



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
PROGRAMA DE POSGRADO

**Escenarios climáticos para eventos con impactos de roya, ojo de gallo y
broca del café en Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica**

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y Programa de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

Magister Scientiae en
Agroforestería y Agricultura Sostenible

Sustentante

Karina María Hernández Espinoza

Turrialba, Costa Rica

2019

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA
Y AGRICULTURA SOSTENIBLE**

FIRMANTES:





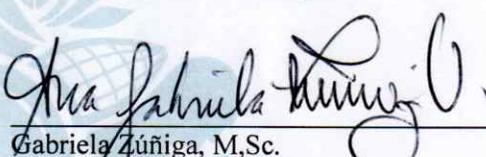
Jacques Avelino, Ph.D.
Codirector de tesis



Fernando Casanoves, Ph.D.
Codirector de tesis



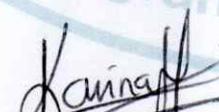
Eric Alfaro, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Gabriela Zúñiga, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

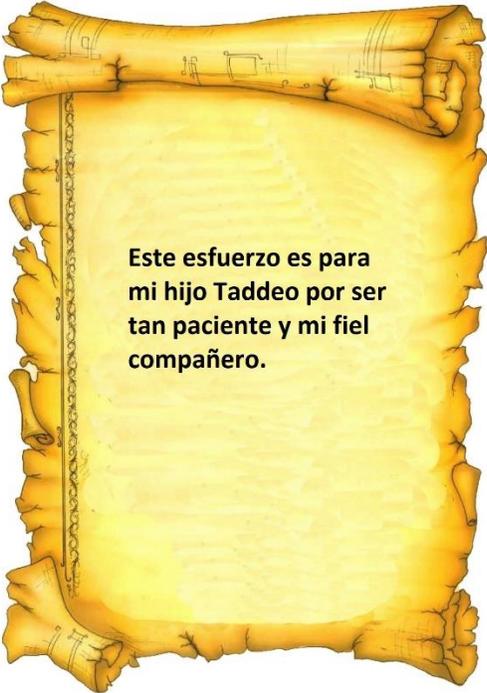


Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana Escuela de Posgrado



Karina Hernández Espinoza
Candidata

Dedicatoria



**Este esfuerzo es para
mi hijo Taddeo por ser
tan paciente y mi fiel
compañero.**

Agradecimientos

Este trabajo es producto de un esfuerzo interdisciplinario que muy amablemente el epidemiólogo Jacques Avelino, el bioestadístico Fernando Casanoves, el climatólogo Eric Alfaro y la agrónoma zootecnista Gabriela Zúñiga aceptaron conformar. Ha sido un trabajo pionero en la región por el cual les estoy profundamente agradecida de formar parte. Sin el apoyo de Sergio Vílchez de la Unidad de Bioestadística del CATIE la fase inicial de la investigación me hubiera tomado el triple de tiempo. Fue gracias al apoyo financiero del CATIE y PROCAGICA que pude trasladarme durante el año 2018 a la ciudad de Turrialba con mi familia para cursar esta especialización. Sin la guía administrativa de Aranjid Valverde Naranjo la tramitación no hubiese sido tan simple. Sin el apoyo de los Servicios Meteorológicos de la región centroamericana INSIVUMEH de Guatemala, SMNH de Honduras, MARN de El Salvador y IMN de Costa Rica esta investigación no hubiese sido posible de realizar ya que ellos aportaron los insumos meteorológicos requeridos. Gracias a las publicaciones generadas por los Institutos de Café de la región IHCAFE de Honduras, CSC de El Salvador, ANACAFE de Guatemala y ICAFE de Costa Rica fue posible listar la incidencia de broca, roya y ojo de gallo del café durante los últimos 30 años en Centroamérica. Gracias al apoyo Institucional que me brindó el IMN a través de Ana Rita Chacón Araya, mi jefa en el Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas del IMN, me fue posible disponer tiempo laboral durante el año 2019 para dedicarme a esta investigación. Gracias a la administradora Cindy Guerrero Venegas, la geógrafa Nury Sanabria Valverde y el estadístico Rubén Morales Aguilar, compañeros de trabajo en el IMN, por sus aportes. Gracias a mi colega y amigo Berny Fallas por la lectura del documento. Gracias a mi adorado Robert Picado Jiménez y mis amados padres por quienes me fue posible mantenerme enfocada y concluir exitosamente con mi tesis.

Índice general

Dedicatoria	III
Agradecimientos.....	IV
Índice general	V
Índice de cuadros.....	VII
Índice de figuras	IX
Lista de acrónimos.....	XI
1. Introducción general	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Preguntas de investigación	3
2. Marco teórico	3
2.1 Factores climáticos que influyen en la incidencia de plagas y enfermedades	4
2.2 Forzantes atmosféricos y oceánicos que afectan plagas y enfermedades	4
2.3 Otros factores que influyen en la ocurrencia de epidemias	5
3. Evaluación de escenarios climáticos de broca, roya y ojo de gallo en el año 2018....	6
4. Principales resultados y conclusiones.....	6
5. Referencias bibliográficas	7
6. Anexos.....	9
Artículo I. Rangos climáticos óptimos de crecimiento para la broca (<i>H. hampei</i>), roya (<i>H. vastatrix</i>) y ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) en Centro América.....	12
1. Introducción.....	13
2. Materiales y métodos	15
3. Resultados	15
3.1 Resultados para la roya (<i>H. vastatrix</i>)	16
3.1.1 Agente causal y síntomas.....	16
3.1.2 Impactos	16
3.1.3 Ciclo.....	16
3.1.4 Factores climáticos que la afectan.....	17
3.2 Resultados para ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>).....	18
3.2.1 Agente causal y síntomas.....	18
3.2.2 Impactos	18
3.2.3 Ciclo.....	19
3.2.4 Factores climáticos que la afectan.....	19
3.3 Resultados para la broca (<i>H. hampei</i>)	20
3.3.1 Agente causal y síntomas.....	20
3.3.2 Impactos	20
3.3.3 Ciclo.....	20
3.3.4 Factores climáticos que la afectan.....	21

4. Discusión: identificación de variables principales para el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo	23
7. Conclusiones	25
8. Recomendaciones	25
9. Referencias bibliográficas	25
Artículo II. Años con características climáticas comunes favorables para la ocurrencia de broca (<i>H. hampei</i>), roya (<i>H. vastatrix</i>) y ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) en Centroamérica	29
1. Introducción.....	30
2. Materiales y métodos	31
2.1 Ubicación del área de estudio.....	31
2.2 Descripción del área de estudio, características climáticas.....	31
2.3 Datos de estaciones meteorológicas.....	32
2.4 Análisis cuantitativo de datos climáticos	34
2.5 Análisis cualitativo	36
3. Resultados	37
3.1 Resultados de roya (<i>Hemileia vastatrix</i>)	37
3.1.1 Factores climáticos seleccionados	37
3.1.2 Categorías climáticas.....	39
3.1.3 Reportes de incidencia de roya.....	40
3.1.4 Reportes de incidencia en agrupaciones de roya	41
3.2 Resultados del ojo de gallo (<i>Mycena citricolor</i>).....	42
3.2.1 Factores climáticos seleccionados	42
3.2.2 Categorías climáticas.....	44
3.2.3 Reportes de incidencia de ojo de gallo	45
3.2.4 Reportes de incidencia en agrupaciones de ojo de gallo	46
3.3 Resultados de la broca (<i>Hypothenemus hampei</i>).....	47
3.3.1 Factores climáticos seleccionados	47
3.3.2 Categorías climáticas.....	50
3.3.3 Reportes de incidencia de broca	51
3.3.4 Reportes de incidencia en agrupaciones de broca	52
4. Discusión	53
5. Conclusiones	55
6. Recomendaciones.....	56
7. Referencias bibliográficas	56
8. Anexos.....	60
Entrevista	60
Artículo III. Escenarios climáticos para la ocurrencia de broca (<i>H. hampei</i>), roya (<i>H. vastatrix</i>) y ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) en Centroamérica.....	61
1. Introducción.....	62
2. Materiales y métodos	64
2.1 Categorías de factores océano-atmosféricos	64

2.2 Análisis estadístico	66
2.3 Aplicación de los escenarios climáticos	66
3. Resultados	67
3.1 Relación entre categorías climáticas de roya y categorías de los factores océano-atmosféricos.....	67
3.2 Relación entre categorías climáticas de ojo de gallo y categorías de los factores océano-atmosféricos	71
3.3 Relación entre categorías de broca y categorías de los factores océano-atmosféricos.....	75
4. Discusión	78
5. Conclusiones	84
6. Recomendaciones.....	85
7. Referencias bibliográficas	85

Índice de cuadros

Cuadro 1. Evaluación de escenarios climáticos para roya (<i>H. vastatrix</i>), ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) y broca (<i>H. hampei</i>) aplicados al año 2018. El color rosa identifica aquellos factores que coinciden con algún escenario para la respectiva enfermedad o la plaga	6
Cuadro 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas, con elevaciones superiores a 500 m s.n.m. en o cerca de zonas cafetaleras, utilizadas para Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica.....	33
Cuadro 3. Elementos climáticos identificadas mediante la revisión bibliográfica del Artículo I de esta investigación, consideradas de importancia para el desarrollo de la broca, roya y ojo de gallo, con su respectivo periodo de influencia	34
Cuadro 4. Listado de variables climáticas, así como su respectivo periodo de influencia, identificadas como potenciadoras del desarrollo de la roya (<i>H. vastatrix</i>) según los resultados del Artículo I.....	37
Cuadro 5. Variables climáticas en su respectivo periodo de acción que influyen en el desarrollo de la roya (<i>H. vastatrix</i>) como enfermedad del café, consideradas no redundantes.....	38
Cuadro 6. Prueba de medias y categorización de las variables utilizadas para roya (<i>H. vastatrix</i>). El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 4.....	39
Cuadro 7. Reportes de incidencia de roya (<i>H. vastatrix</i>) según revistas de institutos nacionales de café, encuesta, investigaciones científicas y tesis, para Costa Rica (CR), Honduras (HO), El Salvador (ES) y Guatemala (GU) en el periodo 1987 al 2017.....	41
Cuadro 8. Listado de variables identificadas en el Artículo I de esta investigación y su respectiva época considerada útil para para el desarrollo del ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) del café en Centroamérica	43
Cuadro 9. Variables climáticas y su respectivo periodo de acción que influyen en el desarrollo del ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) como enfermedad del café. Estas variables climáticas son consideradas no redundantes.....	44
Cuadro 10. Prueba de medias y categorización de las variables utilizadas para ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>), en cada uno de los grupos generados. El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 8	45

Cuadro 11. Reportes de incidencia de ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) según revistas de institutos nacionales de café, investigaciones y tesis, para Costa Rica (CR), Honduras (HO), El Salvador (ES) y Guatemala (GU) en el periodo 1987 al 2017	46
Cuadro 12. Variables identificadas en el Artículo I de esta investigación y su respectiva época considerada útil para para el desarrollo de la broca (<i>H. hampei</i>) del café en Centroamérica. 48	
Cuadro 13. Variables climáticas en su respectivo periodo de acción que influyen en el desarrollo de la broca (<i>H. hampei</i>) como plaga del café, consideradas no redundantes	49
Cuadro 14. Prueba de medias y categorización de las variables utilizadas para broca (<i>H. hampei</i>), en cada uno de los grupos generados. El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 13	51
Cuadro 15. Reportes de incidencia de broca (<i>H. hampei</i>) según revistas de institutos nacionales de café, investigaciones y tesis, para Costa Rica (CR), Honduras (HO), El Salvador (ES) y Guatemala (GU) en el periodo 1987 al 2017	52
Cuadro 16. Categorías de favorecimiento climático por año para el desarrollo de broca (<i>Hypothenemus hampei</i>), roya (<i>Hemileia vastatrix</i>) y ojo de gallo (<i>Mycena citricolor</i>)	54
Cuadro 17. Formato de entrevista	60
Cuadro 18. Percentiles de los factores océano atmosféricos a nivel de periodos P1 del 1 de diciembre al 30 de abril, P2 del 1 de mayo al 30 de junio, P3 del 1 de julio al 31 de agosto y P4 del 1 de septiembre al 30 de noviembre.....	65
Cuadro 19. Rangos utilizados en la generación de las tres categorías océano-atmosféricas utilizadas.....	66
Cuadro 20. Valores-p de la prueba de medias entre los factores océano-atmosféricos y los grupos climáticas definidos para la roya (<i>H. vastatrix</i>) en el Artículo II. El color rojo identifica aquellas relaciones con significancia al 5%.....	67
Cuadro 21. Influencia de los factores océano-atmosféricos sobre el desarrollo de la roya (<i>H. vastatrix</i>). Los colores simbolizan las diferencias de medias: ■ más altas, ■ medianamente altas, ■ intermedias, ■ medianamente bajas y ■ más pequeñas.....	69
Cuadro 22. Comportamiento de los factores océano-atmosféricos durante los tres años que conforman la categoría "Muy favorable" para el desarrollo de la roya (<i>H. vastatrix</i>) a lo largo del año. Las categorías de los factores océano-atmosféricas se describen en el Cuadro 18..	70
Cuadro 23. Valores-p para la prueba de medias entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos del ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>). El color rojo identifica aquellas relaciones con significancia al 5%	71
Cuadro 24. Influencia que los factores océano-atmosféricos sobre el desarrollo del ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>). Los colores simbolizan las diferencias de medias: ■ más altas, ■ altas, ■ intermedias, ■ medianamente bajas y ■ más pequeñas	74
Cuadro 25. Comportamiento de los factores océano-atmosféricos durante los cinco años que conforman la categoría "Muy favorable" para el desarrollo del ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) a lo largo del año. Las categorías de los factores océano atmosféricas se describen en el Cuadro 18	75
Cuadro 26. Valores-p para la prueba de medias entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos definidos para la broca (<i>H. hampei</i>). El color rojo identifica aquellas relaciones con significancia al 5%	76
Cuadro 27. Influencia de los factores océanos-atmosféricos sobre el desarrollo de la broca (<i>H. hampei</i>). Los colores simbolizan las diferencias de medias: ■ más altas, ■ intermedias y ■ más pequeñas	76
Cuadro 28. Comportamiento de los factores océano-atmosféricos durante los tres años que conforman la categoría "Muy favorable" para el desarrollo la broca (<i>H. hampei</i>) a lo largo del año. Las categorías de los factores océano atmosféricas se describen en el Cuadro 18	78

Cuadro 29. Escenarios climáticos del periodo diciembre a abril para roya (<i>H. vastatrix</i>). Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la enfermedad.....	80
Cuadro 30. Escenarios climáticos del periodo mayo a junio para roya (<i>H. vastatrix</i>). Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la enfermedad	80
Cuadro 31. Escenarios climáticos del periodo julio y agosto para roya (<i>H. vastatrix</i>). Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la enfermedad	81
Cuadro 32. Escenarios climáticos del periodo setiembre a noviembre para roya (<i>H. vastatrix</i>). Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la enfermedad.....	81
Cuadro 33. Escenarios climáticos para ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) durante el periodo diciembre-abril. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para el hongo	82
Cuadro 34. Escenarios climáticos para ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) durante el periodo mayo-junio. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para el hongo	82
Cuadro 35. Escenarios climáticos para ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) durante el periodo julio-agosto. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para el hongo	83
Cuadro 36. Escenarios climáticos para ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) durante el periodo setiembre-noviembre. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para el hongo.....	83
Cuadro 37. Escenarios climáticos que favorecen a la broca (<i>H. hampei</i>) entre diciembre y abril. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la plaga.....	84
Cuadro 38. Escenarios climáticos que favorecen a la broca (<i>H. hampei</i>) entre mayo y junio. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la plaga	84
Cuadro 39. Escenarios climáticos que favorecen a la broca (<i>H. hampei</i>) entre julio y agosto. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la plaga	84

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de relación entre influencias del clima y el sistema patológico en enfermedades del cultivo. Fuente: Chakraborty et al. (2000).	3
Figura 2. Diagrama de procedimiento detallado del Artículo I.	9
Figura 3. Diagrama de procedimiento detallado del Artículo II.....	10
Figura 4. Muestra de cálculo de las calificaciones de los grupos climáticos del Artículo II. ...	10
Figura 5. Diagrama de procedimiento detallado del Artículo III.....	11
Figura 6. Desplazamiento de la roya en América (McCook y Vandermeer 2015).	14
Figura 7. Tetraedro de la enfermedad (Zadoks y Schein, 1979).	15
Figura 8. Diagrama de procedimiento de la identificación de variables para el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo del cafeto.	15
Figura 9. Ciclo de la roya (<i>H. vastatrix</i>) del café (Avelino y Rivas 2015).....	16
Figura 10. Desarrollo del ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>) del café. (Modificado de Buller (1957) y ANACAFE).	18

Figura 11. (a) Broca (<i>H. hampei</i>) emergiendo del grano de café (Crédito de la foto: OIRSA). (b) Broca del café (<i>H. hampei</i>) dentro del grano de café (Crédito de la foto: Proveedor de insumo forestales).	20
Figura 12. Ciclo de vida de la broca (<i>H. hampei</i>) del café. Modificado de Tandazo et al. (1997).	21
Figura 13. Mapa de la distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas en Costa Rica. Los detalles de las estaciones según su código numérico se especifican en el Cuadro 2.	32
Figura 14. Mapa de la distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas en El Salvador, Honduras y Guatemala. Los detalles de las estaciones según su código numérico se especifican en el Cuadro 2.	33
Figura 15. Diagrama de flujo del proceso realizado en el análisis cuantitativo para la identificación de las tipologías climáticas para broca, roya y ojo de gallo. Este proceso se realiza de forma independiente para cada enfermedad y la plaga	35
Figura 16. Muestra de cálculo para la calificación de los grupos de broca, roya y ojo de gallo	35
Figura 17. Biplot del Análisis de Componentes Principales (ACP), generado utilizando "año" como criterio de clasificación de las variables estudiadas para el caso de la roya (<i>H. vastatrix</i>) en Centroamérica. El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 4	38
Figura 18. Dendograma de las variables definidas para roya (<i>H. vastatrix</i>), con año como criterio de clasificación, donde se generan 7 grupos utilizando distancia Euclídea y el método Ward	39
Figura 19. Biplot del Análisis de Componentes Principales (ACP), generado utilizando "año" como criterio de clasificación de las variables estudiadas para el caso del ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>). El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 8	43
Figura 20. Dendograma de las variables definidas para el ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>), con año como criterio de clasificación. Se generan 6 grupos utilizando distancia Euclídea y el método Ward	44
Figura 21. Biplot del Análisis de Componentes Principales (ACP), generado utilizando "año" como criterio de clasificación de las variables estudiadas para el caso de la broca (<i>H. hampei</i>). El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 12.....	49
Figura 22. Dendograma de las variables definidas para la broca (<i>H. hampei</i>), con año como criterio de clasificación. Se generan 5 grupos utilizando distancia Euclídea y el método de Ward.	50
Figura 23. Diagrama del proceso metodológico aplicado en la identificación de escenarios climáticos para broca, roya y ojo de gallo en Centroamérica, utilizando los factores océano atmosféricos ENOS, AMO y CLLJ, así como las categorías climáticas del Artículo II	64
Figura 24. Gráficos de las pruebas de medias con diferencias significativas al 5%, entre los factores océano-atmosféricos y los grupos climáticos definidos para la roya (<i>H. vastatrix</i>). Relación de la roya con AMO(a), CLLJ(b) y DME_AMO-CLLJ(c) durante P1. Relación de la roya con DME_AMO-CLLJ(d) durante P2. Relación de la roya con AMO(e) y DME_AMO-CLLJ(f) durante P3. Relación de la roya con AMO(g), CLLJ(h) y DME_AMO-CLLJ(i) durante P4. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18.....	68
Figura 25. Gráficos de las pruebas de medias con diferencias significativas al 5%, entre los factores océano-atmosféricos y los grupos climáticos definidos para la roya (<i>H. vastatrix</i>). Relación de la roya con AMO(a), CLLJ(b) y DME_AMO-CLLJ(c) durante P4. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18	69
Figura 26. Gráficos de las diferencias de medias con significativas al 5%, entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos del ojo de gallo (<i>M. citricolor</i>). Relación del ojo de gallo con DME_AMO-N34(a) y DME_AMO-N34+CLLJ(k) durante P1.	71

