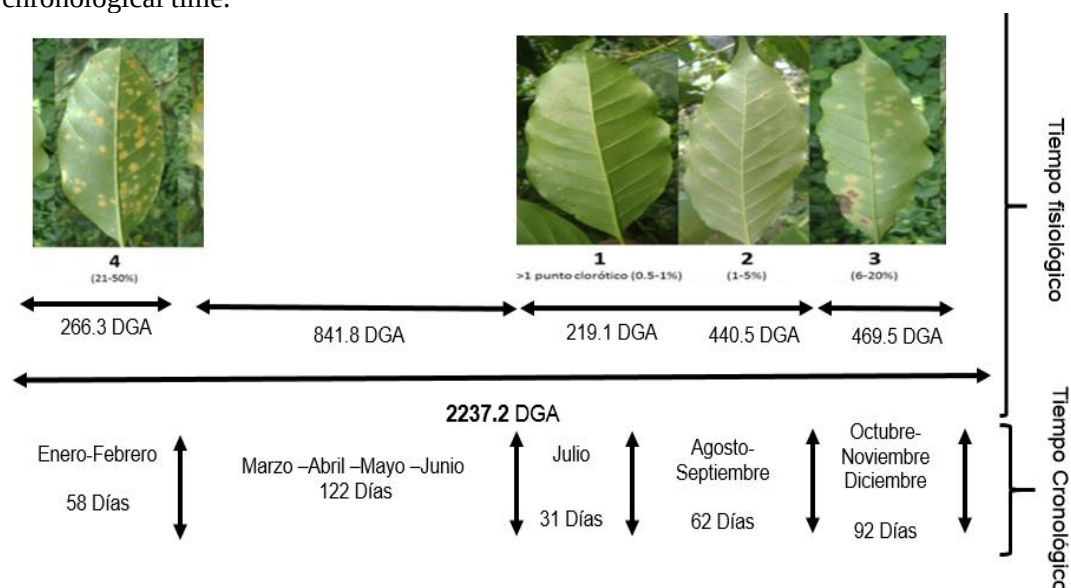
Cuadro1. Fenofases del cultivo del café en tiempo cronológico y tiempo fisiológico

Table 1. Phenophases of coffee cultivation in chronological time and physiological time.

Fenofases	Días necesarios según GDA (tiempo fisiológico)		Días necesarios según (tiempo cronológico)	
	Unidades calor/fase	GDA	Duración en días/por fase	Duración en días a cosecha
Crecimiento foliar	417.8		48	
Prefloración	308.8	726.6	29	77
Floración	325.5	1052.1	31	108
Crecimiento del fruto	1723.1	2775.2	143	251
Maduración del fruto	598.3	3373.5	62	313
Maduración y corte	322.8	3696.3	42	355

Figura 9. Grados-Día Acumulados para la estimación de la severidad de la Roya *H. vastatrix* en tiempo fisiológico y cronológico.

Figure 9. Cumulative Degree-Days for estimating the severity of *H. vastatrix* rust in physiological and chronological time.



Cuadro 2. Etapas fenológicas de *H. vastatrix* roya del café medidas a través de la severidad expresado en tiempo cronológico y tiempo fisiológico.