Figura 27. Gráficos de las diferencias de medias con significativas al 5%, entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos del ojo de gallo (*M. citricolor*). Relación del ojo de gallo con NIÑO3-4(b) y DME_CLLJ-N34(c) durante P2. Relación del ojo de gallo con CLLJ(d), NIÑO3-4(e), DEM_AMO-N34(f) y DME_CLLJ-N34(g) durante P3. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18..... 72

Figura 28. Gráficos de las diferencias de medias con significativas al 5%, entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos del ojo de gallo (*M. citricolor*). Relación del ojo de gallo con DME_AMO-N34+CLLJ(l) durante P3. Relación del ojo de gallo con CLLJ(h), NIÑO3-4(i), DME_CLLJ-N34(j) y DME_AMO-N34+CLLJ(m) durante P4. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18..... 73

Figura 29. Gráficos de aquellas medias con diferencias significativas al 5%, entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos definidos para la broca (*H. hampei*). Relación de la broca con DME_AMO-N34(a) y DME_AMO-N34+CLLJ(d) durante P1. Relación de la broca con DME_AMO-N34(b) y DME_AMO-N34+CLLJ(e) durante P2. Relación de la broca con CLLJ(c) durante P3. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18..... 77

Lista de acrónimos

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
IMN: Instituto Meteorológico Nacional
INSIVUMEH: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
SMNH: Servicio meteorológico Nacional de Honduras
MARN: Ministerio de ambiente y recursos naturales
IHCAFE: Instituto de café de Honduras
CSC: Consejo Salvadoreño de Café
ICAFE: Instituto del Café de Costa Rica
ANACAFE: Asociación Nacional del Café
CENTA: Centro nacional de tecnología agropecuaria y forestal
CICAFE: Centro de Investigaciones en Café
PROMECAFE: Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y la Modernización de la Caficultura de Centroamérica, República Dominicana y Jamaica
IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
AMO: Índice de la oscilación Multidecadal del Atlántico Norte
PDO: Oscilación Decadal de Pacífico
Niño3-4: El Niño Oscilación del Sur en la sección 3.4
CLLJ: Caribbean Low-Level Jet
PROCAGICA: Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roya del Café
OMM: Organización Meteorológica Mundial
IRI: International Research Institute
CLIMDEX: datasets for Indices of Climate Extremes
CPT: Climate Predictability Tool
CRRH: Comité Regional de Recursos Hidráulicos
IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático
ENOS: El Niño Oscilación del Sur
NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration
PSD: Physical Science Division
NMME: The North American Multi-Model Ensemble
mm: milímetros
m s.n.m.: metros sobre el nivel del mar
%: porcentaje

°C: grados Celsius

SSTA: sea surface temperature anomaly

SICA: Sistema de Integración Centroamericano

SVM: support vector machine

MSD: mid-summer drought

1. Introducción general

En la región centroamericana la incidencia de la plaga y enfermedades del café, como la broca, la roya y ojo de gallo, respectivamente, ha incrementado durante los últimos años (Avelino et al. 2007, Avelino et al. 2015 y Jaramillo et al. 2011). Estas plagas y enfermedades se han expandido a zonas donde inicialmente no se tenían reportes. La II Cumbre de Roya organizada por el Programa Centroamericano de Gestión Integral de Roya de café, reporta pérdidas del 20% de la producción de café 2012-2013. Estas pérdidas se asocian a la roya en América Central y República Dominicana (PROMECAFE 2016).

Tanto el café (*Coffea arabica* L) como la roya (*Hemileia vastatrix*) y la broca (*Hypothenemus hampei*) son endémicos de África (Etiopía y Sudán). Jaramillo et al. (2011) mencionan que la broca es originaria de África Central. La broca del café llegó a Centroamérica del norte del continente, afectando Guatemala en 1971, Honduras en 1977 y El Salvador en 1981 (Dufour et al. 1999). Mientras que en Costa Rica se reporta hasta el año 2000 (Rojas 2012).

En Centroamérica la roya se hizo presente en todos los países de forma paulatina. El primer país centroamericano en reportar roya fue Nicaragua en 1976. Durante el periodo de estudio el primer afectado por roya fue El Salvador en 1987, seguido en 1980 por Honduras y Guatemala, mientras Costa Rica identifica la presencia de roya hasta 1983 (Avelino y Rivas 2014). La roya en Costa Rica fue reportada 114 años después de su primer reporte en África Oriental en 1869 (Barquero 2013). Ante este panorama los países centroamericanos se organizaron para establecer PROMECAFE en 1987.

El café (*Coffea arabica* L) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*) se encontraron en América, después de haber evolucionado separadamente (Avelino et al. 2007). Wang y Avelino (1999) comentan que el primer registro del ojo de gallo en Costa Rica y Venezuela fue en 1881, y un año antes en Colombia. Tras su incursión en 1981, se expande rápidamente a todo el continente americano, razón por la cual se le nombra "american leaf spot of coffee" (Wang y Avelino 1999). En la región centroamericana el primer país en reportar su incidencia y el más afectado por el ojo de gallo es Costa Rica (Wang y Avelino 1999).

El ojo de gallo posee un gran número de hospederos, afecta la producción cafetalera y su efecto directo en la producción se debe a la defoliación del cafeto afectando también afecta las ramas y frutos (Wang y Avelino 1999). Las hojas afectadas presentan una mancha de color rojo que puede ser circular u ovalada (Avelino et al. 2007). La dispersión de esta enfermedad se da mediante la caída de las gemas directamente de la hifa, que son diseminadas a otras hojas gracias a la lluvia.

Por otra parte, la roya es un parásito obligatorio del cafeto y afecta la producción cafetalera. Causa muerte de las ramas debido a la defoliación y por tanto grandes pérdidas económicas como efecto de la pérdida de frutos. Las pérdidas económicas debido a la roya incluso se perciben durante los años subsiguientes (denominadas pérdida secundaria). Las pérdidas primarias, aquellas ocurridas durante el año en que inicia la epidemia de roya, son menos significativas que las secundarias.

En cuanto a la broca, esta es dependiente del cafeto y es la plaga más importante en la caficultura mundial. Su principal impacto es a nivel del fruto del cafeto, afectando su precio comercial (Jaramillo et al. 2011). La dinámica del insecto hembra y macho es diferente, mientras la hembra broca preñada vuela en busca de nuevos frutos, el macho por ser áptero se mantiene dentro del fruto brocado.

Tanto la broca, como la roya y el ojo de gallo son dependientes del clima. Los primeros reportes de broca se dan en plantaciones que no superaban los 1500 m s.n.m., pero debido al aumento de las temperaturas se tienen reportes de broca en mayores elevaciones (Jaramillo et al. 2011). La roya se favorece con condiciones de clima húmedo (Waller 1982). La ocurrencia

del ojo de gallo tiene relación directa con la humedad ambiental alta (>80%) y radiación baja (alta nubosidad), por lo que son más susceptibles los cafetos bajo sombra (Ramírez y Gómez 2014).

El efecto del clima sobre la producción agrícola es un factor incontrolable, pero es posible adaptarse a éste, sabiendo cómo se van a comportar las variaciones climáticas, aunque sea de manera general. Mediante la identificación de escenarios climáticos anuales de aquellos años con ocurrencia de roya, broca y ojo de gallo, los productores de café de Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica podrán prever su actuar con respeto al control de plagas y enfermedades.

La existencia de escenarios climáticos de roya, broca y ojo de gallo del café pueden ser útiles para la región centroamericana. El Foro del Clima Centroamericano es organizado por el Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH), quien conforma la secretaria técnica del Sistema de Integración Centroamericano (SICA). CRRH es el encargado de organizar las actividades relacionadas con pronósticos del tiempo, clima, recurso hídrico y evaluaciones de cambio climático en los siguientes países: Guatemala, Honduras, El Salvador, Costa Rica, Belice, Nicaragua y Panamá (García-Solera y Ramírez 2012). Los pronósticos regionales trimestrales generados por CRRH y los escenarios climáticos generados en esta investigación pueden ser utilizados por los Ministerios de Agricultura y los Institutos de Café de cada país en los llamados Foros de Aplicaciones. Esta contraposición de información aumentará la resiliencia del sector cafetalero, gracias a la identificación del riesgo potencial de ocurrencia de roya, ojo de gallo y broca del café en la región centroamericana.

En esta investigación se plantea la componente climática de un modelo para pronóstico de alerta temprana de la plaga broca (*H. hampei*), así como para las enfermedades roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) del café. Mediante una revisión bibliográfica se obtienen las variables climáticas y periodo de influencia en el desarrollo de la plaga y las enfermedades. Tras calcular las variables con datos reales se agrupan aquellos años climáticamente similares, se les asigna una calificación que se traduce en una clasificación climática de cinco categorías y por último se extraen escenarios climáticos que identifica la relación entre las categorías climáticas muy favorables para el desarrollo de la plaga/enfermedad y los factores océano-atmosféricos El Niño Oscilación del Sur (ENOS), Jet de bajo nivel del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Identificar escenarios climáticos para aquellos años con impactos de plagas y enfermedades de café en Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica.

1.2.2 Objetivos específicos

1) Determinar mediante consulta de fuentes bibliográficas las variables climáticas y sus rangos adecuados de desarrollo para la broca (*H. hampei*), la roya (*H. vastatrix*) y el ojo de gallo (*M. citricolor*).

2) Agrupar los años con características climáticas comunes, basado en la revisión bibliográfica, para la ocurrencia de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*).

3) Identificar escenarios de clima que favorecen el desarrollo de epidemias de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) en Centroamérica.

1.3 Preguntas de investigación

- 1) ¿Existe información en la literatura que defina variables y umbrales climáticos favorables para la activación de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*)?
- 2) ¿Es posible generar tipologías de la incidencia broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) según el riesgo climático de ocurrencia?
- 3) ¿Es posible obtener escenarios de clima que favorecen el desarrollo de epidemias de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) en Centroamérica?

2. Marco teórico

La incidencia de plagas y enfermedades, así como los efectos del clima sobre estos varían según la escala espacial que se trabaje. Chakraborty et al. (2000) en el diagrama de la Figura 1 muestran la influencia que tienen los cambios en la composición de la atmósfera, el uso de la tierra y el clima, sobre las enfermedades que afectan los cultivos. El diagrama refleja el nivel de entendimiento de las enfermedades (rectángulos punteados) y el clima (rectángulo gris) según la escala que se analice, donde a nivel micro climático el entendimiento de enfermedades es el mismo. Este entendimiento varía mientras aumentamos la escala de análisis, por lo que a meso escala el entendimiento del clima sigue siendo bueno pero el de la enfermedad no y en un análisis global se mantiene el buen entendimiento del clima, pero es aún menor el entendimiento de la enfermedad.

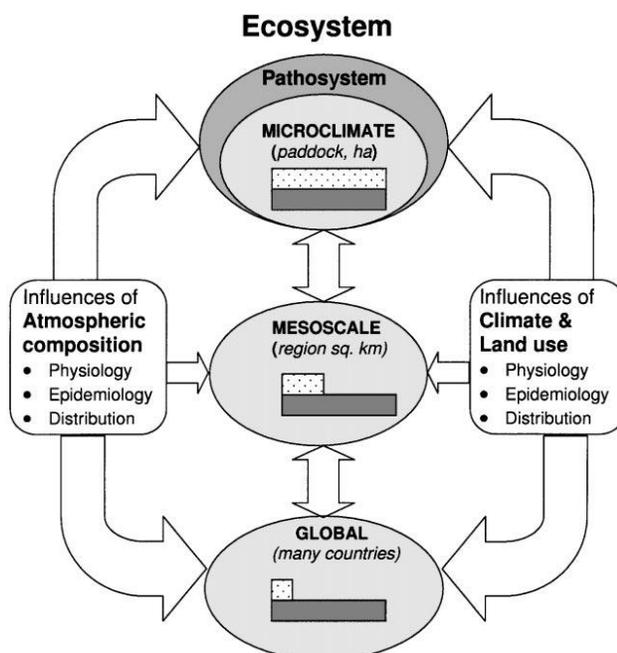


Figura 1. Diagrama de relación entre influencias del clima y el sistema patológico en enfermedades del cultivo. Fuente: Chakraborty et al. (2000).

El clima influye en las enfermedades de los cultivos, más que otros factores. Savary et al. (2016) mediante un análisis de variedades de trigo, años climáticos y enfermedades, encontraron que para el cultivo de trigo el riesgo de incidencia de enfermedades se ve influenciado por el clima. El riesgo de enfermedades en el análisis del sistema patológico de múltiples enfermedades del trigo se ve influenciado en el siguiente orden descendente: años climáticos, variedad de trigo y manejo del cultivo. No se tomó en cuenta la intensidad de la enfermedad, que posiblemente se vería muy influenciada por el manejo.

Las plagas y enfermedades del café no solo se ven afectadas por el clima, pero este genera las condiciones propicias para su desarrollo. En Centroamérica uno de los factores con mayor relevancia en el clima es El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (CRRH 2016). La broca, roya y ojo de gallo son dependientes del clima en cuanto a su desarrollo y dispersión (Avelino et al. 2015, Jaramillo et al. 2011 y Ramírez y Gómez 2014). Otros factores que influyen en la incidencia de roya, broca y ojo de gallo son las características del patógeno, del hospedero y el manejo del cultivo.

El trabajo de tesis se enmarca en el Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roya del Café (PROCAGICA), financiado por la Unión Europea (UE) y ejecutado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), a través de la delegación de acciones regionales a entidades como el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD). El programa tiene la finalidad de mejorar la resiliencia ante el cambio y variabilidad climáticos, principalmente en los países de Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua.

2.1 Factores climáticos que influyen en la incidencia de plagas y enfermedades

El clima influye en la incidencia de la roya. Uno de los dos principales responsables de una epidemia de roya son los factores climáticos. El gradiente térmico fue identificado como una de las similitudes entre años con epidemias causadas por roya en Colombia y Centroamérica en los últimos años (Avelino et al. 2015).

Así mismo, el clima influye en la incidencia del ojo de gallo. El ojo de gallo se ve favorecido en su etapa de dispersión por la lluvia que permite a las gemas maduras transportarse a las hojas subyacentes desde las hojas con lesiones. La alta humedad relativa crea las condiciones necesarias para la formación de las gemas sobre las hojas con lesiones (Wang y Avelino 1999).

También, el clima influye en la incidencia de la broca. La temperatura genera variaciones en la fecundidad y emergencia de las hembras broca y esto influye directamente en la infestación. La proliferación de la broca está ligada a la floración y ésta a su vez está directamente ligada a la precipitación y humedad relativa (Jaramillo et al. 2010).

2.2 Forzantes atmosféricos y oceánicos que afectan plagas y enfermedades

Son varios los factores atmosféricos y oceánicos que influyen en el clima de la región centroamericana (Maldonado et al. 2018). Tres de los factores de relevancia en el clima centroamericano son el ENOS y AMO (CRRH 2016). El tercero es CLLJ indicador del viento que influye en gran medida sobre el clima de Centroamérica (Amador et al. 2010)

AMO está asociada a la intensidad de los huracanes del Atlántico Norte, la frecuencia de las sequías en América del Norte, así como a los cambios en el patrón de lluvias de América del Norte y Europa (Enfield et al. 2001). AMO influye en la fecha de inicio de la época lluviosa (Alfaro y Cid 1999). Un inicio adelantado de la época lluviosa está influenciado por SSTA positivas del Atlántico Norte Tropical. Un inicio retrasado del periodo lluvioso está directamente ligado a SSTA negativa del Atlántico Norte Tropical (Alfaro y Cid 1999).

El ENOS influye en la duración de la época lluviosa centroamericana. En el Pacífico centroamericano una fase cálida del ENOS influye negativamente sobre la época lluviosa, mientras que la fase fría del ENOS beneficia a la época lluviosa. Un final temprano de la época lluviosa está relacionado a SSTA positivas del Pacífico Oriental Tropical. Una finalización retrasada de la época lluviosa está ligada a SSTA negativas del Pacífico Oriental Tropical.

Jaramillo et al. (2011) menciona como efecto del cambio climático una mayor incidencia de fenómenos como el ENOS, que se asume podría causar sequías en algunas zonas y lluvias excesivas en otras zonas, afectando el comportamiento de plagas.

CLLJ tiene relevancia climática importante en Centroamérica, debido a que domina la circulación sobre el Mar Interamericano (IAS, por sus siglas en inglés), tanto en verano como en invierno. Es conocida la relación entre ENOS y CLLJ, y su efecto en el veranillo centroamericano. Mora y Amador (2000) identifican que durante una fase cálida del ENOS asociada a un CLLJ acelerado conlleva a un aumento de las lluvias entre junio y agosto en la región oeste del Caribe. Durante una fase fría del ENOS si se desacelera CLLJ, esto se asocia a una disminución de las lluvias orográficas en la región oeste del Caribe entre junio y agosto.

2.3 Otros factores que influyen en la ocurrencia de epidemias

El control biológico natural de plagas y enfermedades es importante en la caficultura. Las plantas de café forman parte del alimento de varios seres vivos, estos se mantienen controlados entre sí de forma que ninguno se reproduzca más que otros. Si ese equilibrio se ve afectado por acciones del productor o debido a cambios ambientales, pueden generarse sobrepoblaciones que afectan la cosecha (Guharay et al. 2000).

El manejo del cafetal influye en la epidemia de roya. Existente paralelismo entre la cosecha y el avance de la epidemia, que puede ser causado, entre otras cosas, por el tránsito de cogedores de café que fungen como dispersores de uredosporas (Avelino et al. 1999). El factor más influyente en el desarrollo de una epidemia de roya es la carga fructífera, ya que la receptividad de las hojas del cafeto es mayor en esta etapa. Por este motivo se considera que la roya tiene un comportamiento bienal paralelo al de la producción, lo que tiende a generar subestimación del efecto de la enfermedad, ya que con o sin roya el año siguiente a un año productivo siempre es año con baja producción (Avelino y Rivas 2015). La sombra es otro de los factores que influye en la incidencia y severidad de la epidemia. En cafetales bajo sombra de eritrina se reporta una incidencia de roya hasta 29% mayor que bajo pleno sol. Los procesos pre infecciosos de germinación y penetración se ven favorecidos por la mojadura foliar y la disminución de 6°C de temperatura en comparación con pleno sol (Avelino y Rivas 2015). La sombra también tiende a reducir el lavado de esporas por la intercepción del agua de lluvia por los árboles de sombra, fenómeno que ayuda a eliminar las esporas y regular las epidemias. Para una reducción efectiva de esporas es necesario seleccionar árboles de sombra con características que permitan la penetración del agua de lluvia en el cafetal, como hojas pequeñas, recortadas y flexibles (Segura 2017 y Brenes 2016).

La variación de precio del mercado de café influye en la epidemia de roya. El descenso en el precio del café de hasta 30% durante el año 2012, respecto al año anterior, conllevó a una disminución en el manejo de los cafetales propiciando las condiciones de desnutrición de los cafetos. Entre otros factores, la desnutrición del cafeto favoreció que la enfermedad tomara las dimensiones que se registran en la epidemia del 2012 (Avelino y Rivas 2015).

Por otra parte, el inóculo residual influye en la epidemia de roya y ojo de gallo. El inóculo residual es aquel inóculo formado por las lesiones necrosadas y/o latentes que mantiene la hoja del cafeto tras su supervivencia en la época seca. La existencia del inóculo residual de roya puede ser reactivado por las primeras lluvias del año, formando un inóculo primario. Una alta carga fructífera acompañada de evento fuerte de roya produce defoliación (Avelino y Rivas 2015). Esta defoliación actúa como regulador de la epidemia de roya debido a que la roya es un hospedero obligado que solo puede sobrevivir en las hojas vivas del cafeto, contribuyendo a disminuir el inóculo residual. La existencia del inóculo residual influye en las etapas de desarrollo de la epidemia del ojo de gallo (Wang y Avelino 1999).