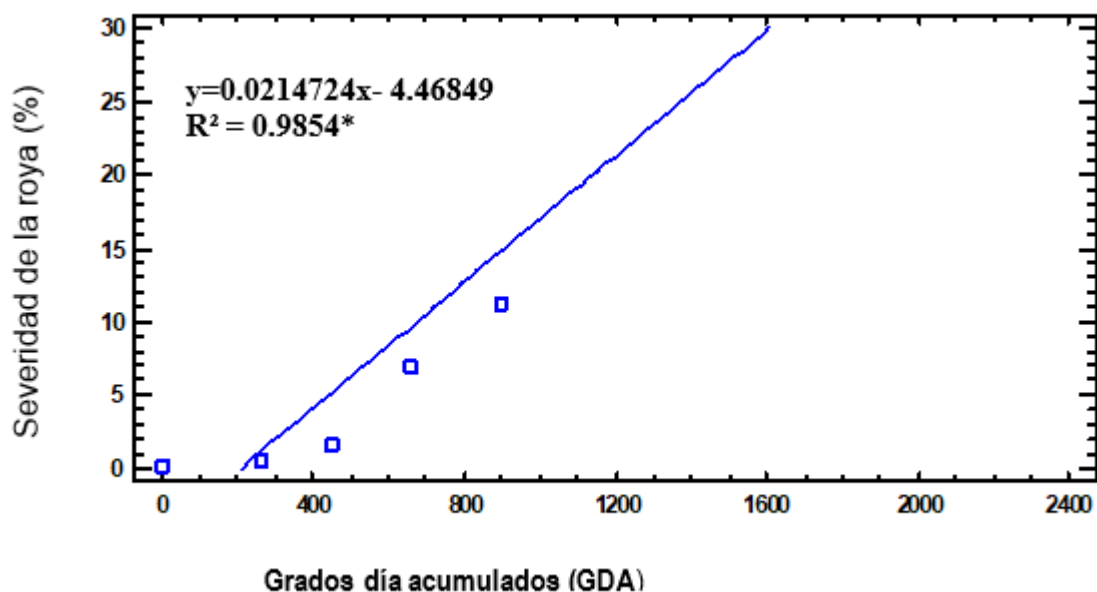
Table 2. Phenological stages of *H. vastatrix* coffee rust measured through severity expressed in chronological time and physiological time.

Escala de severidad en % (SENASICA,2013)	Días necesarios según GDA (tiempo fisiológico)		Días necesarios según (tiempo cronológico)	
	Unidad GDA	s calor/fase	Duración en días/por clase de severidad	Duración en días de acumulados
Clase 0 (Planta sana)	841.8		122	
Clase 1 (3% de área foliar dañada por roya)	219.1	1060.9	31	153
Clase 2 (10 % de área foliar dañada por roya)	440.5	1501.4	62	215
Clase 3 (30 % de área foliar dañada por roya)	469.5	1970.9	92	307
Clase 4 (60 % de área foliar dañada por roya)	266.3	2237.2	58	365

GDA= Grados día acumulados

Figuras 10. Relación entre la severidad de la roya y DGA sobre el cultivo del café en el ciclo del cultivo de café 2016 y 2017.

Figure 10. Relationship between rust severity and DGA on the coffee crop in the coffee crop cycle 2016 and 2017.



Figuras 11. Relación entre la severidad de la roya y la humedad relativa en el cultivo del café en el ciclo del cultivo de café 2016 y 2017.

Figure 11. Relationship between rust severity and relative humidity in the coffee crop during the 2016 and 2017 cycle.