3. Evaluación de escenarios climáticos de broca, roya y ojo de gallo en el año 2018

Es posible aplicar evaluar los escenarios climáticos para identificar si el comportamiento océano-atmosférico del año 2018 coincide con alguno de los dos escenarios de roya o los cinco escenarios de ojo de gallo o los tres escenarios de broca. Se obtiene el Cuadro 1 tras estimar los promedios de los factores océano-atmosféricos para cada uno de los cuatro periodos del año y estandarizar los valores del año 2018 junto con los del periodo de análisis de la investigación (1987-2017). El color rosa identifica aquellas variables en su respectivo periodo coincidente con alguno de los escenarios climáticos. Se obtiene un año 2018 sin condiciones propicias para el desarrollo de una epidemia de roya u ojo de gallo o broca. Se cumple el escenario climático de roya solamente en el periodo de mayo a junio debido a la categoría baja de la diferencia de medias estandarizada entre AMO y CLLJ. Para el ojo de gallo se obtiene semejanza con el escenario climático que contiene una fase fría de El Niño3.4 y una diferencia de medias estandarizada alta entre CLLJ y Niño3.4 en el periodo mayo a junio. Mientras los factores océano-atmosférico definidos para la broca en el periodo julio a agosto de los tres escenarios climáticos es igual al obtenido durante el año 2018.

Cuadro 1. Evaluación de escenarios climáticos para roya (*H. vastatrix*), ojo de gallo (*M. citricolor*) y broca (*H. hampei*) aplicados al año 2018. El color rosa identifica aquellos factores que coinciden con algún escenario para la respectiva enfermedad o la plaga

Factor de Roya	Periodo	Año 2018	Factor de Ojo de gallo	Periodo	Año 2018	Factor de Broca	Periodo	Año 2018
AMO	Dic-Abril	Alto	DME_AMO-N34	Dic-Abril	Alto	DEM_AMO-N34	Dic-Abril	Alto
CLLJ	Dic-Abril	Alto	DME_AMO-N34+CLLJ	Dic-Abril	Bajo	DME_AMO-N34+CLLJ	Dic-Abril	Bajo
DME_AMO-CLLJ	Dic-Abril	Alto						
			NIÑO3-4	May-Jun	Bajo	DEM_AMO-N34	May-Jun	Medio
DME_AMO-CLLJ	May-Jun	Bajo	DME_CLLJ-N34	May-Jun	Alto	DME_AMO-N34+CLLJ	May-Jun	Medio
AMO	Jul-Ago	Bajo	CLLJ	Jul-Ago	Alto	CLLJ	Jul-Ago	Alto
DME_AMO-CLLJ	Jul-Ago	Bajo	NIÑO3-4	Jul-Ago	Medio			
			DME_AMO-N34	Jul-Ago	Alto			
AMO	Sept-nov	Bajo	DME_CLLJ-N34	Jul-Ago	Alto			
CLLJ	Sept-nov	Alto	DME_AMO-N34+CLLJ	Jul-Ago	Alto			
DME_AMO-CLLJ	Sept-nov	Bajo						
			CLLJ	Sept-nov	Alto			
			NIÑO3-4	Sept-nov	Alto			
			DME_CLLJ-N34	Sept-nov	Bajo			
			DME_AMO-N34+CLLJ	Sept-nov	Bajo			

4. Principales resultados y conclusiones

Se unificó suficiente literatura que permite identificar las variables climáticas que influyen en el desarrollo de la broca (*H. hampei*), la roya (*H. vastatrix*) y el ojo de gallo (*M. citricolor*) en cuatro periodos al año. Los periodos utilizados son diciembre-abril, mayo-junio, julio-agosto y setiembre-octubre.

Se identificó literatura para documentar la incidencia de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) del café en Centroamérica durante los últimos 30 años. Esta información fue de utilidad para crear un control cruzado de la información generada por las estadísticas que arrojan las categorías climáticas que pueden ser "Muy favorables", "Favorables", "Medio favorables" y "Desfavorables" individualmente para cada enfermedad y la plaga. Las categorías climáticas "Muy favorable" contienen los años 2008, 2010 y 2012 reportados con epidemias de broca, ojo de gallo y roya respectivamente. Se identifica un periodo de cinco años con condiciones muy favorables para el desarrollo de la plaga y las dos enfermedades. Se evidencia que aquellas condiciones favorables para el desarrollo de la broca

pueden favorecer el desarrollo del ojo de gallo, por lo que se obtiene años comunes en sus categorías climáticas favorables.

Se obtuvieron escenarios climáticos favorables para el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo del café, que pueden ser utilizados como componente climática de un sistema de alerta temprana mediante el seguimiento de los pronósticos de AMO, ENOS y CLLJ a lo largo del año.

Al ser este un trabajo que no se ha desarrollado anteriormente, uno de los aportes al conocimiento es el procedimiento detallado de la investigación que puede ser utilizado para identificar escenarios de clima para otras plagas o enfermedades en esta y otras latitudes. Los diagramas de procedimiento detallados de cada Artículo de esta investigación se muestran en la sección de Anexos. La Figura 2 contiene el diagrama de procedimiento aplicado en la revisión bibliográfica que permitió identificar las variables climáticas que influyen en el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo. La Figura 3 muestra el proceso a seguir en la identificación de agrupaciones climáticas para la plaga y enfermedades. La Figura 4 presenta una muestra de cálculo de cómo se asignan las calificaciones individuales y totales de cada grupo climático por plaga/enfermedad. La Figura 5 lista el proceso que debe seguirse para identificar los escenarios climáticos para broca, roya y ojo de gallo.

5. Referencias bibliográficas

Amador, J. 2008. The Intra-Americas Sea Low-Level Jet. Overview and future research. *Trend and Directions in Climate Research*. 1146: 153-188

Amador, J; Alfaro, E; Rivera, E; Calderón, B. 2010. Chapter 9. Climatic Features and Their Relationship with Tropical Cyclones Over the Intra-Americas Sea. *Hurricanes and Climate Change: Volume 2*. (9): 149-173.

Alfaro, E; L. Cid. 1999. Análisis de las anomalías en el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y su relación con los océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 6(1): 1-13.

Avelino, J; Muller, R; Eskes, A.B; Holguin, F. 1999. La roya anaranjada del cafeto en América Central y el Sur de México. In Benoit Bertrand, Bruno Rapidel (ed.). *Desafíos de la caficultura en Centroamérica*. Francia, s.e. p.210-260.

Avelino, J; Cabut, S; Barboza, B; Barquero, M; Alfaro, R; Esquivel, C; Durand, J; Cilas, C. 2007. Topography and Crop Management Are Key Factors for the Development of American Leaf Spot Epidemics on Coffee in Costa Rica. *Ecology and Epidemiology*. 97:1532-1542.

Avelino, J. 2013. Efectos de la sombra sobre la roya del café. II cumbre de Roya. Guatemala. 16 p.

Avelino, J; Cristancho, M; Georgiou, S; Imbach, P; Aguilar, L; Bornemann, G; Läderach, P; Anzueto, F; Hruska, AJ. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008 – 2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Springer*. 7: 303-321.

Brenes, LMA. 2016. Efectos de la sombra de cashá (*Chloroleucon eurycyclum*) sobre los procesos de colonización, esporulación y dispersión aérea de la roya (*Hemileia vastatrix*) sobre plantas de café (*Coffea arabica*) en la zona de Turrialba. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.

- Chakraborty, AV; Teng, PS; Tiedemann, S. 2000. Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution*. 108: 317-326
- CRRH. 2016. L Foro del Clima de América Central V Foro del Clima de Mesoamérica 11 y 12 de julio del 2016 L Foro del Clima de América Central V Foro del Clima de Mesoamérica 11 y 12 de julio del 2016 San José, Costa Rica. *Perspectiva Regional del Clima*, s.l.; (1): 1-12.
- Dufour, B; Barrera, J; Dacazy, B. 1999. La broca de los frutos del cafeto ¿Lucho biológica cómo solución? *Desafíos de la caficultura en Centroamérica*. PROMECAFE. (9): 293-326.
- Enfield, D; Mestas-Nuñez, A; Trimble, P. 2001. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*. 28(10): 2077-2080.
- García-Solera, I; Ramírez, P. 2012. Central America's Seasonal Climate Outlook Forum. Consultado 21 septiembre 2018. http://www.climate-services.org/wp-content/uploads/2015/09/CRRH_Case_Study.pdf.
- Guharay, F; Monterrey, J; Monterroso, D; Staver, C. 2000. Manejo integrado de plagas en el cultivo de café. Managua, Nicaragua. 266 p.
- Jaramillo, J; Chabi-olaye, A; Borgemeister, C. 2010. Temperature-Dependent Development and Emergence Pattern of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) From Coffee Berries. (en línea). *Journal of Economic Entomology* 103(4):1159-1165. Consultado 21 septiembre 2018. Disponible en <https://academic.oup.com/jee/article-lookup/doi/10.1603/EC09408>
- Jaramillo, J; Muchugu, E; Vega, FE; Davis, A; Borgemeister, C; Chabi-olaye, A. 2011. Some Like It Hot: The Influence and Implications of Climate Change on Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) and Coffee Production in East Africa. *PLoS ONE*. 6(9): 1-14.
- Maldonado T; Alfaro EJ; Hidalgo HG. 2018. Revision of the main drivers and variability of Central America Climate and seasonal forecast systems. *Revista de Biología Tropical*. 66(1): 153-175.
- Mora, I; Amador, J. 2000. EL ENOS, el IOS y la corriente en chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe. *Top. Meteor. Oceanog*. 7(1):1-20.
- PROMECAFE. 2016. Introducción. In II Cumbre de Roya (1, 2016, Ciudad de Guatemala, Guatemala). ANACAFE y PROMECAFE. Memoria. Antigua, Guatemala. Cooperación Española. 76 p.
- Ramírez, C; González, M. 2014. Plagas asociadas a cultivos de café a vigilarse en 2014: Parte 1 (en línea). Curso de capacitación sobre la estrategia en vigilancia epidemiológica de la roya de café (México). México, SAGARPA. Consultado 05 mayo 2018. Disponible en: https://es.slideshare.net/SINAVEF_LAB/ppt-plagas-caf-xicoteppec-caromitzi-par1
- Rojas, M. 2012. Manejo sostenible de la broca del café (*Hypothenemus hampei*) mediante poda sistemática del cafeto en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 36(2): 71-79.

Savary, S; Jouanin, C; Félix, I; Gourdain, E; Piraux, F; Willocquet, L; Brun, F. 2016. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: multivariate and risk factor analyses. *Eur J Plant Pathol.* 146:757–778.

Segura, MB. 2017. Efectos de la sombra de cashá (*Chloroleucon eurycyclum*) en el cultivo de café (*Coffea arábica*) sobre los procesos de esporulación, dispersión a través del agua y deposición de *Hemileia vastatrix*, en Turrialba, Costa Rica. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.

Waller, J.M., 1982. Coffee rust-epidemiology and control. *Crop Prot.* 1: 385-404.

Wang, A; Avelino, J. 1999. El ojo de gallo del cafeto (*Mycena citricolor*). In Benoit Bertrand, Bruno Rapidel (ed.). *Desafíos de la caficultura en Centroamérica.* Francia, s.e. p.243-260.

6. Anexos

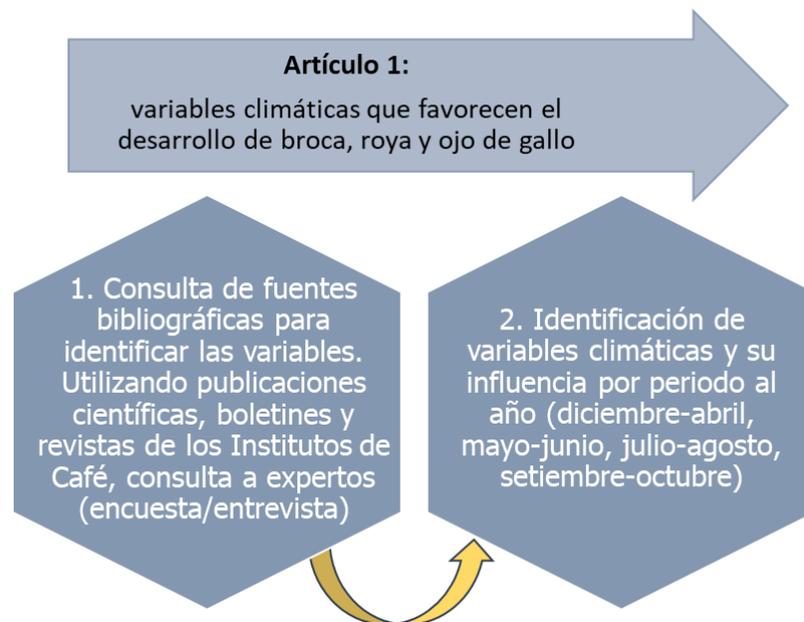


Figura 2. Diagrama de procedimiento detallado del Artículo I.

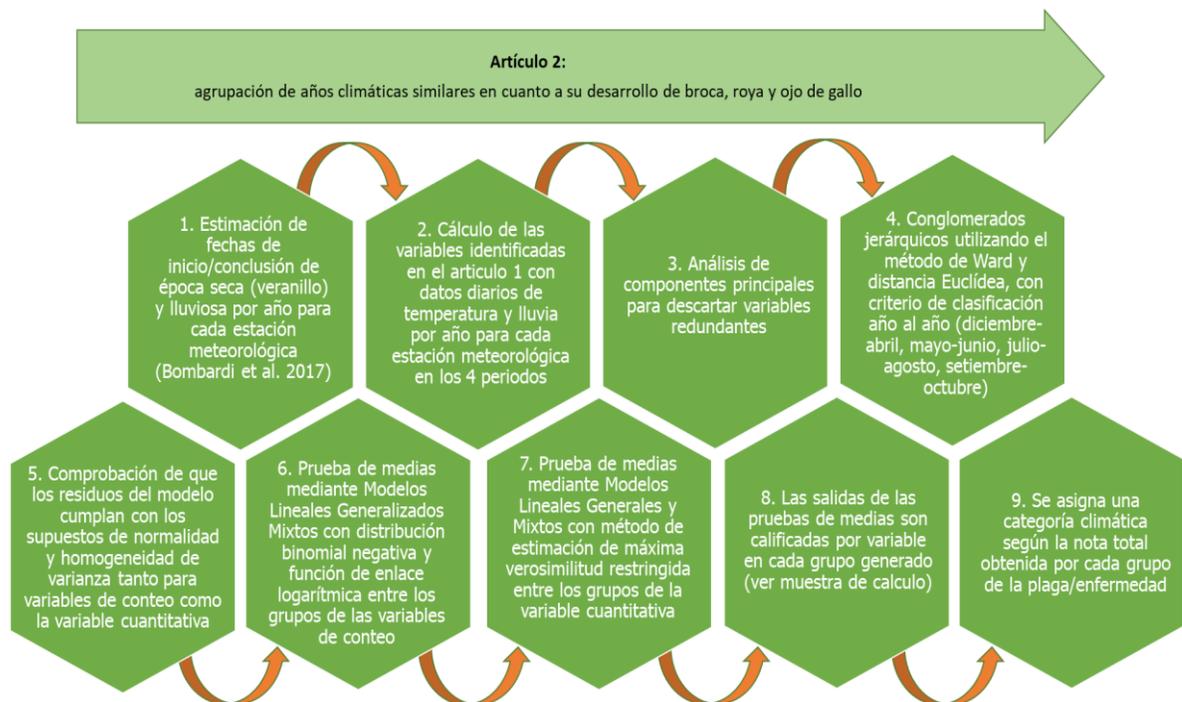


Figura 3. Diagrama de procedimiento detallado del Artículo II.

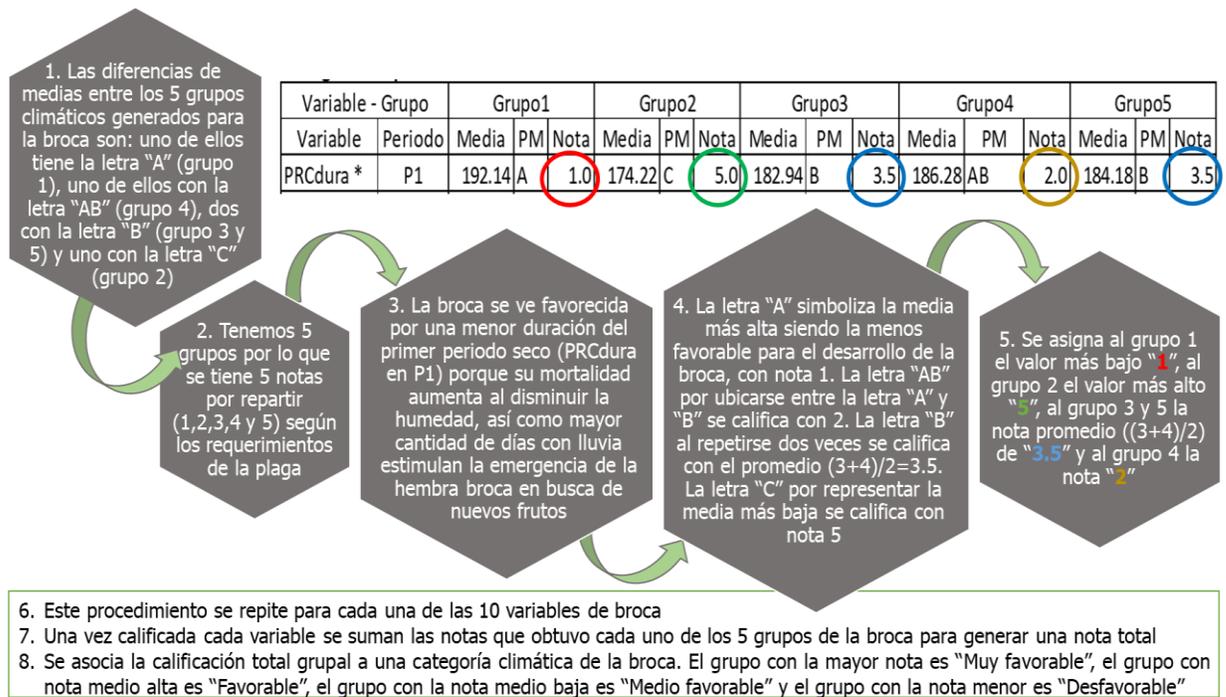


Figura 4. Muestra de cálculo de las calificaciones de los grupos climáticos del Artículo II.

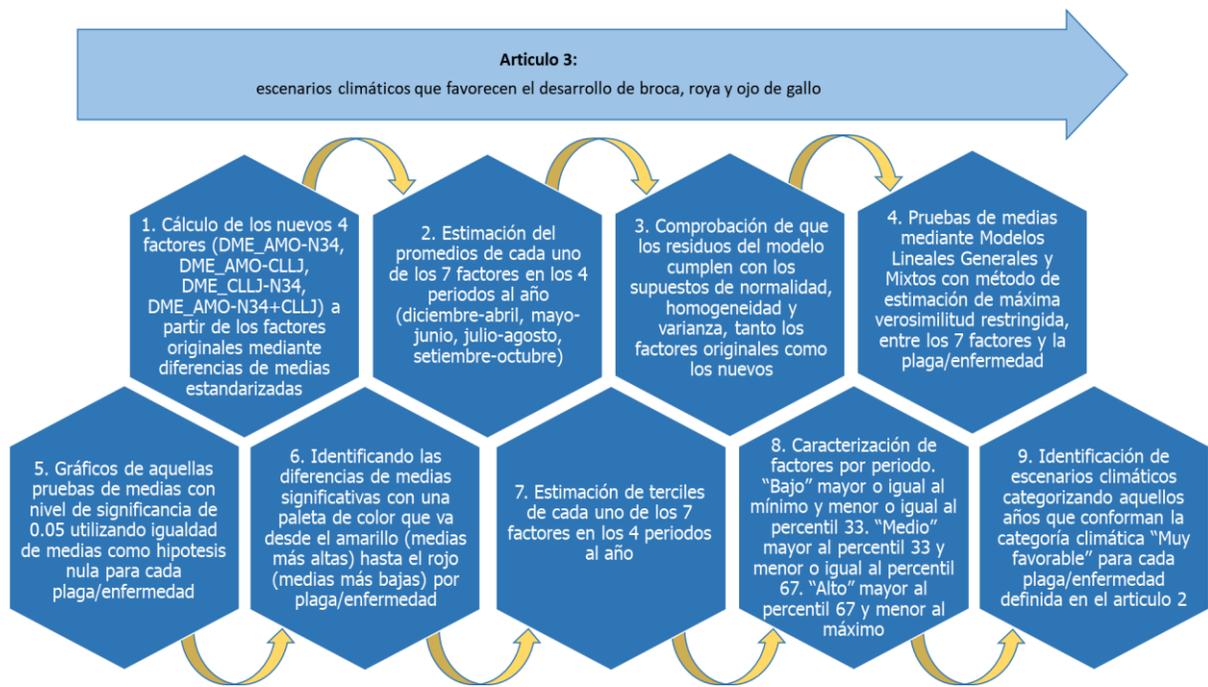


Figura 5. Diagrama de procedimiento detallado del Artículo III.

Artículo I. Rangos climáticos óptimos de crecimiento para la broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) en Centro América

Resumen

Se utiliza como metodología una revisión bibliográfica de publicaciones científicas sobre el desarrollo de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) en Centroamérica. Se describen las especies, sus estados, síntomas e impactos sobre el cafeto, así como los rangos climáticos que favorecen su desarrollo. Cada enfermedad y plaga se ve influenciada de forma particular por el clima en diferentes periodos del año. Se consideran cuatro épocas al año: primera época seca, primera época lluviosa, segunda época seca o veranillo y segunda época lluviosa. Se evidencia que el clima no es el único factor para la ocurrencia de una epidemia de broca, roya u ojo de gallo. El clima es un elemento más que aporta al total de factores que reaccionan en forma de una epidemia, según sea su aporte específico. El manejo de finca juega un papel primordial en impedir el desarrollo de una epidemia.

El desarrollo de la roya se ve favorecido en aquellos casos en que la amplitud térmica diaria es inferior a 8°C debido a que favorece la conservación del inóculo inicial durante la época seca, así como la temperatura máxima diaria que no superen los 26°C reduce el periodo de latencia durante la misma época. Lluvias de más de 5 mm al día permiten la diseminación de la roya. El hongo requiere condiciones húmedas para su desarrollo, durante la época lluviosa, producto de días con lluvia (lluvia de al menos 1 mm). Lluvias de más de 10 mm al día durante la época lluviosa pueden generar lavado de uredosporas. Una época seca prolongada no le permite a la roya sobrevivir.

El ojo de gallo requiere para su desarrollo una amplitud térmica diaria inferior a 8°C durante las épocas lluviosas y el veranillo. Una época lluviosa con más días con lluvia, así como una época lluviosa con mayor cantidad de lluvia total del periodo propicia las condiciones de humedad que requiere el patógeno. Un veranillo prolongado interrumpe el desarrollo del hongo. Lluvias por arriba de 5 mm diarios durante la época lluviosa y el veranillo pueden generar lavado de gemas.

Aquellos días con amplitud térmica inferior a 8°C durante la primera época lluviosa y el veranillo permiten a la broca desarrollarse. Días con valores de temperatura máxima diaria que no superen los 26°C durante el veranillo y la segunda época lluviosa propician las condiciones térmicas para la reproducción de la broca. Días con lluvia superior a 5mm diarios durante la primera época seca favorece la proliferación de la broca porque estimula la floración. Los días con lluvia durante la época lluviosa y el veranillo preparan las condiciones para que la hembra broca emerja del fruto. A mayor cantidad de lluvia acumulada total de la época lluviosa se produce menor mortalidad de la broca. Una época seca prolongada impide a la broca emerger en busca de nuevos frutos.

Palabras clave:

Plagas, enfermedades, caficultura, temperatura y lluvia.

Abstract

A bibliography consult method was used to identify the impacts, symptoms, stages and climate range that have some effect on Coffee Leaf Rust (*Hemileia vastatrix*), American Leaf Spot Disease (*Mycena citricolor*) and Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) development. Every plague has climate influence depends on the season in the year. Seasons are first dry season, first wet season, second dry season or mid-summer drought (MSD) and second wet

season. Climate is one of factor list that make effect in development of epidemic plague or disease. Farm management play the main role in an epidemic event.

Daily thermal amplitude less than 8°C help in development of Leaf Rust Disease because preserve residual inoculum in dry season. Short latency period is the result of daily maximum temperature below 26°C in dry season. Dissemination of pathogen are stimulated by rain above 5 mm per day. Rainy days (rain of at least 1 mm) in wet seasons promotes humid conditions that Leaf Rust require. Daily rain up 10 mm in wet season can generate uredospore washed. Long dry season disrupts fungus survival.

Development of American Leaf Spot disease require daily thermal amplitude less than 8°C in wet season and MSD. Rainy days and higher rainy amount during season, both in wet season, prepare humid conditions that pathogen require. Long MSD disrupt development of fungus. Daily rain above 10 mm in wet season and MSD can cause gem washed.

Daily thermal amplitude less than 8°C in wet season and MSD allows Coffee Berry Borer development. Daily maximum temperature below 26°C in MSD and second wet season propitiate thermal conditions to beetle reproduction. Rainy days up 5 mm in dry season stimulates flowering and therefore the beetle proliferation. Rainy days in wet season and MSD stimulate the flight of it. A lot of rain in rainy season produce less death of beetle. Long dry season disrupts emergence of female beetle to find new berries.

Keywords:

Plague, disease, coffee culture, temperature and rain.

1. Introducción

El café se desarrolla de forma óptima a temperaturas de entre 17°C y 23°C. Si la temperatura desciende por debajo de los 16°C se produce enanismo en el árbol, mientras que temperaturas por encima de 23°C limitan la fructificación y floración. En el caso del café los factores que más limitan o favorece el pleno desarrollo de los cafetos está más asociado con el clima y el suelo, así como plagas o enfermedades (Avelino et al. 2015).

La broca, roya y ojo de gallo han afectado la caficultura centroamericana por años. Jaramillo et al. (2009) identifican a la broca como la plaga más devastadora de la caficultura. Avelino y Rivas (2015) mencionan la resistencia de la caficultura centroamericana ante la roya por más de tres décadas, previas a la epidemia del año 2012. Wang y Avelino (1999) reportan la presencia del ojo de gallo en Centroamérica hace ya más de treinta años.

La broca, roya y ojo de gallo son de interés para el sector cafetalero por su afectación en la producción cafetalera centroamericana. Enfermedades foliares como roya y ojo de gallo no solo afecta el año de incidencia de la enfermedad sino también el año siguiente, documentado como perdida secundaria. La epidemia centroamericana de roya en 2012 generó afectaciones a diferentes escalas según el país y de forma regional alcanzó un valor del 16% de pérdidas de producción en comparación con la cosecha del 2011-2012 (Avelino et al. 2015). Dicha epidemia de roya percibida en centroamericana durante el año 2012 inicio en Colombia desde el año 2008 y se expandió hacia Perú y Ecuador en 2014-2015 así como se desplazó a Centroamérica y México en 2012-2013, como se aprecia en la Figura 3 (McCook y Vandermeer 2015). La epidemia de ojo de gallo del año 2010 reporto en Costa Rica perdidas hasta por 60.000,00 dólares americanos debido a perdidas secundarias (Granados 2015), perdidas debidas a la epidemia del año anterior. Otros países fueron afectados por el ojo de gallo en 2010, pero no se documentó según indica el epidemiólogo Jacques Avelino durante la entrevista llevada a cabo en enero del 2019. Aunque no se registra una epidemia de broca a nivel de Centroamérica, se identifica como la principal plaga insectil de la caficultura centroamericana y se identifica el año 2008 con alta incidencia de broca en Turrialba, Costa

Rica. ICAFE (2009) reporta un 15% de reducción en la producción 2008-2009 con respecto al periodo anterior debido principalmente a manejo deficiente y clima, identificando a las regiones cafetaleras de Pérez Zeledón y Turrialba como las principales responsables de la reducción a nivel nacional, que a su vez presentan la mayor afectación por broca.

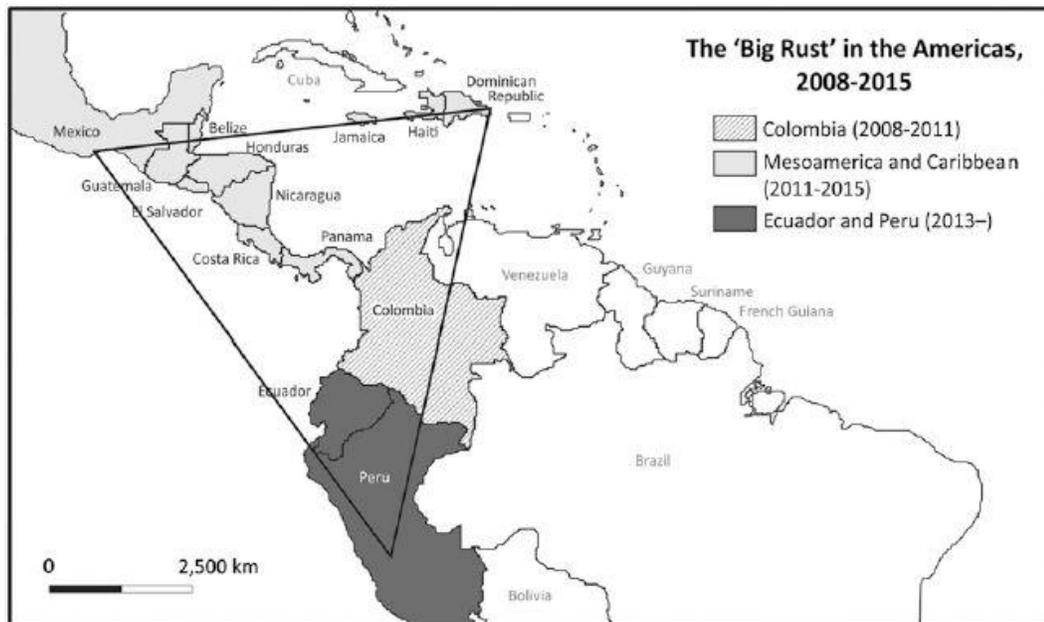


Figura 6. Desplazamiento de la roya en América (McCook y Vandermeer 2015).

Para que se dé una plaga deben cumplirse en tiempo y espacio una serie de condiciones en el entorno del cultivo. Existen causas y condiciones para que ocurra una enfermedad, donde se considera al patógeno como la causa y las condiciones son los requerimientos específicos que el patógeno requiere para desarrolle (Zadoks 2001). En la Figura 2 se muestra el tetraedro de la enfermedad que visualiza la interacción entre el patógeno, el hospedero, el ambiente y el manejo que aplica el productor a su cultivo. En la producción cafetalera la sombra es un factor propio del hospedero que varía según el manejo y al mismo tiempo influye en el microclima que percibe la plaga o enfermedad. La componente ambiente contempla el clima, el suelo y el ambiente biológico que incluye los enemigos naturales del patógeno. En la componente ambiental del tetraedro es donde el tiempo aporta las condiciones climáticas necesarias para el desarrollo de la plaga o enfermedad. El microclima del cafetal es clave para el desarrollo de la enfermedad debido a los óptimos de temperatura, los requerimientos de humedad y luminosidad propios de cada enfermedad y la plaga. La ocurrencia de una epidemia de la plaga o enfermedades del café depende de dos factores macros. Un factor determinante para la ocurrencia de una epidemia es el inóculo inicial, que requiere conservarse durante la época seca cuando las lluvias escasean. Otro factor es la conservación del patógeno durante su desarrollo con condiciones favorables para su crecimiento. El clima es por tanto clave para la preservación y desarrollo de la plaga o enfermedades. La conservación del inóculo residual de la roya depende del estrés que las condiciones climáticas ejerzan sobre el cafeto, de forma que si este sufre defoliación el inóculo residual se pierde (Avelino et al. 2015). En el caso del ojo de gallo, por tener muchos hospederos dentro del cafetal el efecto de la defoliación del cafeto le afecta en menos medida a la conservación del inóculo residual y un manejo adecuado suele ser perjudicial para su desarrollo, mediante podas y deshijas para retirar el inóculo (InfoAgro 2009). La supervivencia de la broca durante la época seca depende más de un manejo adecuado, retirando los frutos caídos tras la cosecha (Cicafe 2014).

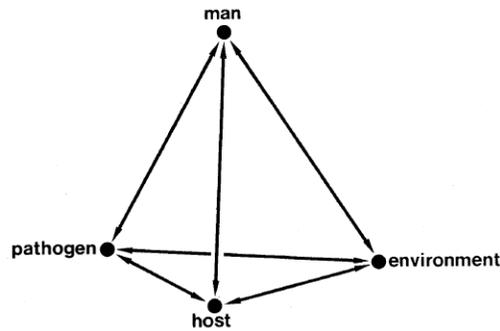


Figura 7. Tetraedro de la enfermedad (Zadoks y Schein, 1979).

Durante mucho tiempo se ha desarrollado investigación del efecto del clima en la plaga y enfermedades. Existen información dispersa de estudios sobre el efecto que algunos elementos climáticos ejercen en diferentes momentos del año sobre la broca, roya y ojo de gallo la cual puede ser agrupada para identificar porque hay más o menos plagas en un año particular. El objetivo de esta investigación es ordenar la información existente pero dispersa para utilizarla en la identificación de variables que ayuden a reconocer condiciones a lo largo del año que favorecen el desarrollo de roya (*Hemileia vastatrix*), ojo de gallo (*Mycena citricolor*) y broca (*Hypothenemus hampei*).

2. Materiales y métodos

Como se muestra en la Figura 8 la revisión bibliográfica fue la metodología utilizada para identificar características propias de las enfermedades como roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*), así como la plaga broca (*H. hampei*). Entre los aspectos listados se encuentran el agente causal, síntomas, impactos, ciclo, factores y rangos climáticos de estas enfermedades y plaga. El agente causal identifica la familia del ser vivo que se denomina roya, broca u ojo de gallo según sea el caso. Los síntomas que tiene el cafeto varían según la plaga o enfermedad. Los impactos son aquellos daños característicos que cada plaga o enfermedad le infringe al cafeto. El ciclo de vida de cada plaga y enfermedad identifica su desarrollo como ser vivo. Los factores climáticos que afectan a cada plaga o enfermedad identifican los elementos del clima que afectan o benefician su desarrollo. Los rangos climáticos identifican los umbrales de clima en que la plaga o enfermedad es capaz de desarrollarse favorablemente.

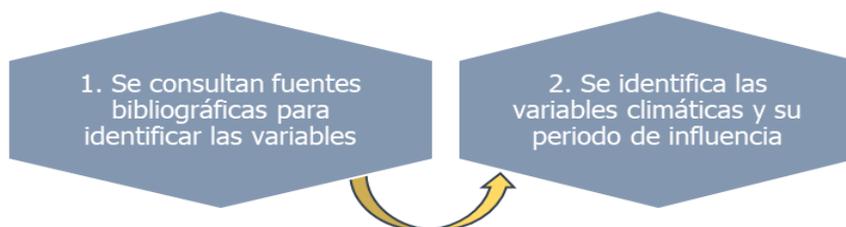


Figura 8. Diagrama de procedimiento de la identificación de variables para el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo del cafeto.

3. Resultados

Se incluyen aquí los resultados de la revisión bibliográfica en tres secciones según sea la enfermedad o plaga.

3.1 Resultados para la roya (*H. vastatrix*)

3.1.1 Agente causal y síntomas

La roya es un parásito obligado del café y afecta la producción cafetalera. El agente causal de esta enfermedad es el hongo *Hemileia vastatrix* que ataca a las especies del género *Coffea* (Avelino y Rivas, 2015). En 1975 existían 32 razas de roya anaranjada, mientras en 2012 se identifican 49 razas (Avelino et al. 2015). El primer síntoma visible en el café es apreciable en la parte inferior de las hojas en forma de pequeñas lesiones de color amarillo (Figura 9), tras la esporulación se aprecia una textura de polvo, mientras que en la etapa final se aprecian en la parte superior de la hoja unas manchas cloróticas que con el tiempo se vuelven lesiones necróticas (Avelino et al. 1999).

3.1.2 Impactos

La roya causa muerte de las ramas debido a la defoliación y por tanto grandes pérdidas económicas como efecto de la pérdida de frutos. Las pérdidas económicas debido a la roya incluso se perciben durante los años subsiguientes con las perdidas secundarias. Las pérdidas primarias, aquellas ocurridas durante el año en que inicia la epidemia de roya, son menos significativas que las secundarias.

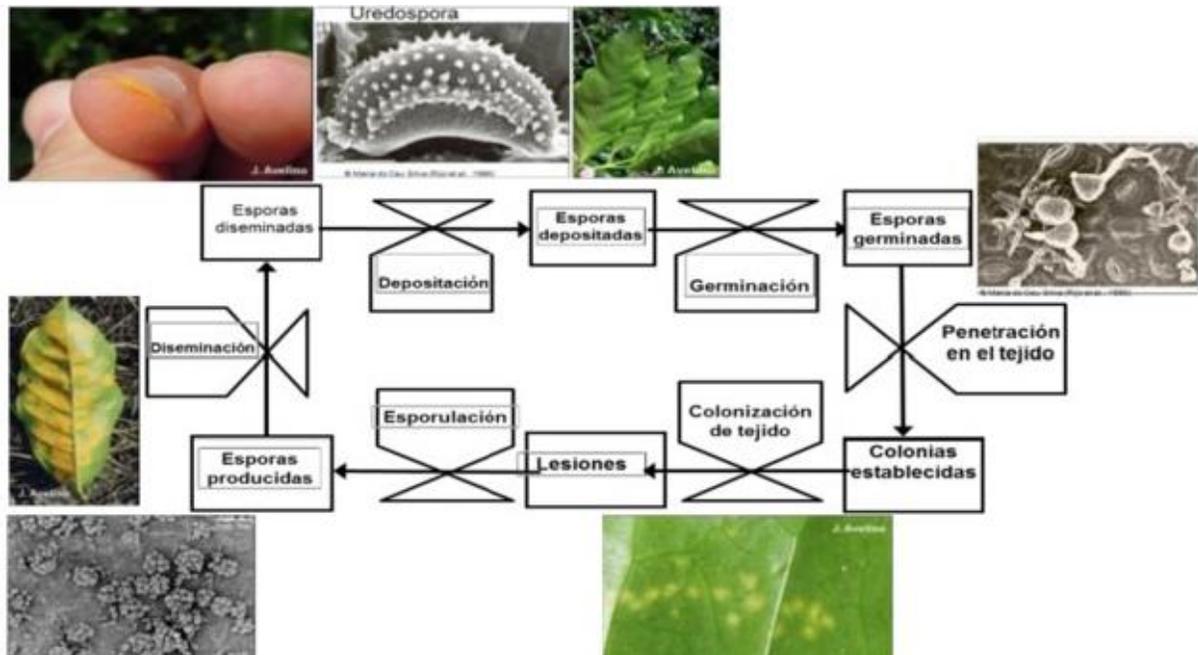


Figura 9. Ciclo de la roya (*H. vastatrix*) del café (Avelino y Rivas 2015).

3.1.3 Ciclo

El ciclo de la roya (*H. vastatrix*) está conformado por diseminación, germinación, penetración y esporulación, como se muestra en la Figura 9. La diseminación se divide en liberación, dispersión y deposición. (Avelino et al. 1999). La germinación marca el inicio del proceso infeccioso, penetración del hongo por las estomas, colonización de la hoja por las hifas que es cuando se generan los primeros síntomas, incubación y esporulación. El periodo de latencia abarca las etapas de desarrollo del hongo desde la germinación de la uredosporas hasta la esporulación, su importancia se fundamenta debido a que mientras más corto sea este

periodo más grave será la epidemia. El desarrollo de una epidemia está ligado a la supervivencia del inoculo primario que mayormente proviene del inoculo residual ubicado en las lesiones necrosadas o latentes de la hoja. La roya es dependiente del cafeto, por lo que sobrevive únicamente en hospederos del género *coffea* sp. (Avelino y Rivas 2015).

3.1.4 Factores climáticos que la afectan

Las plagas y enfermedades se ven favorecidas o no por las variaciones de temperatura, humedad relativa y precipitación propias de los microclimas (Avelino et al. 1999). En términos de alerta temprana Avelino y Rivas (2015) consideran que las variables climáticas son insuficientes para determinar el desarrollo de una epidemia, debido a que factores como el manejo tiene mayor relevancia; más aún, se identifican tres indicadores climáticos de riesgo y su utilidad. El inicio de la época lluviosa es útil para la primera aplicación de fungicidas, la amplitud térmica y pluviometría diaria identifican las condiciones climáticas para que se repita el ciclo del patógeno y con esto el crecimiento de una epidemia.

Avelino y Rivas (2015) manifiestan que la etapa de germinación del hongo está bien estudiada, entre los parámetros climáticos que influyen se encuentran la temperatura, precipitación y humedad relativa. Más aun, las personas son un eficiente método de dispersión de la uredospora en el cafetal, mientras el efecto por parte de los insectos es irrelevante.