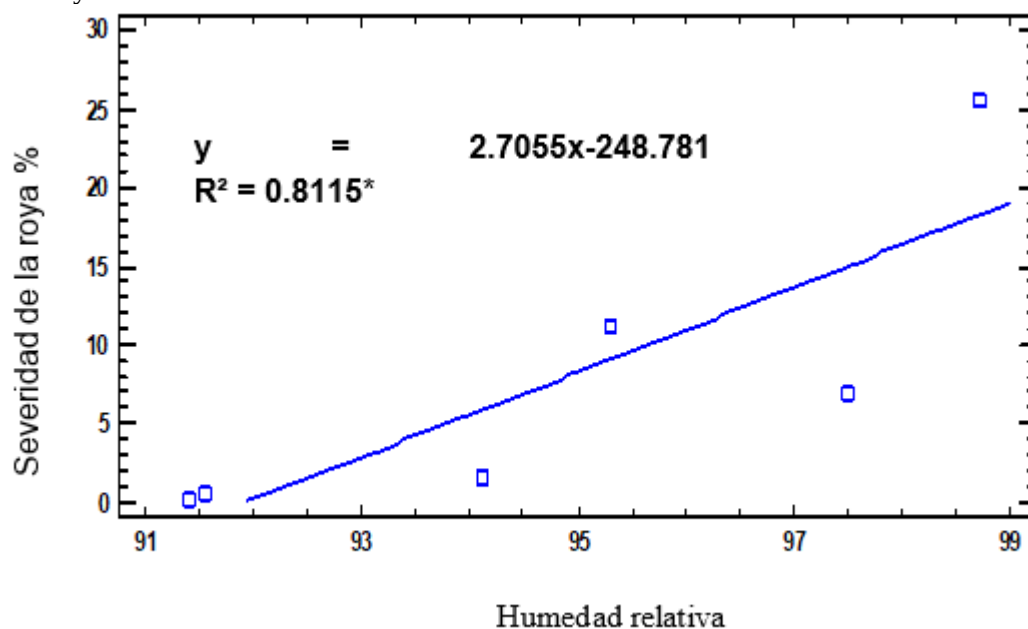
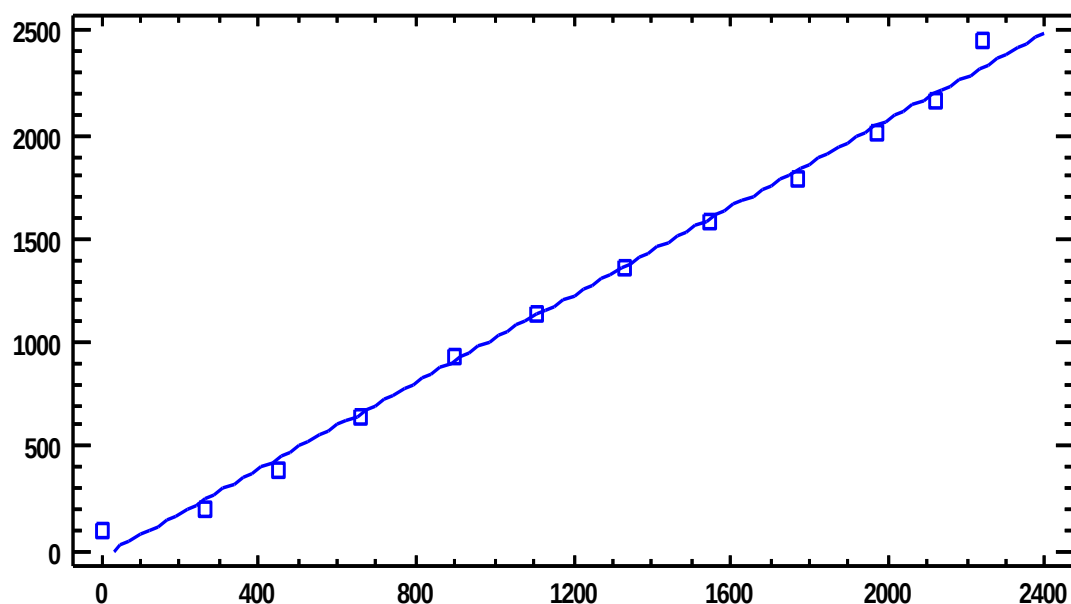


Figura 12 Relación entre la evapotranspiración y los GDA en el cultivo de café durante el ciclo 2016 y 2017.

Figure 12. Relationship between evapotranspiration and DGA in the coffee crop during the 2016 and 2017 cycle.



Cuadro 3 Índices de correlación (r) y Coeficientes de Determinación [R^2] entre la incidencia y severidad, Humedad relativa y severidad de la “roya del café”.

Table 3. Correlation indices (r) and Coefficients of Determination [R^2] between incidence and severity, relative humidity and severity of coffee rust.

X		Y	Evapotranspiración acumulada (ETA)	Severidad	Severidad
Días (DGA)	grados acumulados		(99.3241 *)		
			[0.9969]		
Días (DGA)	grados días acumulados			(80.4301 *)	
				[0.896828]	
		Humedad relativa (HR)			(70.000*)
					[0.8335]

*/ Significancia estadística al 5% de probabilidad. Valores entre paréntesis: R^2 , valores entre corchetes: coeficiente de correlación.