Según indican Avelino y Rivas (2015) el periodo de latencia se ve afectado por la temperatura media diaria, de forma que, a 25°C el periodo de latencia se completa en 17.6 días, mientras que a 21°C se prolonga hasta 21.6 días, donde la temperatura crítica que inhibe el desarrollo es de 40°C. La temperatura diaria óptima para germinación es de 22°C acompañada de oscuridad. Esta etapa ocurre generalmente durante las noches, debido a las condiciones de temperatura y radiación, pero también puede ocurrir en aquellos cafetales con sombra densa o auto sombra considerable. La etapa de penetración requiere temperaturas diarias de entre 13°C y 16°C que favorezcan el desarrollo del apresario sobre la estoma. Si se da un patrón de alternancia entre estas temperaturas y temperaturas más altas de 22°C a 28°C, que favorecen la germinación, se puede desarrollar la infección en menos de 6h (Avelino y Rivas 2015).

Para la etapa de diseminación existe más de un método de dispersión de la uredospora. Nutman y Roberts (1962), citados por Avelino y Rivas (2015), afirman que la etapa de liberación de uredosporas requiere la presencia de agua libre. Las condiciones de clima húmedo son buenas para el desarrollo de la roya (Waller 1982). Bock (1962) así como Nutman y Roberts (1963), citados por Avelino y Rivas (2015), muestran que la cantidad necesaria de agua sobre la espora para que su liberación se realice con éxito varía entre 0.8 y 1 mm al día. Mientras Kushalapa et al. (1983), citados por Avelino y Rivas (2015), indican que se requiere 1 mm de lluvia para que ocurra la liberación de uredosporas. Guzmán y Gómez (1977) afirman que se requieren 5 mm de lluvia para que el agua llegue a la parte inferior de la hoja del cafeto. Las lluvias de baja intensidad, menores a 5 mm diarios, son interceptadas por el dosel de los árboles de sombra en el cafetal, de forma que escurre por este sin afectar directamente la hoja. En el caso de lluvias de mayor intensidad, superiores a 5 mm diarios, el dosel acumula las gotas produciendo una gota de mayor tamaño que según la variedad del árbol puede aumentar en diferente escala la energía cinética con que esta nueva gota impacta la hoja del cafeto (Véliz-Chávez et al. 2012; Avelino y Rivas 2015; Thériez 2015). En condiciones secas las uredosporas son dispersadas por el viento, principalmente durante las tardes con baja humedad relativa y viento fuerte, esto puede verse afectado por el secamiento y bajas temperaturas, así como por exposición solar alta. En condiciones lluviosas además de dispersión se tiene el alto crecimiento vegetativo del cafeto, por lo que la probabilidad de alcanzar una hoja es alta, siempre y cuando las lluvias no sean muy fuertes porque esto por el

contrario lava las esporas (Avelino y Rivas, 2015). Avelino et al. (1999) indican que la práctica de riego durante la época seca adelanta las epidemias debido a que estimula precozmente la esporulación. Durante la época lluviosa identificaron para la roya cuatro fases de desarrollo. La primera fase de desarrollo lento se da al inicio de la época lluviosa previo al veranillo, entre mayo y julio. Segunda fase, presenta un crecimiento acelerado en el resto de la época lluviosa después del veranillo, entre agosto y febrero. La tercera fase es donde se ubica su máximo desarrollo a finales de la época lluviosa. Mientras la cuarta fase, de descenso durante la época seca. Por lo cual la epidemia se desarrolla en la época lluviosa y detiene su crecimiento en la época seca (Avelino y Rivas 2015).

La relación negativa entre roya y elevación ha sido documentada en todos los continentes. Durante la epidemia 1982-1983 en Honduras en aquellas elevaciones bajas de 700 m s.n.m. los periodos de latencia fluctuaron entre 29-62 días, donde los más cortos durante agosto/septiembre debido a que sus temperaturas fueron entre 18°C-27°C. A elevaciones altas de 1200 msnm los periodos de latencia se alargaron 40-80 días, debido a las bajas temperaturas. Durante la epidemia 1984-1985 en El Salvador a elevaciones de 465 msnm los periodos de latencia fueron de 27-45 días, los más cortos de julio a septiembre donde la temperatura se ubicó entre 18.8°C-27.7°C, rangos favorables para la roya (Avelino y Rivas 2015). En la actualidad los ataques de roya se reportan a elevaciones mayores, incluso a los 1400 m s.n.m. (Avelino et al. 2015).

3.2 Resultados para ojo de gallo (*M. citricolor*)

3.2.1 Agente causal y síntomas

El ojo de gallo posee un gran número de hospederos y afecta la producción cafetalera. El agente causal de esta enfermedad es el hongo *Mycena citricolor*, con elevaciones óptimas de crecimiento entre 1100 y 1550 m s.n.m. Su principal evidencia en ambos lados de la hoja es la lesión foliar de entre 5 y 10 mm de ancho que frecuentemente se presenta de color café que puede ser circular u ovalada (Wang y Avelino 1999).

3.2.2 Impactos

El ojo de gallo (*M. citricolor*) causa daño al cafeto en sus ramas, hojas y frutos; su efecto directo en la producción se debe a la defoliación del cafeto y la caída de frutos (Wang y Avelino 1999). La causa de la defoliación no se debe exclusivamente al número de lesiones en cada hoja sino más bien a la ubicación de la lesión en la hoja, donde las lesiones cerca de la base de la hoja son las causantes de su caída.



Figura 10. Desarrollo del ojo de gallo (*M. citricolor*) del café. (Modificado de Buller (1957) y ANACAFE).

3.2.3 Ciclo

Durante su etapa de germinación el ojo de gallo (*M. citricolor*) produce hifas con dos tipos de estructuras: basidiocarpo y las cabecitas o gemas (Figura 10). Granados (2015) menciona que Buller (1958) identifica que la gema en el caso específico del ojo de gallo debe llamarse germinífero. El germinífero se encuentra únicamente en aquellas hojas sujetas al cafeto, mientras que el basidiocarpo se encuentra también en hojas caídas (Granados, 2015). Los germiníferos son asexuales, de color amarillo, toman la forma de un alfiler, es su cabeza que se desprende para diseminarse cuando está madura y requiere luz para formarse (Wang y Avelino 1999). El basidiocarpo, según Maublanc y Range (1914) citado por Wang y Avelino (1999), tiene un tamaño superior al de la gema y es el responsable de producir y liberar gran cantidad de basidiósporas. El desarrollo de una epidemia depende de la supervivencia del inoculo residual. El ojo de gallo no es dependiente del cafeto, por lo que puede sobrevivir en más de 550 especies de plantas. En 1978 el ojo de gallo fue nombrado "candelilla" por la luminiscencia que emiten tanto los micelios como las gemas, durante el crecimiento activo del micelio, según Wellman (1972) citado por Wang y Avelino (1999).

3.2.4 Factores climáticos que la afectan

Se conocen los efectos de algunos elementos del clima sobre el ojo de gallo (*M. citricolor*). Una humedad ambiental alta (>80%) y radiación baja favorecen el desarrollo del ojo de gallo (Ramírez y Gómez 2014).

Wang y Avelino (1999) mencionan que mediante los estudios de Bonilla (1979) en El Salvador, Vargas et al. (1986) en Costa Rica y Avelino et al. (1995) en Guatemala se logra identificar la relación del desarrollo de la epidemia del ojo de gallo con la estacionalidad de la precipitación y la humedad relativa. Estos investigadores encontraron que en cuanto dan inicio las lluvias se da un incremento de las hojas afectadas y número de lesiones. Estas mismas lluvias fungen como dispersoras de la enfermedad hacia hojas cercanas. Los cafetales con condiciones de fuerte rocío, como los ubicados en zonas boscosas, permiten que el hongo se mantenga vivo aun durante los meses de la época seca.

Costa Rica es muy afectado por esta enfermedad debido a su clima húmedo y su modalidad de cultivo intensivo. Wang y Avelino (1999) reportan en Costa Rica el máximo de infección entre septiembre y octubre, meses de más precipitación en la Vertiente Pacífica (IMN 2008). La infección disminuye en el mes de diciembre, con sus mínimos durante el periodo sin lluvias que ocurre en los meses de febrero a mayo.

Wang y Avelino (1999) mencionan que Wellman (1972) identifica al factor viento sin influencia en la dispersión de la enfermedad, debido al tamaño de las gemas o cabecitas que requieren un golpe fuerte como el generado por las gotas de agua para ser desprendidas.

Las condiciones idóneas para el desarrollo del ojo de gallo dependen también de la elevación, hacia donde ve la ladera y temperatura del sitio. Avelino et al. (2007) indican que el hongo se desarrolla de forma óptima a una elevación de 1386 m s.n.m., con rango favorable entre los 1100-1550 m s.n.m. Las elevaciones entre 1100-1550 m s.n.m. presentan temperaturas idóneas para el desarrollo del ojo de gallo, lo que permite un acortamiento del periodo de latencia del hongo, que conlleva a un desarrollo más rápido de la epidemia. Lo anterior coincide con la temperatura de desarrollo óptimo de 20°C, basándose en resultados de temperatura de incubación obtenidos con inoculaciones artificiales en hojas. En su análisis de cual ladera es la favorable para el hongo, encontraron que las pendientes de colina que ven al este se ven menos afectadas que aquellas que se ubican hacia el oeste, debido a que las primeras reciben radiación durante más horas al día, lo que reduce la mojadura foliar y por tanto disminuye la tasa de infestación exitosa (Avelino et al. 2007).

Si al factor elevación óptima se le suma una época lluviosa continua sin periodos de días secos consecutivos, se favorece la producción y liberación de gemas y su viabilidad. Un veranillo, conocido también como canícula, con días lluviosos consecutivos, es decir precipitación mayor de 1 mm diarios, favorecen la intensidad de la epidemia. Un veranillo bien marcado o incluso una semana sin precipitación afecta el desarrollo del ojo de gallo, de forma que este periodo seco limita la producción de gemas y su viabilidad (Avelino et al. 2007).

3.3 Resultados para la broca (*H. hampei*)

3.3.1 Agente causal y síntomas

El agente causal de la broca es el coleóptero *Hypothenemus hampei*, es dependiente del cafeto y es la plaga más importante en la caficultura mundial. Su principal evidencia es el agujero justo en el disco (cicatrices florales) del fruto de café, como indicador de que ese grano de café ha sido brocado (Figura 11).



Figura 11. (a) Broca (*H. hampei*) emergiendo del grano de café (Crédito de la foto: OIRSA). (b) Broca del café (*H. hampei*) dentro del grano de café (Crédito de la foto: Provedora de insumo forestales).

3.3.2 Impactos

Su principal impacto es a nivel del fruto del cafeto, limitando su precio comercial (Jaramillo et al. 2011). La broca afecta tanto el rendimiento como la calidad del fruto de café (Jaramillo et al. 2010). Avelino et al. (2018) citan a Ribeyre y Avelino (2012) quienes mencionan que uno de cada dos frutos es brocado. La hembra broca deposita los huevos y el endospermo del fruto funciona como alimento para la larva. Otro impacto causado por la broca sobre el fruto es la reducción de sus cualidades organolépticas debido al contenido de broca, así como el riesgo sanitario que implica el consumo de un fruto brocado con posible contenido de toxinas fúngicas como la ocratoxina A, una toxina cancerígena y nefrotóxica.

3.3.3 Ciclo

El efecto de los elementos del clima sobre la broca (*H. hampei*) en Colombia son conocidos. Existen evidencias del desplazamiento de la broca en Colombia debido a que se ve afectada por la temperatura, por lo que se desplazó de los 1500 m s.n.m. a mayores elevaciones (Jaramillo et al. 2011).

La dinámica del insecto hembra y macho es diferente, mientras la hembra de broca preñada vuela en busca de nuevos frutos, el macho por ser áptero se mantiene dentro del fruto brocado. Alrededor de las 8 semanas y hasta la semana 32 después de la floración es cuando la broca hembra adulta ataca al grano de café. Tras el ataque, la broca ingresa al grano

creando galerías hasta alcanzar el endospermo, oviposita y permanece dentro del grano esperando el desarrollo de su progenie (Romero y Cortina 2007). Cada fruto de café es atacado por una hembra colonizadora, quien se mantiene dentro del fruto con su progenie, esta puede ovipositar más de 200 huevos a lo largo de su vida, si las condiciones ambientales son idóneas (Jaramillo et al. 2010).

Romero y Cortina (2007) en busca de diferencias en la duración del ciclo de vida de la broca para tres variedades de café, CCC534, C. Liberia y Caturra, bajo condiciones controladas ($26^{\circ}\text{C} \pm 1$, $75\% \pm 5$ H. R.), encontraron que la broca tiene un ciclo de vida de etapas inmaduras (huevo, primer instar, segundo instar, prepupa y pupa) de 20 días en estas variedades. La investigación registra las etapas del ciclo de vida de la broca (*H. hampei*) de forma que la etapa de huevo le lleva 4 días, otros 4 días en el primer instar, 6 días en el segundo instar, 2 días en la etapa de prepupa y 4 días en la fase de pupa. En su análisis de la fecundidad encontraron dos periodos de oviposición, el segundo periodo se da por las hembras adultas recién emergidas, mientras el primer periodo de oviposición la desarrollan las hembras fundadoras en un mínimo de 8-12 días y un máximo de 24-48 días después de la infestación. La oviposición puede verse afectada por factores propios del grano como sus antimetabolitos o que éste carezca de nutrientes adecuados por lo que la broca hembra lo considera no apto para poner sus huevos. La broca puede sobrevivir dentro del grano en un periodo de entre 72 y 81 días, debido a la alimentación y protección que le brinda el grano de café. La broca presenta una baja mortalidad en la etapa reproductiva y alta mortalidad después de los 80 días de la infestación. La Figura 12 fue modificada de la presentada por Tandazo et al. (1997) para ilustrar el ciclo de vida de la broca.



Figura 12. Ciclo de vida de la broca (*H. hampei*) del café. Modificado de Tandazo et al. (1997).

3.3.4 Factores climáticos que la afectan

El desarrollo de la broca es dependiente del clima. Jaramillo et al. (2009) definen para la broca las temperaturas óptimas del desarrollo de huevo a adulto entre 20 y 30°C , y umbrales térmicos con el rango de $14,9$ a 32°C , mencionando que el estrés que generan los cambios en el clima afecta a los herbívoros de forma directa en su número de generaciones por año, fenología, mortalidad en invierno y rango de distribución.

La broca particularmente se ve afectada por la temperatura en su dinámica de colonización; en aquellas temperaturas inferiores a los 15°C o superiores a los 32°C no es capaz de realizar la oviposición dentro del grano. A una temperatura de 15°C la broca logra avanzar al

endospermo, pero no deposita los huevos, mientras que a 35°C la broca ni siquiera logra ingresar al endospermo (Jaramillo et al. 2009).

El rango de temperatura con mayor sobrevivencia de la hembra de broca es 15°C-25°C, ya que entre los 27°C-30°C su supervivencia decrece. Los dos primeros estadios, huevo y Larva 1, se desarrollan con éxito entre los 20°C-33°C. A 33°C la hembra ovíparita, pero el instar Larva 1 no sobrevive un 95% de las veces (Jaramillo et al. 2009).

La temperatura afecta la fecundidad diaria de la broca hembra. Romero y Cortina (2007) trabajaron a una temperatura de 25°C para identificar la duración de las etapas inmaduras del ciclo de vida en tres variedades de café, mientras Jaramillo et al. (2010) analizan los rangos de las etapas del ciclo vida de la broca a varias temperaturas. A 20°C la oviposición toma de 2-43 días después de la infestación, mientras que a 25°C toma 4-34 días. A 30°C obtuvieron menor producción de huevos y un ciclo más corto. Las diferentes etapas del ciclo de vida de la broca se ven alterados por la temperatura. A 20°C la broca muestra dos picos de producción de huevos a los 30 y 90 días, la larva un pico a los 30 días, la pupa un máximo a los 60 días y la emergencia de la hembra de los 30-120 días después de infestación. A 25°C la broca muestra un pico de producción de huevos a los 60 días, la larva un pico a los 30 días, la pupa un máximo a los 30 días y la emergencia de la hembra inicia a 30 días con máximo a los 120 días después de infestación. A 30°C la broca muestra una producción de huevos nula antes de los 30 días y la emergencia del fruto por parte de la hembra entre 30-120 días después de infestación. El estudio identifica que tanto a 20°C como a 30°C emergen en promedio 54 hembras, mientras que a 25°C salen del fruto 90 hembras. La probabilidad de encontrar huevos dentro del fruto a 25°C es 28 veces más alta que a 30°C. La posibilidad de encontrar más huevos que hembras entre 90-120 días después de la infestación es 2-3 veces menor que a 60 días.

Existe un *tradeoff* entre el tiempo de desarrollo y una reproducción exitosa de la broca. La razón de crecimiento intrínseco (r_m) es la resta del número bruto de nacimientos y defunciones, mientras que la razón de reproducción (R_o) es la tasa entre la reproducción efectiva y la fallida (Jaramillo et al. 2009). Los autores encontraron entre los 25°C-27°C mayor r_m y una mayor razón de reproducción (R_o) para 25°C que para 27°C que resulta ser aún menor para 30°C. En el rango de 20°C-23°C se prolonga más la oviposición y fecundidad. Una temperatura mayor a 26°C puede generar una reducción del r_m máximo lo que provoca una reducción de la epizootia. Aquellas zonas donde actualmente la temperatura promedio diaria no supera los 26.7°C, por cada incremento de 1°C se aumentará r_m máximo en 8.5%. Las zonas que ya rondan los 26.7°C de temperatura promedio diaria, percibirán un incremento en el número de generaciones durante el periodo activo de la broca.

El periodo activo de la broca está fuertemente ligado a la floración del cafeto, si existe escasez de frutos las hembras deben aumentar su dispersión para cumplir con la oviposición. De Alvim (1960) citado por Jaramillo et al. (2009) tras analizar el periodo de floración para diferentes localidades del este de África identificó que una lluvia sola de más de 10 mm seguida de un periodo seco prolongado desencadena la floración del cafeto. Arcila et al (1993) citado por Jaramillo et al. (2009) identifica las zonas con floración múltiple como aquellas con mayores probabilidades de mantener broca en su cafetal, mientras que las regiones del este de África que cuentan con una época seca bien definida, que no mantengan riego, en este momento tendrán menor afectación por broca. La floración es estimulada por el inicio de la época lluviosa. Arcila (2007) menciona que las primeras lluvias del periodo lluvioso rompen la latencia de la floración del cafeto. Gray (1993) estima el promedio de evaporación para Centroamérica entre 5 y 8 mm/día. Alfaro et al. (1998) utiliza el umbral de 5 mm/día, entre otros criterios, para definir el inicio y conclusión de la época lluviosa.

El análisis de la distribución potencial de la broca debe tomar en cuenta tanto el valor mínimo de desarrollo como la constante térmica del insecto. Jaramillo et al. (2009) reportan algunos casos de países con los efectos del cambio de clima sobre la broca. Tras analizar 32

años de datos climáticos se evidenció que para Jimma en Etiopía antes de 1984 las temperaturas eran muy frías para el desarrollo de la broca, pero después de 1984 se pueden completar 1-2 generaciones de broca al año. En Uganda e Indonesia la broca ya aumentó su rango de altitud, donde se registra a 1864 m s.n.m.

La sombra dentro del cafetal tiene efectos sobre la reproducción de la broca. La sombra de árboles reduce la radiación que incide sobre el cafeto, además de estabilizar la temperatura y humedad del cafetal (Jaramillo et al. 2011). La sombra intercepta la radiación produciendo una reducción de reproductividad de la broca a pesar de que bajo sombra se reportan los mayores niveles de infección (Villarreyna 2016). Esto varía según la elevación a la que se ubica el cafetal, a elevaciones menores de 700 msnm se reduce la temperatura ambiente más de 4°C, mientras que a elevaciones mayores de 1100 msnm la reducción es de más de 2°C. Jaramillo et al. (2009) en sus estudios realizados en Centroamérica y África del Este indican, según la región, una reducción del entre 2°C y 6°C en cafetales bajo sombra, en comparación con cafetales a pleno Sol. Villarreyna (2016) en su recopilación de literatura menciona el efecto que la densidad de sombra y el tipo de copa tienen en la reducción de los máximos de la temperatura ambiental, de las hojas y del suelo. De forma que un cafeto bajo sombra, según sea la densidad de esta, puede percibir un microclima con condiciones un poco diferentes a las de un cafeto a pleno Sol.

Las fases de emergencia del fruto y búsqueda de frutos nuevos de las hembras colonizadoras ocurren en diferentes momentos en cafetales con temperaturas promedio de 20°C, 25°C y 30°C. En café Arábica el ciclo de vida de 1 generación es de 60 días si se encuentra a 20°C, por lo que en 120 días tendrá 2 generaciones dentro del fruto. En café Arábica sembrado a 25°C, su ciclo de vida es de 30 días, la mitad con 20°C, de los cuales Romero y Cortina (2007) identificaron la tercera parte solo para el desarrollo de las etapas inmaduras (huevo, primer instar, segundo instar, prepupa y pupa). A 25°C el primer máximo de emergencia ocurre 30 días antes que a 20°C y se extiende hasta 60 días después de la infestación. A 30°C encontraron mayor número de hembras fuera del fruto que a 20 °C y 25°C, debido a que su ciclo de vida es menor a 30 días (Jaramillo et al. 2010). A sabiendas de que la lluvia de poca intensidad es un estímulo para la emergencia de la broca (Arcila et al. 1993 y Guharay et al. 2000).

Es importante conocer la temperatura del cafetal, periodos de floración y datos de trampas de broca para mejorar la toma de decisiones en el control de plagas. Jaramillo et al. (2010) identifica que en condiciones de temperatura ambiente de 30°C las medidas de control ante la broca deben iniciar alrededor de los 130 días después de la floración y realizarse control en etapas iniciales a los 30 días después de la infestación. Si la temperatura del aire es de 25°C el control de la plaga en las etapas iniciales debe comenzar a los 130-170 días después de la floración y entre 190-220 días para las nuevas colonizadoras. Cuando la temperatura del ambiente es 20°C el control debe iniciar a los 150 días de la floración para las etapas iniciales y a los en los 240 días para controlar las hembras dispersas.

4. Discusión: identificación de variables principales para el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo

Se identifica en la revisión bibliográfica que dichas variables influyen favorable o desfavorablemente en la incidencia de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*). El efecto que las variables climáticas ejercen sobre las enfermedades y la plaga depende de la época del año. Los elementos climáticos lluvia y temperaturas extremas se asocian a las variables climáticas identificadas.

El desarrollo y proliferación de la **roya** se ve beneficiada por agua libre durante la germinación y penetración, además de gradientes térmicos bajos, mientras que las lluvias

fuertes perjudican su proliferación debido al lavado de las uredosporas tras la liberación, así como los cambios térmicos excesivos. El desarrollo de la roya (*H. vastatrix*) se ve favorecido por cambios pequeños entre la temperatura máxima y mínima del día, es decir amplitudes de temperatura pequeñas, inferiores a 8°C, que generan menos estrés en el cafeto y por tanto se conservan las hojas, lo que favorece la conservación del inóculo inicial durante la época seca (Avelino y Rivas 2015). Esta condición se vuelve importante durante la primera época seca del año, momento en el cual la temperatura máxima diaria alcanza sus valores más altos del año. Las temperaturas máximas inferiores a los 26°C favorecen una menor cantidad de días en el periodo de latencia, favoreciendo un aumento poblacional mayor, durante la primera época seca, al favorecer la conservación del inóculo inicial (Avelino y Rivas 2015). Los días con lluvia de al menos 1 mm durante la época lluviosa propician las condiciones de humedad necesarias para el desarrollo del hongo. Una primera época seca corta implica que la primera época lluviosa se adelantó, esto propicia las condiciones de humedad que requiere el hongo para desarrollarse antes (Avelino y Rivas 2015). Durante la primera época seca el inóculo se encuentra resistiendo y esperando las condiciones húmedas favorables para la dispersión y germinación, por lo que mientras más se prolongue la primera época seca menos inóculo inicial se desarrollara (Avelino et al. 1999). Durante la época lluviosa se genera diseminación del hongo por liberación de uredosporas a causa de la lluvia. Se requiere al menos de 5 mm de lluvia para que las gotas alcancen la parte inferior de la hoja generando diseminación (Kushalapa et al. 1983). Lluvias superiores a 10 mm generan lavado durante la segunda época lluviosa (Véliz-Chávez et al. 2012; Avelino y Rivas 2015; Thériez 2015).

El desarrollo y proliferación del **ojo de gallo** se ve favorecido por condiciones climáticas húmedas y temperaturas frescas. El desarrollo del ojo de gallo (*M. citricolor*) se ve afectado por grandes cambios entre la temperatura máxima y mínima del día, es decir se ve favorecido por amplitudes de temperatura pequeñas durante las épocas lluviosas y el veranillo, momento en que el inóculo inicial se desarrolla (Avelino et al. 2007). La humedad en la primera época lluviosa permite al inóculo inicial crecer y llegar a niveles más altos, debido a las necesidades para la generación y viabilidad de las gemas, condición que se genera con precipitaciones de al menos 1 mm (Avelino et al. 2007). Aquellos días con lluvias superiores a 1 mm son considerados días con lluvia. Si se tienen un veranillo de corta duración se dan las condiciones para que el inóculo sobreviva en esta época. Durante el verano del hemisferio norte se identifica el veranillo, compuesto por tres periodos relativamente secos (Veranillo de San Juan cerca del 23 de junio, Canícula de finales de julio y Canícula de agosto) y es una segunda época seca que no ocurre todos los años en toda Centroamérica. Cuando ocurre se evidencia con menor cantidad de días sin lluvia durante los meses de junio y agosto en la Costa Pacífica y la Región Central de Centroamérica. La cantidad de lluvia durante las épocas lluviosas del año favorecen la explosión de la epidemia, asociado a un veranillo con pocos días sin lluvia (Wang y Avelino 1999; Ramírez y Gómez 2014). La segunda época lluviosa es considerada el periodo de mayor crecimiento de la epidemia, debido a que la lluvia funciona como dispersor de la enfermedad. Se consideran dos épocas lluviosas si se presenta el veranillo ese año, que se considera como la segunda época seca. Aquellas lluvias superiores a 5 mm diarios durante la época lluviosa y el veranillo pueden generar lavado de gemas.

El desarrollo de la **broca** (*H. hampei*), como herbívoro, se ve afectado por las variaciones del clima, donde se favorece su desarrollo con periodos secos cortos seguidos de periodos lluviosos no muy intensos y temperaturas altas no excesivas. La supervivencia de la hembra, que funge como colonizadora, requiere temperaturas menores a los 26°C durante la primera época lluviosa y el veranillo, que es cuando el fruto empieza a madurar y la broca a aumentar su población (Jaramillo et al. 2010, Romero y Cortina 2007). Su desarrollo a lo largo del año se ve afectado por grandes cambios entre la temperatura máxima y mínima del día, es decir, se ve favorecido por amplitudes de temperatura pequeñas, inferiores a 8°C (Jaramillo et al.

2009). Su aumento de población ha sido ligado a las floraciones, ya que se requiere de fruto para su supervivencia. Lluvias diarias de más de 5 mm durante la época seca estimula la floración y por tanto la diseminación de la broca (Arcila 2007, Gray 1993 y Alfaro et al. 1998). Los días con lluvia, valores superiores a 1 mm diario, estimulan la emergencia de las hembras broca en busca de nuevos frutos para colonizar (Arcila et al. 1993 y Guharay et al. 2000). Una primera época seca corta favorece el desarrollo de la broca debido a los requerimientos de humedad durante la búsqueda de frutos para ovipositar (Jaramillo et al. 2009). A lo largo del año la broca es favorecida por mayor cantidad de lluvia debido a que su mortalidad aumenta cuando disminuye la humedad (Jaramillo et al. 2009).

7. Conclusiones

Cada una de las enfermedades y la plaga tienen diferentes requerimientos hídricos y térmicos en periodos diversos al año. Existen elementos climáticos identificables como favorables o perjudiciales para el desarrollo de broca, la roya y el ojo de gallo de café basado en la literatura. Estos elementos climáticos pueden ser convertidos a variables climáticas utilizando los umbrales identificados por los expertos.

Se identifican para la roya nueve variables que influyen en su desarrollo. Las dos asociadas a la temperatura tienen importancia durante la primera época seca del año, mientras que las siete ligadas a la lluvia son relevantes durante la época lluviosa. No se identifica ninguna variable durante los meses de ocurrencia del veranillo.

Para el ojo de gallo son once las variables climáticas obtenidas por el efecto que tienen sobre su desarrollo. Tanto las ocho variables referentes a la lluvia como las tres asociadas a la temperatura cobran relevancia durante la época lluviosa y el veranillo. No se identifica alguna durante la primera época seca del año.

En el caso de la broca se encuentran veinte variables climáticas que intervienen en su desarrollo. Once de estas se asocian a la lluvia y ocho a la temperatura, con importancia a lo largo del año.

8. Recomendaciones

Se recomienda validar los umbrales y variables climáticas aquí definidos mediante estudios de campo que contengan monitoreo diario de los elementos climáticos lluvia y temperatura, así como el registro de incidencia de ambas enfermedades y la plaga en el mismo sitio. En caso de que se quieran comparar condiciones entre fincas, estas deben mantener el mismo tipo de manejo con su respectivo registro de aplicaciones químicas y control biológico.

9. Referencias bibliográficas

- Alfaro, E., Cid, L. y Enfield, D. (1998). Relaciones entre el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y los Océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Investigaciones Marinas*. (26): 59-69.
- Arcila P, J.; Jaramillo R, A.; Baldión R, V.; Bustillos P, A.E. 1993. La floración del café y su relación con el control de la broca. *Avances Técnicos Cenicafé*. No 193. 6 p.
- Arcila, P. J. 2007. Anormalidades en la floración del cafeto. *Avances técnicos. CENICAFE*. (320): 8 p.

- Avelino, J; Toledo, C; Medina, B. 1995. Desarrollo del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en una finca del Norte de Guatemala y evaluación de los daños provocados por esta enfermedad. Simposio de Caficultura Latinoamericana. IICA. Costa Rica. s.p.
- Avelino, J; Muller, R; Eskes, A.B; Holguin, F. 1999. La roya anaranjada del cafeto en América Central y el Sur de México. In Benoit Bertrand, Bruno Rapidel (ed.). Desafíos de la caficultura en Centroamérica. Francia, s.e. p.210-260.
- Avelino, J; Cabut, S; Barboza, B; Barquero, M; Alfaro, R; Esquivel, C; Durand, J; Cilas, C. 2007. Topography and Crop Management Are Key Factors for the Development of American Leaf Spot Epidemics on Coffee in Costa Rica. *Ecology and Epidemiology*. 97:1532-1542.
- Avelino, J; Rivas, G. 2015. La roya anaranjada del cafeto. Consultado 21 septiembre 2018. Disponible en <http://hal.archivesouvertes.fr/hal-01071036>. p. 1-47
- Avelino, J; Cristancho, M; Georgiou, S; Imbach, P; Aguilar, L; Bornemann, G; Läderach, P; Anzueto, F; Hruska, AJ. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008 – 2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Springer*. 7: 303-321.
- Avelino, J; Allinne, C; Cerda, R; Willocquet, L; Savary, S. 2018. Multiple-disease system in coffee: From crop loss assessment to sustainable management. *Annu. Rev. Phytopathol.* (56): 611-635.
- Barquero, M. 2013. Las variaciones climáticas en el incremento inusual de la Roya del Cafeto. *Revista Informativa ICAFE* 7(1):1-7.
- Bock, K. 1962. Control of coffee leaf rust in Kenya Colony. *British Mycological Society Transactions* 45(3): 301-313.
- Bonilla, C. 1979. Estudio de la epifitología del ojo de gallo causada por el hongo *Omphalia flavida*. Instituto Salvadoreño de Investigaciones en Café. (3):42-45.
- Buller, R. 1958. *Omphalia flavida*, a gemmiferous and luminous leaf-spot fungus. In *Researches on fungi*. London. London, New York. (6): 397-442.
- Cicafe. 2014. Boletín técnico. Manejo integrado de broca. 2(5).
- De Alvim, PT. 1960. Moisture stress as a requirement for flowering of coffee. *Science*. 132: 3423.
- Granados, M. (2015). Estudio de la epidemiología y alternativas de manejo agroecológico del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en cafeto bajo Sistemas agroforestales en Costa Rica. Tesis Doctoral. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 257 p.
- Gray, C. (1993). Regional meteorology and Hurricanes. In: Maul, G. (Ed.) *Climate Change in the Intra Americans Sea*. Eduard Arnold, p. 87-99.
- Guharay, F.; Monterrey, J.; Monterroso, D.; Staver, Ch. 2000. Manejo integrado de plagas en el cultivo del café. Managua, Nicaragua, CATIE. 265 p. (Serie Técnica. Manual Técnico Nº 44).

- Guzmán, O y Gómez, L. 1987. Permanence of free water on coffee leaves. *Expl. Agric.* 23(2):213-220.
- ICAFFE. 2009. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 96 p.
- IMN; GEF; CRRH; PNUD. 2008. Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. CRRH ed. San José, Costa Rica, s.e. 75 p.
- InfoAgro. 2009. Hoja divulgativa. Combate integrado del ojo de gallo. Dirección regional central Sur. 2(4).
- IPCC. 2000. Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press. Reino Unido. 608p.
- Jaramillo, A.; Arcila, J. 2009. Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de el Niño y su efecto en la caficultura. *Avances técnicos Cenicafé.* (390): 1-8.
- Jaramillo, J.; Chaby-Olaye, A.; Kamonjo, C.; Jaramillo, A.; Vega, F.; Poehling, H.; Borgemeister, C. 2009. Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: Predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PlosOne* 4(8):1-11
- Jaramillo, J; Chabi-olaye, A; Borgemeister, C. 2010. Temperature-Dependent Development and Emergence Pattern of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) From Coffee Berries. (en línea). *Journal of Economic Entomology* 103(4):1159-1165. Consultado 21 septiembre 2018. Disponible en <https://academic.oup.com/jee/article-lookup/doi/10.1603/EC09408>
- Jaramillo, J; Muchugu, E; Vega, FE; Davis, A; Borgemeister, C; Chabi-olaye, A. 2011. Some Like It Hot: The Influence and Implications of Climate Change on Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) and Coffee Production in East Africa. *PLoS ONE.* 6(9): 1-14.
- Kushalappa, AC.; Akutsu, M.; Ludwing, A. 1983. Aplicación de survival ratio for monocyclic process of *Hemileia vastatrix* in predicting coffee rust infection rates. *Phytopathology* 73:96-103.
- Maublanc, A y Rangel, E. 1914. *Le Stilbum flavidum* Cooke, forme evorté de l' *Omphalia flavida* n. sp. *Bull. Soc. Myc. Francia.* (30): 41-47.
- McCook, S; Vandermeer, J. 2015. The big rust and the red queen: long term perspectives on coffee rust research. *Phytopathology.* 105(9):1164- 1173.
- Nutman, F.J. y Roberts, F.M. 1962. Coffee berry disease and leaf rust research. *Kenya Coffee* 27: 273-279.
- Nutman, F.J y Roberts, F.M. 1963. Studies on the biology of *Hemileia vastatrix*. *Berk & Br. Trans. Brit. Mycol. Soc.* 46(1):27-48.

- Ramírez, C; González, M. 2014. Plagas asociadas a cultivos de café a vigilarse en 2014: Parte 1 (en línea). Curso de capacitación sobre la estrategia en vigilancia epidemiológica de la roya de café (México). México, SAGARPA. Consultado 05 mayo 2018. Disponible en: https://es.slideshare.net/SINAVEF_LAB/ppt-plagas-caf-xicoteppec-caromitzi-par1
- Ribeyre, F; Avelino J. 2012. Impact of field pests and diseases on coffee quality. In Specialty Coffee: Managing Quality, ed. T Oberthür, P Läderach, HAJ Pohlan, JH Cock. Peachtree Corners, GA: Int. Plant Nutr. Inst., Southeast Asia Prog. 76-151 p.
- Romero, J.V. y Cortina, H.A.G. 2007. Tablas de vida *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) sobre tres introducciones de café. Revista Colombiana de Entomología. (33): 10-16.
- Vargas, L; Gonzalez, M y Umaña, G. 1986. Informe de avance de proyecto de ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en cafeto. International Development and Research Center. Universidad de Costa Rica. 28p.
- Véliz-Chávez, P.C.; González-Sosa, E.; Barajas-Ortiz, S del R.; Ramos-Salinas, N.M. 2012. El efecto pantalla o sombra de los árboles en la formación de los escurrimientos urbanos. Tecnología y Ciencias del Agua 3(4):73-87.
- Villareyna, R. y Avelino, J. 2016. Efecto de la sombra sobre las plagas y enfermedades, a través del microclima, fenología y estado fisiológico del cafeto. Informe Proyecto CAASCADA. Turrialba, Costa Rica. 35p.
- Waller, J.M. 1982. Coffee rust-epidemiology and control. Crop Prot. 1: 385-404.
- Wang, A; Avelino, J. 1999. El ojo de gallo del cafeto (*Mycena citricolor*). In Benoit Bertrand, Bruno Rapidel (ed.). Desafíos de la caficultura en Centroamérica. Francia, s.e. p.243-260.
- Wellman, F.L. 1972. Dissemination of *Omphalia* leaf spot of coffee. Turrialba. (1): 12-27.
- Tandazo, A; Cisneros, P, Jaramillo, T y Espinoza, O. 1997. Control integrado de la broca del café en la región sur del país. Servicio Ecuatoriano de Sanidad Agropecuaria. Ecuador. 144p.
- Thériez, M. 2015. Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Informe de pasantía voluntaria. CIRAD. 32 p.
- Zadoks, J; Schein, R. 1979. Epidemiology and plant disease management. Oxford University Press. New York. 427p.
- Zadoks, J .2001. Plants disease epidemiology in the twentieth century. A picture by means of selected controversies. The American Phytopathological Society. 85(8): 808-816.

Artículo II. Años con características climáticas comunes favorables para la ocurrencia de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) en Centroamérica

Resumen

Se aplica un análisis de componentes principales para identificar las variables climáticas no redundantes que influyen en el desarrollo de las enfermedades roya (*Hemileia vastatrix*) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*), así como la plaga broca (*Hypothenemus hampei*) en Centroamérica. Se seleccionan cuatro variables climáticas para roya, siete para ojo de gallo y diez para broca.

Se obtienen categorías de favorecimiento del desarrollo de broca, roya y ojo de gallo aplicando un dendograma, a las variables meteorológicas consideradas no redundantes, con la información de los años. Se generan pruebas de medias a los grupos y se califican los resultados según el favorecimiento de la variable sobre el desarrollo de las enfermedades y la plaga. Se comparan las tipologías y las incidencias reportadas en literatura.

Debido a que no se dispone de reportes de incidencia in situ se realiza una recopilación bibliográfica de reportes de incidencia para el periodo y países de interés. Esta información se obtuvo mediante cinco fuentes: publicaciones científicas, revistas y boletines de los institutos de café, tesis y consulta a expertos. Los países que fueron contemplados en el estudio son: Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica durante los últimos 30 años. De los cuales Honduras y El Salvador no muestran reportes de ojo de gallo.

Se identifican tipologías climáticas para el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo en Centroamérica. La categoría muy favorable contiene al año 2012 con epidemia de roya reportada en Centroamérica, al año 2010 con epidemia de ojo de gallo en Guatemala y Costa Rica, así como el año 2008 reportado con epidemia de broca en la región de Turrialba, Costa Rica. La tipología muy favorable para el desarrollo de la roya (*Hemileia vastatrix*) incluye los años 2009 y 2012. La tipología muy favorable para el desarrollo del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) está conformada por los años 1996, 2005, 2008, 2010 y 2017. La tipología muy favorable para el desarrollo de la broca (*Hypothenemus hampei*) contiene los años 2008, 2010 y 2011.

Desde el año 2008 al 2012 se identifican condiciones particularmente favorables para el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo en Centroamérica; asociado a la variabilidad climática de la región. Mientras que antes de 1995 y después del año 2012 las condiciones climáticas parecen ser menos favorables. Los años 2005 y 2010 pertenecen a tipologías favorables para la ocurrencia de las enfermedades y la plaga.

Palabras clave:

Enfermedades, plagas, riesgo epidemiológico, tipologías, caficultura y clima.

Abstract

Applying a principal component analysis (PCA) we discard the redundant climate variables from total variables important for coffee rust (*Hemileia vastatrix*) and American leaf spot (*Mycena citricolor*), also berry borer plague (*Hypothenemus hampei*) of coffee in Central America. Four variables were selected for coffee rust, seven for American leaf spot and ten for berry borer.