CONCLUSIONES

El promedio de precipitación pluvial (PP) durante los 36 años analizados fue de 2 000 mm anual, y la (TA) fue de 23.57°C. El análisis de los datos promedios de TA y PP de la región cafetalera Cuxtepeques, permitió comprobar que tanto la cantidad de precipitación pluvial y la temperatura es adecuada y se encuentra dentro del rango promedio anual requerido para un buen crecimiento y desarrollo de cultivo

del café, pero también para el crecimiento y desarrollo de la roya *H. vastatrix* que en términos de cinco meses destruye las plantaciones enteras durante todos años.

El periodo de lluvias va de febrero a noviembre de cada año, con un breve periodo de sequía invernal de noviembre a febrero, donde la humedad residual en el suelo persiste como resultado de una buena distribución de las precipitaciones pluviales, por ello la zona cafetalera de Cuxtepeques de Chiapas, corresponde a un clima de selva tropical lluviosa, con una precipitación mensual que excede a la evaporación potencial.

Las necesidades térmicas de las fases fenológicas, denominada también tiempo fisiológico fueron: crecimiento foliar (etapa vegetativa), en esa fase tuvo un requerimiento de 417.8 GDA y cinco que corresponden a la etapa (productiva) que son: prefloración (726.6 GDA), floración (1 052.1 GDA), crecimiento del fruto (2 775.2 GDA), maduración del fruto (3 373.5 GDA) y maduración del fruto y corte (3 696.3 GDA).

Se identificaron cuatro niveles de severidad: escala 1 que corresponde al punto clorótico que va de 0.5 a 1 % su aparición requirió de 1 060.9 GDA, pasando por la escala 2 al completar 1 501.4 GDA con 1 a 5 % de daños, le siguió la escala 3 con 1 970.9 GDA con 6 a 20 % de daños y por último la escala 4 con un total de 2 237.2 GDA con 21 a 50 % ó más. La TA, HR, y PP deberán estudiarse para cada estación del año, debido a los cambios que se generan y contextualizarse según el sistema de producción establecido. A partir de esto, se deberá establecer un programa de monitoreo permanente de la enfermedad en el cultivo de café en México y otros países con condiciones similares, como herramientas para poder implementar estrategias de control de la roya.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avelino, J. y Rivas, G. (2013). La roya anaranjada del cafeto. [En línea]. Disponible en:

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036/document>.

Baig, I. A., Chandio, A. A., Ozturk, I., Kumar, P., Khan, Z. A., and Salam, M. A. (2022). Assessing the long-and short-run asymmetrical effects of climate change on rice production: Empirical evidence from India. *Environmental Science and Pollution Research International*. 29(23): 34209-34230.



- Baradas, M. W. (2014). *Crop requirements of tropical crops*. In: *Handbook of agricultural meteorology*. New York: Oxford Univ. Press. 189-202 Pp.
- Battel, B. (2017). Understanding growing degree-days. *Michigan State University Extension*. [En línea]. Disponible en: https://www.canr.msu.edu/news/understanding_growing_degree_days.
Fecha de consulta: 2
- Bebber, P. D., Castillo-Delgado, A., and Gurr, J. S. (2016). Modelling coffee leaf rust risk in Colombia with climate reanalysis data. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 371: 20150458.
- Bussell, E. H., Dangerfield, C. E., Gilligan, C. A., & Cunniffe, N. J. (2019). Applying optimal control theory to complex epidemiological models to inform real-world disease management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374(1776), 20180284.
- Castellví, F., Pérez, P. J., Villar, J. M., and Rosell, J. L. (1996). Analysis of methods for estimating vapor pressure deficits and relative humidity. *Agricultural and Forest Meteorology*. 82(1-4): 29-45.
- CCCCCh, Consejo Consultivo de Cambio Climático del estado de Chiapas. (2019). Informe 2017-2018. 11-17 Pp. [En línea]. Disponible en:
<https://www.idesmac.org/publicaciones/index.php/ids/catalog/download/ccccch-2017-2018/ccccch-2017-2018/293-1?inline=1>
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, B. D., and Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*. 333(6045): 1024-1026.
- Daba, G., Helsen, K., Berecha, G., Lievens, B., Debela, A., and Honnay, O. (2019). Seasonal and altitudinal differences in coffee leaf rust epidemics on coffee berry disease-resistant varieties in Southwest Ethiopia. *Tropical Plant Pathology*. 44: 244-250.
- DaMatta, F. M., Ronchi, C. P., Maestri, M., and Barros, R. S. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19: 485-510.