Climate categories was identified to a good development of coffee rust, American leaf spot and berry borer, applying a dendrogram with year as classification criteria in the meteorological variables without redundancy. Groups was qualified in dependence of how much it helps in

develop of plague or disease with results of a mean analysis. Typologies was compare with reports of incidence.

A bibliographic recompilation was use from four countries and periods in absence of reports in situ. To achieve that, we used scientific publications, journals and newsletters from coffee institutes, thesis and expert interview. Guatemala, Honduras, El Salvador and Cosa Rica were study for the las 30 years. Honduras and El Salvador didn't show American leaf spot incidence reports.

Climate typologies was identified to a good development of coffee rust, American leaf spot and berry borer. Best typology for coffee rust has the epidemic year 2012, for American leaf spot include 2010 an epidemic year in Guatemala and Costa Rica, also 2008 a year with berry borer hard report in Turrialba, Costa Rica. Best typology for coffee rust (*Hemileia vastatrix*) includes 2009 and 2012 years. Best typology for American leaf spot (*Mycena citricolor*) contains 1996, 2005, 2010 and 2017 years. Best berry borer (*Hypothenemus hampei*) typology has 2008, 2010 and 2011 years.

Since 2008 to 2012 Central America had good conditions to develop of berry borer, American leaf spot and coffee rust, by region climate variability. Before 1995 and after 2012 climate conditions was less favorable. Favorable climate conditions were identified for incidence of disease and plague in 2005 and 2010.

Keywords:

Disease, plague, epidemiological risk, typologies, coffee culture, climate.

1. Introducción

Las plagas y enfermedades se ven afectadas por las variaciones en los patrones del clima. La mayoría de las especies tiene rango térmico de radiación y de humedad según sea su fisiología y fenología (Constantino et al. 2011).

La productividad de la actividad cafetalera en Centroamérica se ve afectada por diversas plagas y enfermedades. La broca es considerada la plaga más importante de la caficultura centroamericana en las últimas décadas (Guharay et al. 2000). La roya y el ojo de gallo se ubican entre las principales enfermedades del cafeto en Centroamérica (Avelino y Rivas 2015; Granados 2015).

ICAFFE reconoce el clima como factor determinante de incidencia de enfermedades del café. En Costa Rica durante el año 2012 el clima determino un cambio en el grado de incidencia de algunas de las enfermedades de importancia económica, mientras el Ojo de Gallo disminuyo mucho, la Roya del cafeto aumentado su severidad en varias regiones (ICAFFE 2012).

Las variaciones del clima a futuro pueden generar mayor vulnerabilidad en el sector cafetalero. Ghini et al. (2011), citados por Avelino y Rivas (2015), generan modelos epidemiológicos basándose entre otros factores en los escenarios de Cambio Climático A2 y B1, para Brasil. Estos escenarios identifican una reducción del periodo de latencia en el caso del escenario A2 y disminuiría levemente para el escenario B1. Los escenarios de Cambio Climático para Centroamérica pronostican un aumento de la temperatura de entre 2°C-2.5°C que tendría los peores efectos sobre Honduras y Nicaragua, con disminución de la precipitación anuales de alrededor de 5%-10% en Honduras y Nicaragua (Ghini et al. 2011). Estas condiciones fueron similares a las ocurridas durante la epidemia del 2012 en la Región (Avelino y Rivas 2015). El IPCC establece más de dos escenarios de emisiones para las proyecciones de Cambio Climático de aquí al 2100, de los cuales Ghini et al. (2011) utilizan A2 y B1. El escenario A2 prevé un crecimiento demográfico alto con los niveles más elevados de emisiones de CO₂ y una disminución de la cobertura vegetal. El escenario B1 es el más positivo debido a que

contempla una disminución de las emisiones CO₂ con una proyección de población media a largo plazo, además de un aumento en la extensión forestal (IPCC 2000).

Este trabajo busca categorizar los últimos 30 años según el comportamiento de las variables climáticas (identificadas a decir de experto y en la literatura) que explican la incidencia anual de la enfermedad roya (*Hemileia vastatrix*) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*), además de la plaga broca (*Hypothenemus hampei*), en los países centroamericanos Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica. Se corrobora la pertinencia de las categorías climáticas obtenidas con un registro de reportes de incidencia obtenido tras una revisión bibliográfica.

2. Materiales y métodos

2.1 Ubicación del área de estudio

El estudio se enfoca en cuatro países de la región centroamericana: Guatemala, Costa Rica, Honduras y El Salvador. Las estaciones meteorológicas que se utilizan para cada uno de los cuatro países se ubican en o cercanas a las zonas con producción cafetalera, en elevaciones superiores a los 500 m s.n.m. y hasta los 2397 m s.n.m. Las estaciones climáticas de las cuales se dispone de datos de lluvia y temperaturas extremas se visualizan en Figura 13 y Figura 14. En Guatemala se dispone de estaciones meteorológicas ubicadas en las regiones: Tablón, El Capitán, Santiago Atitlán, Huehuetenango y Esquipulas. En el caso de Costa Rica se usan las estaciones meteorológicas de las regiones: Pacífico Norte, Pacífico Sur, Caribe Sur y Valle Central. En Honduras se trabaja con estaciones: Santa Rosa de Copán y Catacamas. En El Salvador se utilizan las estaciones meteorológicas de las regiones Ahuachapán, Los Naranjos, Santa Ana, Cojutepeque, Santiago de María y Perquin.

2.2 Descripción del área de estudio, características climáticas

Guatemala ronda sus máximos de precipitación acumulada anual entre 1242 mm y 3265 mm, con temperaturas extremas que rondan los 6°C a 34°C y una humedad relativa de entre 69% a 88% (INSIVUMEH 2017). Los sembradíos de café arábico en Guatemala han ido migrando de zonas bajas (alrededor de 600 m s.n.m.) a zonas altas (1200 m s.n.m. hasta 2000 m s.n.m.). En las zonas bajas (debajo de 600 m s.n.m.) se encuentra la variedad de café Robusta (*Coffea canephora*), por ser una opción de adaptación al clima, debido a su resistencia a altas temperaturas, así como oportunidades de mercado en el vecino país de México. Existen plantaciones de Sarchimor T-5296 y Caturra a 1900 m s.n.m. con buena productividad, con sombra (árboles de ciprés). Es posible encontrar plantaciones hasta los 2000 m s.n.m. con sombra de árboles de gravilea (*Grevillea robusta*) o de coníferas. Se debe denotar que ahora se están sembrando áreas consideradas marginales hace 30 o 40 años por su elevada altitud sobre el nivel del mar (ANACAFE 2016).

Costa Rica tiene valores de precipitación acumulada máxima de entre 1500 mm y 4500 mm, sus temperaturas medias extremas son de entre 12 °C a 34 °C (IMN 2008). Costa Rica trabaja con ocho regiones cafetaleras productivas. Estas zonas están distribuidas entre zonas a menos de 1000 m s.n.m., donde el café es más liviano, zonas por arriba de 1.200 m s.n.m., que son de origen volcánico, donde el café es más fuerte o ácido y también más aromático (ICAFE 2018).

Honduras tiene valores de precipitación acumulada promedio de 800 mm a nivel nacional y precipitación acumulada máxima de 2500 mm entre sus costas Caribe y Pacífico (UNAH 2012). En Honduras la gran mayoría del café proviene de regiones montañosas y genera más de un millón de jornales que producen cerca del 38% del PIB Agrícola. Se cultiva entre los 600-

1600 m s.n.m. las siguientes variedades de café: Bourbon, Caturra, Typica, Catuai y Pacas (IHCAFE 2018).

En El Salvador los máximos de precipitación acumulada anual rondan entre 1709 mm y 1841 mm, con temperaturas promedio extremas que rondan los 15.6°C a 23.7°C y una humedad relativa de entre 72% a 79% (García et al. 2001). El CSC identifica un total de 11% de cobertura nacional en la categoría zonas de tipo bosque de las cuales el 7% se encuentran cultivadas con cafetales, país en el cuál la actividad cafetalera se desarrolla entre los 500 m s.n.m. hasta 1600 m s.n.m. (CSC 2016).

2.3 Datos de estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación para Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica se listan en el Cuadro 2, donde se muestran sus coordenadas geográficas en unidades de grados decimales, elevación en unidades de metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.), país, nombre y número de la estación. La Figura 13 muestran la distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas en Costa Rica, mientras que la Figura 14 contiene las estaciones meteorológicas de El Salvador, Honduras y Guatemala. De estas estaciones se utilizan las variables meteorológicas precipitación acumulada diaria en unidades de milímetros, temperatura diaria máxima y temperatura diaria mínima en unidades de grados Celsius. Los datos climáticos fueron proporcionados por los servicios meteorológicos de Costa Rica (IMN), Guatemala (INSIVUMEH), Honduras (SMNH y al Departamento de Meteorología Aeronáutica de Honduras) y El Salvador (MARN).

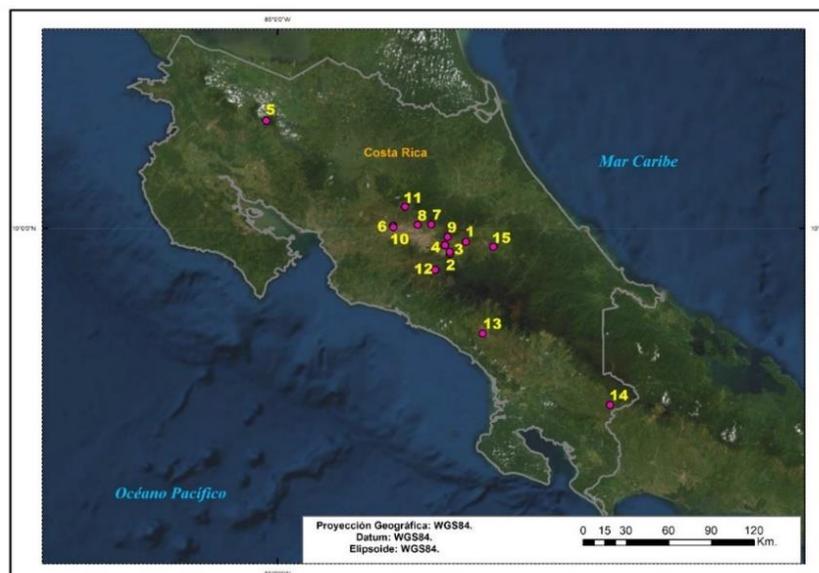


Figura 13. Mapa de la distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas en Costa Rica. Los detalles de las estaciones según su código numérico se especifican en el Cuadro 2.

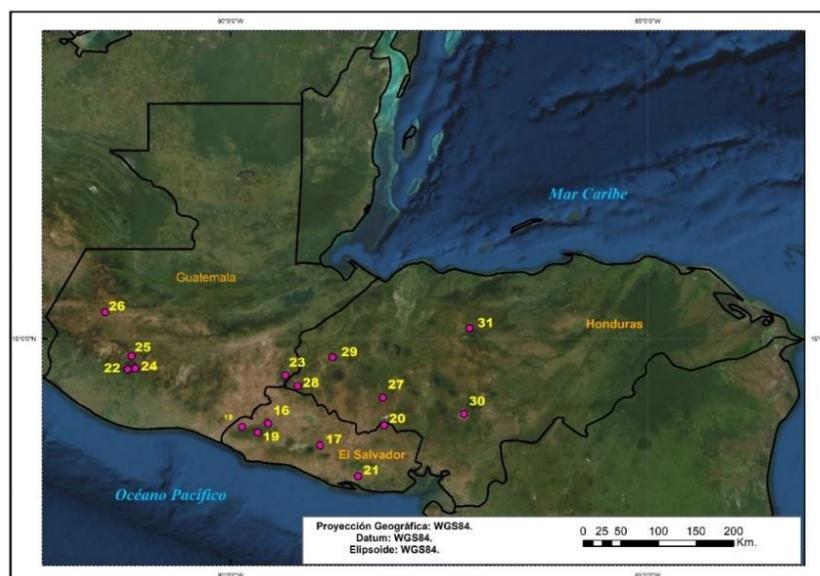


Figura 14. Mapa de la distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas en El Salvador, Honduras y Guatemala. Los detalles de las estaciones según su código numérico se especifican en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas, con elevaciones superiores a 500 m s.n.m. en o cerca de zonas cafetaleras, utilizadas para Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica

ID	País	Número	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
1	Costa Rica	73022	Pacayas	9.914	-83.806	1735
2	Costa Rica	73048	Dulce nombre	9.839	-83.907	1345
3	Costa Rica	73123	ITCR, Cartago	9.852	-83.909	1360
4	Costa Rica	73129	RECOPE, Ochomogo	9.893	-83.938	1546
5	Costa Rica	76045	Montezuma	10.682	-85.071	519
6	Costa Rica	84023	Estación experimental Fabio Baudrit	10.017	-84.267	840
7	Costa Rica	84046	San Josecito de Heredia	10.024	-84.026	1450
8	Costa Rica	84111	Santa Lucia, Heredia	10.022	-84.112	1200
9	Costa Rica	84125	Finca 3, llano grande (La laguna)	9.945	-83.922	2220
10	Costa Rica	84187	Fabio Baudrit	10.005	-84.266	840
11	Costa Rica	84189	Laguna Fraijanes	10.136	-84.192	1720
12	Costa Rica	88047	La lucha 2	9.737	-84.001	1740
13	Costa Rica	98024	INA, Pérez Zeledón	9.333	-83.7	700
14	Costa Rica	98075	Las brisas, sabalito	8.88	-82.894	1040
15	Costa Rica	20000	CATIE	9.883	83.633	602
16	El Salvador	A-37	Santa Ana - UNICAES	13.983	-89.549	665
17	El Salvador	C-09	Cojutepeque	13.721	-88.926	894
18	El Salvador	H-08	Ahuachapán	13.943	-89.86	732
19	El Salvador	T-24	Los Naranjos	13.875	-89.674	1450
20	El Salvador	Z-03	Perquín	13.961	-88.158	1166
21	El Salvador	U-06	Santiago de María	13.35	-88.47	920
22	Guatemala	ATI	Santiago Atitlán	14.6316	-91.2313	1580
23	Guatemala	ESQ	Esquipulas	14.5588	-89.3419	950
24	Guatemala	CAP	El Capitán	14.643	-91.1405	1562
25	Guatemala	TAB	El Tablón	14.7902	-91.1819	2397
26	Guatemala	HUE	Huehuetenango	15.3172	-91.503	1870
27	Honduras	78719	La Esperanza	14.293	-88.173	1679
28	Honduras	78718	Ocotepeque	14.433	-89.195	790
29	Honduras	21000	Santa Rosa Aeronáutica	14.776	-88.774	1080
30	Honduras	78720	Tegucigalpa	14.095	-87.203	1010
31	Honduras	78707	Yoro	15.125	-87.134	677

2.4 Análisis cuantitativo de datos climáticos

Las series de tiempo fueron procesadas para su respectivo descarte de datos atípicos e imputación de datos ausentes. Se utilizan solamente los años con registros de datos faltantes o ausentes de menos del 20%. El control de calidad y homogenización a estos datos climáticos se realiza aplicando estadística descriptiva según Araya y Alfaro (2008; 2009) con la finalidad de depurar los registros climáticos y así identificar datos atípicos que deben ser eliminados y remplazados. Se usan estadísticos como media, máximo, mínimo, mediana, cuantiles y coeficientes de variación; además de las gráficas como *qq-plot*, gráfico de cajas y diagramas de dispersión. La imputación de estas series de tiempo climáticas se realizará utilizando métodos autorregresivos o distancias euclidianas, según corresponda, siguiendo a FIC (2005) y Ureña et al. (2016).

Los elementos climáticos identificados en el Artículo I de esta investigación por su influencia en el desarrollo de la broca, roya y ojo de gallo, son llevados a variables contabilizando la cantidad de días en que se cumple el umbral definido en el Cuadro 3 para cada uno de estos elementos climáticos. Se realiza un análisis de componentes principales (ACP), utilizando como la información de las variables climáticas definidas para cada enfermedad y la plaga, para definir las variables no redundantes del total de variables que se listan en el Cuadro 3.

Se calculan las variables de clima a partir de las series de tiempo a nivel horario de los elementos climáticos temperaturas extremas y lluvia. Las variables utilizadas fueron definidas como no redundantes. Todas las variables, excepto la duración de la época, son conteos de los días que cumplen con una condición climática en cuatro periodos establecidos al año. La variable que no tiene unidades de días es lluvia total de la(s) época(s) de lluvia en el año (una o dos según los casos), con unidades de milímetros. La única variable que es calculada en las fechas reales de ocurrencia de cada época es la duración de la época seca y lluviosa, que posee unidades de días.

El análisis se realiza por intervalos temporales de cuatro periodos al año. Los cuatro periodos utilizados para el cálculo de las variables climáticas son: periodo 1 (P1) del 1 de diciembre al 30 de abril (dic-abr), periodo 2 (P2) del 1 de mayo al 30 de junio (may-jun), periodo 3 (P3) del 1 de julio al 31 de agosto (jul-ago) y periodo 4 (P4) del 1 de setiembre al 30 de noviembre (set-nov). Los periodos se definen contemplando las fechas promedio de ocurrencia del inicio y conclusión de la época seca y lluviosa, así como la necesidad de identificar el veranillo en el análisis. El veranillo está conformado por tres etapas (Coen, 1973): "Veranillo de San Juan" que ocurre cerca del 23 de junio, "Primera Canícula" que se da a finales de julio y "Segunda Canícula" que es el periodo de días secos a principios de agosto.

Cuadro 3. Elementos climáticos identificadas mediante la revisión bibliográfica del Artículo I de esta investigación, consideradas de importancia para el desarrollo de la broca, roya y ojo de gallo, con su respectivo periodo de influencia

Variable - Periodo	P1 (dic-abr)		P2 (may-jun)			P3 (jul-ago)		P4 (set-nov)		
Amplitud térmica inferior a 8°C	broca	roya	broca		ojo gallo	broca	ojo gallo	broca		ojo gallo
Lluvia mayor a 1 mm	broca		broca	roya	ojo gallo	broca	ojo gallo	broca	roya	
Lluvia mayor a 5 mm	broca				ojo gallo		ojo gallo		roya	
Lluvia mayor a 10 mm	broca	roya							roya	
Lluvia total del período	broca		broca		ojo gallo	broca	ojo gallo	broca	roya	ojo gallo
Duración de la época seca	broca	roya				broca	ojo gallo			
Temperatura máxima menor a 26°C	broca	roya	broca			broca		broca		

Para estimar la variable de la duración de la época seca y lluviosa se debe conocer el inicio y conclusión de cada época por año. En Centroamérica, el inicio y la conclusión de la época seca y lluviosa, así como la ocurrencia del veranillo han sido definidos por metodologías propuestas por Alfaro (2002), Hernández y Fernández (2010) por ejemplo. En este caso se utiliza la metodología Bombardi et al. (2017) para definir las fechas de inicio y conclusión de la época seca, lluviosa y veranillo para cada estación meteorológica de cada país del estudio. Bombardi et al. (2017) proponen un método basado en anomalías de precipitación acumuladas "S" a escala local, donde P_i es la lluvia del día i , \bar{P} es la razón media anual de la lluvia en mm/día y t_0 es la fecha de inicio del cálculo. Para estimar el inicio de la época lluviosa, debe utilizarse un t_0 que se ubique en la época seca, donde el punto de inflexión indicará la fecha de inicio de la época lluviosa. En la estimación del inicio de la época seca, debe utilizarse un t_0 que se ubique en la época lluviosa, donde el punto de inflexión indicará la fecha de inicio de la época seca. Las zonas que poseen un periodo lluvioso bien definido son independientes del t_0 utilizado. Se utilizan dos periodos: duración de la primera época seca y duración de la segunda época seca, donde esta última identifica la existencia o no del veranillo. La ecuación utilizada en el cálculo propuesto por Bombardi et al. (2017) se muestra a continuación:

$$S = \sum_{i=t_0} (P_i - \bar{P})$$

Para determinar un grupo de años con características climáticas comunes favorables o no para la ocurrencia de broca, roya y ojo de gallo se construyen categorías climáticas. A las variables climáticas seleccionadas que influyen en el desarrollo de la broca, roya u ojo de gallo se les aplica un análisis estadístico multivariado de conglomerados jerárquicos utilizando el método de Ward y distancia Euclídea, con criterio de clasificación año. Esto con el fin de generar categorías climáticas teóricas (a decir de experto y según la literatura), para la ocurrencia de la broca, la roya y el ojo de gallo en Centroamérica. El proceso completo se ilustra en la Figura 15.