- De-Oliveira, A. L. E., de-Souza-Rolim, G., da-Silva-Cabral, De-Moraes, J. R., Costa, C. T. S., and de Souza, P. S. (2020). Machine learning algorithms for forecasting the incidence of *Coffea arabica* pests and diseases. *International journal of biometeorology*. 64(4): 671-688.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (1978). Report on the Agroecological Zones Project. Vol. 1 Methodology and results for Africa. Rome. [En línea]. Disponible en: <https://original-ufdc.uflib.ufl.edu/UF00085364/00001/1X>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (1981). Report on the Agroecological Zones Project. Vol. 111 Methodology and results for South and Central America. Rome, Italia. [En línea]. Disponible en: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19816738111>.
- Fernández-Cortés, Y., Sotto-Rodríguez, K. D. y Vargas-Marín, L. A. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*. 15(1): 93-110.
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. (5ª edición). México: Serie libros No.6 Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 246 Pp.
- Gil-Mora, J. E y Álvarez-Moscoso, M. E. (2021). Efectos del cambio climático en granadilla y café en Santa Teresa - La Convención, Cusco. Segunda Edición Diálogo Académico: Aportes de la Ciencia a Nuestro Desafío Climático (NDC) Lima, Perú. [En línea]. Disponible en: https://investigacion.minam.gob.pe/observatorio/sites/default/files/policy_brief_juan_gil_mora.pdf. Fecha de consulta: 5 de noviembre de 2022.
- Hinnah, F., Sentelhas, P., Alves, C., and Naves, R. (2018). Weather-based coffee leaf rust apparent infection rate modeling. *International Journal of Biometeorology*. 62: 1847-1860.
- ICO, Internacional Coffee Organization. (2019). *Exports of all forms of coffee by all exporting countries*. [En línea]. Disponible en: http://www.ico.org/historical/1990_onwards/PDF/2a-exports.pdf . Fecha de consulta 9 de septiembre 2023.
- Jaramillo-Robledo, A. y Gómez-Gómez, L. (2009). Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrío. *CENICAFÉ*. 40(3): 65-79.



- Jong, E. J., Eskes, A. B., Hoogstraten, J. G. J., and Zadoks J. C. (1987). Temperature requirements for germination, germ tube growth and appressorium formation of urediospores of *Hemileia vastatrix*. *Netherlands Journal of Plant Pathology*. 93: 61-71.
- Mapcarta. (s.f.). Finca Cuxtepeques. Recuperado el 27 de septiembre de 2024 de <https://mapcarta.com/es/Chiapas>
- McVicar, T. R. and Jupp, D. L. B. (1999). Estimating one-time-of-day meteorological data from standard daily data as inputs to thermal remote sensing based energy balance models. *Agricultural and Forest Meteorology*. 96(4): 219-238.
- Montoya, R. E. C y Jaramillo, R. A. (2016). Efecto de la temperatura en la producción de café. *Revista Cenicafe*. 67(2): 58-65.
- Monkhouse. F.J. A (Sf). *Dictionary of Geography*. London: Edward Arnold (Publishers) Ltd. Existe traducción española.)
- Murray, M. S. (2020). Using degree days to time treatments for insect pests. Fact Sheet. Utah State University Extension and Utah Plant Pest Diagnostic Laboratory, IPM 05-08. [En línea]. Disponible en: <https://extension.usu.edu/pests/research/degree-days>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2023.
- Nutman, F. J., Roberts, F. M., and Clarke, R. T. (1963). Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Transactions of the British Mycological Society*. 46: 27-44.
- Parada-Molina, P. C., Cerdán-Cabrera, C. R., Ortiz-Ceballos, G., Cervantes-Pérez, J. y Barradas-Miranda, V. L. (2020a). *Hemileia vastatrix* una prospección ante el cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 7(3): 1-9.
- Parada-Molina, C. P., Cervantes-Pérez, J., Ruiz-Molina, V. E. y Cerdán-Cabrera, C. R. (2020b). Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Ingeniería y Región*. 24: 61-71.
- Pérez-Fernández, Y., González-Santiago, M. V., Escamilla-Prado, E., Cruz-León, A., Rosas-Brugada, M. y Ruiz-Espinoza, F. (2016). “Propuestas para la preservación de la vida en los cafetales en el municipio de Teocelo, Veracruz”. *Revista de Geografía Agrícola*. 57: 79-88.



- Qiu, Y., Fu, B., Wang, J., Chen, L., Meng, Q., & Zhang, Y. (2010). Spatial prediction of soil moisture content using multiple-linear regressions in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 73(2), 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.08.003>
- Ramírez, B.V.H. (2014). La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones. Avances Técnicos CENICAFE, 8 pp
- Reddy, P. P. (2015). Impacts of climate change on agriculture. In P. P. Reddy (Ed.). *Climate resilient agriculture for ensuring food security* (pp. 43-90). New Delhi, India: Springer.
- Rodríguez, J. R. Ma; Capa, Á.B; Portela L. A. (2004). *Meteorología y Climatología*. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT). p. 12 a 33.
- SAGARPA-SENASICA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación -Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2019). Ficha técnica roya del cafeto *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome. [En línea]. Disponible en: <http://amecafe.org.mx/downloads/FichaT%C3%A9cnicaRoyadelCafeto.pdf>. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2021.
- Sánchez-Castillo, V., Avendaño-Pizo, Y., Gaviria-Astudillo, A., y Gómez, C. (2018). Cambio climático y café (*Coffea arabica*) en Acevedo, Huila: una lectura desde sus cultivadores. *I+ D Revista de Investigaciones*. 12(2): 59-69.
- SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2018). Un buen clima. Glosario de términos meteorológicos.. Perú. p. 8.
- Shim, D., Kyu-Jong, L., and Byun-Woo, L. (2017). Response of phenology and yield related traits of maize to elevated temperature in a temperate region. *The Crop Journal*. 5: 305-3016.
- Silva M, De Carvalho M, Ampélio E. (2020). Multispectral radiometric characterization of coffee rust epidemic in different irrigation management systems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 86: 102016. DOI: 10.1016/j.jag.2019.102016.
- Smith, T. M. y Smith, R. L. (2007). *Ecología*. (6ª Edición). Madrid: Pearson Educación, S.A. 662-663 Pp.
- Tetens, O. (1930). Über einige meteorologische Begriffe. *Z. Geophys.* 6: 297-309



- Vignola, R., Watle, W., Poveda, C.K., Vargas, C.A. (2018). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de café en costa rica. Ficha técnica cultivo del café. CATIE, Costa Rica: 115p. [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8206.pdf>
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C. y Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*. 34(5): 322-329.
- Villarreyna, R., Avelino, J. y Cerda, R. (2020). Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana*. 31(2): 499-516.
- Yang, L. N., Ren, M., & Zhan, J. (2023). Modeling plant diseases under climate change: evolutionary perspectives. *Trends in Plant Science*, 28(5), 519-526.
- Yirga, M. (2020). Potential effects, biology and management options of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*): A review. *International Journal of Forestry and Horticulture*. 6: 19-31.