Figura 15. Diagrama de flujo del proceso realizado en el análisis cuantitativo para la identificación de las tipologías climáticas para broca, roya y ojo de gallo. Este proceso se realiza de forma independiente para cada enfermedad y la plaga

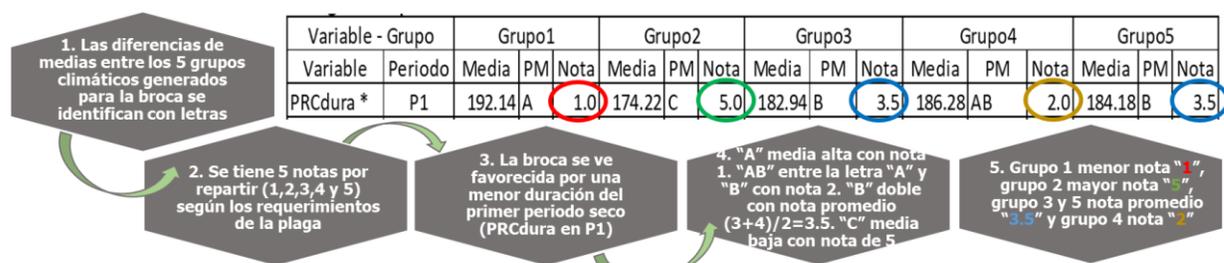


Figura 16. Muestra de cálculo para la calificación de los grupos de broca, roya y ojo de gallo

A las categorías obtenidas se les dio un puntaje de las más favorables a las menos favorables para la plaga y enfermedades estudiadas, como se muestra en la Figura 16. Para calcular este puntaje se tienen dos pasos. Primero se comparan las categorías obtenidas para cada una de las variables que se han considerado para la construcción de las tipologías. Para las variables de conteo, se realizan pruebas de medias de dos colas mediante Modelos Lineales Generalizados Mixtos (GLMM, por sus siglas en inglés) con distribución binomial negativa y función de enlace logarítmica. Para la variable cantidad de lluvia total de las épocas de lluvia (variable cuantitativa en mm) se realizan pruebas de medias de dos colas mediante Modelos Lineales Generales y Mixtos con método de estimación de máxima verosimilitud restringida (REML, por sus siglas en inglés). Se comprueba que los residuos del modelo cumplan con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. Los análisis se realizaron usando el software InfoStat versión 2109 (Di Rienzo et al. 2019). En un segundo paso, las salidas de las pruebas de medias son calificadas por variable según su favorecimiento a la ocurrencia de la plaga y las dos enfermedades, dándole un valor máximo (el número de categorías) a la categoría en la cual el valor de la variable sea significativamente el mejor para el desarrollo de la plaga o enfermedad y el menor valor a la categoría en la cual el valor de la variable sea el peor para el desarrollo de la plaga o enfermedad. Se suman los puntajes de todas las variables para cada grupo y así se obtiene una jerarquía de las categorías. La categoría que obtiene la suma más alta se considera como la mejor para el desarrollo de la plaga o enfermedad. De esta forma se generan las categorías muy favorable, favorable, medio favorable y poco favorable, donde la categoría favorable potencia más el desarrollo de la plaga/enfermedad que la categoría medio favorable.

2.5 Análisis cualitativo

Se corroboran las categorías climáticas con reportes de incidencia de broca, roya y ojo de gallo en los países centroamericanos Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica. Se realiza una revisión bibliográfica para identificar aquellos años en los cuales se han presentado las enfermedades como roya (*Hemileia vastatrix*) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*), así como la plaga broca (*Hypothenemus hampei*), con la finalidad de verificar la pertinencia de las categorías climáticas obtenidas a decir de experto y en base a la literatura sobre las variables meteorológicas que afectan el desarrollo de estas especies. El estudio se centra en los cuatro países centroamericanos Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica, durante los últimos 30 años. Se consultan publicaciones científicas que contengan reportes de incidencia de roya, broca y ojo de gallo. Se utilizan los resultados de Cofré (2018) sobre los años reportados por productores y técnico con ocurrencia de la plaga y las dos enfermedades. Se aplicó la encuesta de Anexos a técnicos regionales expertos en caficultura durante la reunión periódica de PROCAGICA desarrollada durante el año 2018 en las instalaciones del CATIE. Se consultan los informes anuales, boletines y revistas de los Institutos Nacionales de Café: ICAFE en Costa Rica, IHCAFE en Honduras, ANACAFE en Guatemala y CSC en El Salvador. Las revistas consultadas se listan a continuación:

- Informes de reuniones de PROMECAFE
- Boletín Informativo PROCAGICA
- Anuario de la OIC
- Revista Informativa del ICAFE y CICAFAE
- Informes de actividad cafetalera del ICAFE
- Informe estadístico anual IHCAFE
- Revista Cosecha IHCAFE
- Revista El Cafetal ANACAFE
- Informes mensuales CSC

- Revista Nota de café del CSC
- Revista Cosecha del Cambio
- Boletín CENTA Informa

ICAFFE en su página web <http://www.icafe.cr/> registra algunos de los episodios de enfermedades y plagas del sector cafetalero de Costa Rica. IHCAFE en su sitio web <https://www.ihcafe.hn/> menciona algunos de los incidentes de la plaga y las enfermedades. ANACAFE en su portal <https://www.anacafe.org/> reporta algunos de los eventos ligados a plagas y enfermedades que afectaron la caficultura. CSC resalta en su portal web <http://www.csc.gob.sv/> algunas fechas con incidencia. PROMECAFE identifica en su sitio web <https://promecafe.net/> algunos años con incidencia de broca, roya y ojo de gallo en Centroamérica. OIC en su portal <http://www.ico.org/> muestra información relevante de interés para la caficultura Regional.

3. Resultados

Esta sección contiene los resultados de las categorías climáticas según sea la enfermedad o plaga.

3.1 Resultados de roya (*Hemileia vastatrix*)

3.1.1 Factores climáticos seleccionados

Se muestran en el Cuadro 4 aquellas variables climáticas identificadas como potenciadoras del desarrollo de la roya (*Hemileia vastatrix*) según los resultados del Artículo I.

Cuadro 4. Listado de variables climáticas, así como su respectivo periodo de influencia, identificadas como potenciadoras del desarrollo de la roya (*H. vastatrix*) según los resultados del Artículo I

Variable	Código
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 1, de diciembre a abril.	ATMN8_P1
Número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C, en el periodo 1, de diciembre a abril.	TMMN26_P1
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 2, de mayo a junio.	PRCMY1_P2
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el período 4, de setiembre a noviembre.	PRCMY1_P4
Número de días con valores de lluvia mayor a 5 mm, en el período 4, de setiembre a noviembre.	PRCMY5_P4
Número de días con valores de lluvia mayor a 10 mm, en el periodo 1, de diciembre a abril.	PRCMY10_P1
Número de días con valores de lluvia mayor a 10 mm, en el período 4, de setiembre a noviembre.	PRCMY10_P4
Cantidad total de lluvia del período 4, de setiembre a noviembre.	PRCtot_P4
Duración de la primera época seca.	PRCdura_P1

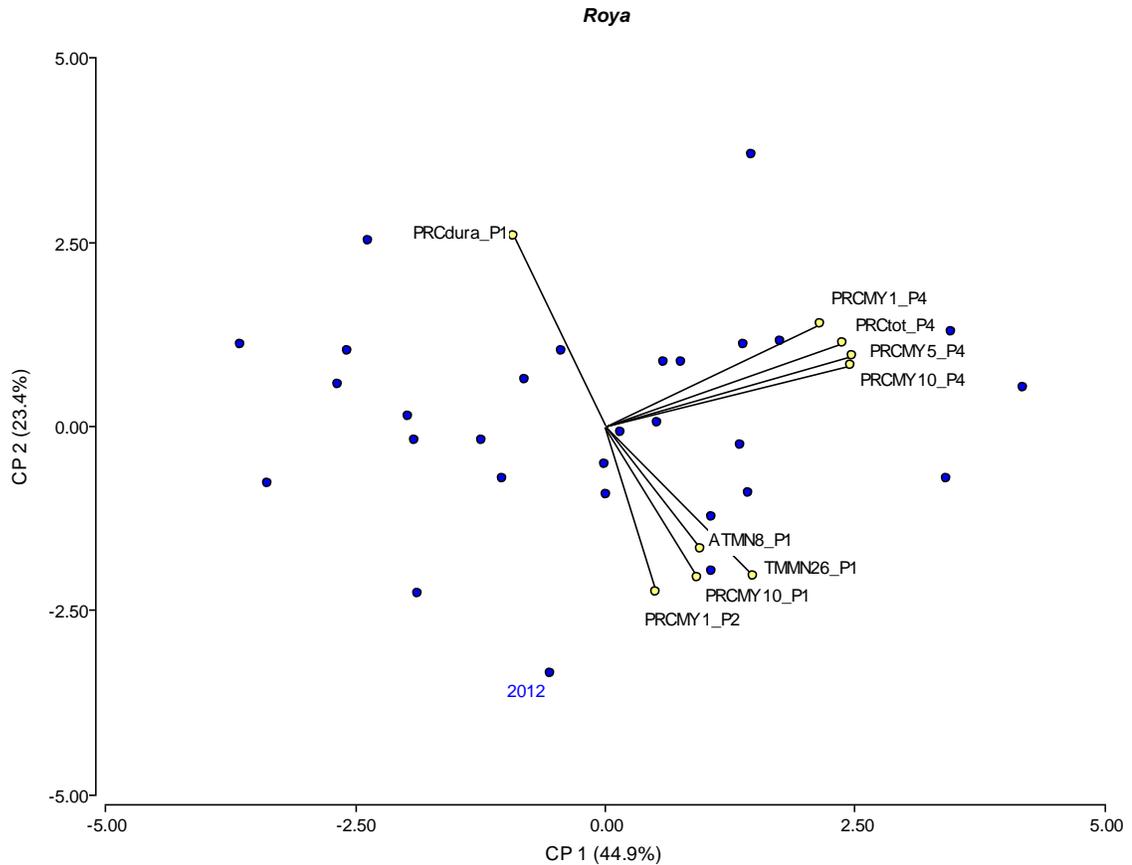


Figura 17. Biplot del Análisis de Componentes Principales (ACP), generado utilizando “año” como criterio de clasificación de las variables estudiadas para el caso de la roya (*H. vastatrix*) en Centroamérica. El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 4

Del ACP aplicado a las variables del Cuadro 4 se obtiene la Figura 17. Entre las correlaciones que arroja el análisis ACP se identifican las siguientes variables redundantes: número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el período 2, número de días con valores de lluvia mayor a 5 mm, en el período 4, número de días con valores de lluvia mayor a 10 mm, en el período 1, número de días con valores de lluvia mayor a 10 mm, en el período 4 y cantidad total de lluvia del período 4. El Cuadro 5, contiene las variables meteorológicas que se seleccionaron para la siguiente fase del análisis, por ser menos redundantes entre sí.

Cuadro 5. Variables climáticas en su respectivo periodo de acción que influyen en el desarrollo de la roya (*H. vastatrix*) como enfermedad del café, consideradas no redundantes.

Variable	Código
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 1, de diciembre a abril.	ATMN8_P1
Número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C, en el periodo 1, de diciembre a abril.	TMMN26_P1
Número de días con valores de lluvia mayor a 5 mm, en el período 4, de setiembre a noviembre.	PRCMY1_P4
Duración de la primera época seca.	PRCdura_P1

3.1.2 Categorías climáticas

Del dendograma aplicado a las variables no redundantes en cuanto a su aporte al desarrollo de la roya, mostrado en el Cuadro 5, utilizando como criterio de clasificación el año, se generan 7 grupos.

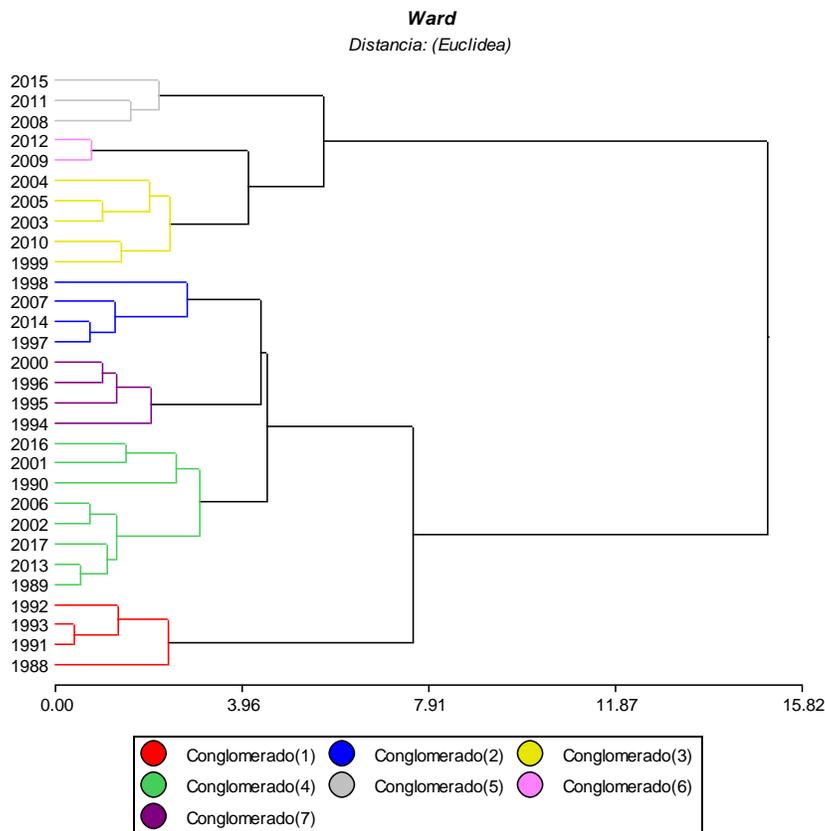


Figura 18. Dendograma de las variables definidas para roya (*H. vastatrix*), con año como criterio de clasificación, donde se generan 7 grupos utilizando distancia Euclídea y el método Ward

Se obtienen diferentes calificaciones tras las pruebas de medias de los grupos de la Figura 18 que fueron utilizados en el análisis de roya. El Cuadro 6 contiene las calificaciones obtenidas por cada grupo, donde el grupo que presenta la nota más alta surge tras sumar las notas asignadas a cada una de sus variables utilizadas en el análisis de roya (*Hemileia vastatrix*). Por ser conteos, a todas las variables se aplican pruebas de medias en cada uno de los grupos generados mediante Modelos Lineales Generalizados Mixtos (GLMM, por sus siglas en inglés) con distribución binomial negativa y función de enlace logarítmica.

Cuadro 6. Prueba de medias y categorización de las variables utilizadas para roya (*H. vastatrix*). El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 4

Variable - Grupo	Grupo1			Grupo2			Grupo3			Grupo4			Grupo5			Grupo6			Grupo7			
Variable	Periodo	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota
PRCdura**	P1	199.39	A	1.0	181.95	CD	5.0	170.58	E	7.0	185.38	BC	3.5	192.54	AB	2.0	173.95	DE	6.0	187.48	BC	3.5
ATMN8*	P1	28.03	AB	2.0	27.39	AB	2.0	36.3	A	6.0	31.18	AB	2.0	36.22	A	6.0	37.68	A	6.0	22.22	B	4.0
PRCMY5*	P4	26.18	B	5.5	35.01	A	2.0	33.28	A	2.0	28.49	B	5.5	36.69	A	2.0	25.45	B	5.5	28.04	B	5.5
TMMN26*	P1	47.8	B	1.0	60.26	AB	3.0	70.28	A	6.0	61.27	AB	3.0	77.4	A	6.0	80.5	A	6.0	61.68	AB	3.0
Nota total:		9.5			12			21			14			16			23.5			16		

Del Cuadro 6 se extrae que el grupo 6 obtuvo la mejor nota con un total de 23.5 puntos. El grupo 6 agrupa los años 2012 y 2009, clasificado en la tipología muy favorable. El grupo 3 está conformado por los años 1999, 2003, 2004, 2005 y 2010, con una calificación de 21 puntos, considerado favorable. El grupo 7 está integrado por los años 1994, 1995, 1996 y 2000, con una calificación de 16 puntos, categorizado como medio favorable. El grupo 5 está compuesto por los años 2008, 2011 y 2015, con una calificación de 16 puntos, en la categoría medio favorable. El grupo 4 contiene los años: 1989, 1990, 2001, 2002, 2006, 2013, 2016 y 2017, con una calificación de 14 puntos, clasificado medio favorable. El grupo 2 se compone de los años 1997, 1998, 2007 y 2014, con una calificación de 12 puntos, considerado desfavorable. El grupo 1 se conforma por los años 1988, 1991, 1992 y 1993, con una calificación de 9.5 puntos, categorizado desfavorable.

3.1.3 Reportes de incidencia de roya

La revisión literaria en cuanto a las publicaciones científicas que reportan la incidencia de roya, ojo de gallo y broca en Centroamérica, se centran en los eventos extremos de los últimos 30 años, aunque se identifican años sin un nivel de problemática asociada al episodio de roya. Avelino y Rivas (2015) reportan fuertes eventos de roya en Centroamérica durante los años 1989-1990 en Costa Rica, 1995-1996 en Nicaragua, 2002-2003 en El Salvador. Estas epidemias fueron causadas por una combinación de factores económicos, agrícolas, meteorológicos y factores de producción. La incidencia más fuerte reportada en casi toda la región fue durante el año 2012, según los autores fue debida a un aumento en las temperaturas mínimas acompañado de una disminución de las precipitaciones en la segunda parte del año.

Avelino et al. (2015) mencionan que el manejo en campo del cafetal fue bajo durante los años 2008 a 2013, posiblemente debido a las dificultades económicas que sufrieron los productores en esos años. Los autores reconocen que las anomalías climáticas tuvieron efecto en la epidemia, principalmente por los periodos lluviosos en la época seca y veranillo. Mencionan la importancia de la distribución de lluvia o ausencia de ésta, para el desarrollo de la roya. Durante al año 2012, al igual que durante la epidemia de Nicaragua en 1995 -1997, el periodo lluvioso se adelantó generando un incremento temprano de la roya. Reportan las epidemias de Guatemala como igualmente intensas en diferentes elevaciones entre 400 m s.n.m. y 1400 m s.n.m., decreciendo después de esta altura.

El Cuadro 7 sintetiza los países que reportaron incidencia de roya en los últimos 30 años según las fuentes siguientes: los años identificados por los expertos de los institutos de café encuestados en la reunión de PROCAGICA en CATIE durante el año 2018; la incidencia reclutada durante el desarrollo de mesas de trabajo con productores y expertos regionales cafetaleros en el trabajo de investigación Cofre (2018); reportes de incidencia en los boletines cafetaleros de los institutos de café; años con incidencia regional mencionada en publicaciones científicas de expertos regionales en roya.

La investigación literaria arroja algunos puntos clave en el desarrollo o supresión de epidemias de roya. ICAFE identifica durante la cosecha 2012-2013 el clima como un factor determinante en el desarrollo de algunas enfermedades de importancia económica en el sector cafetalero, mientras el ojo de gallo disminuyó, la roya incrementó su incidencia en varias regiones cafetaleras de Costa Rica. El mal mantenimiento del cultivo fue otro factor determinante en la epidemia de roya en 2012. En Costa Rica las pérdidas adjudicadas a la Roya fueron alrededor del 70% de la producción total nacional de 5.77%. Incluso la enfermedad logró afectar zonas altitudinales que no solían ser afectadas anteriormente por ésta (ICAFE 2013). ICAFE registra durante la cosecha 2015-2016 una reducción considerable de los niveles de broca y roya en Costa Rica (ICAFE 2015). Desde 2017 el ICAFE mantiene un monitoreo

continuo de la incidencia de broca y roya con el fin de identificar la curva de progreso de las enfermedades presentes en 210 sitios de evaluación. Costa Rica mantiene mediante la página web <http://www.icafe.cr/cicafe/investigaciones> un monitoreo del grado de amenaza que existe para el avance de la roya del cafeto según condiciones climáticas que la favorecen (ICAFFE 2017). Durante la epidemia centroamericana de roya en 2012 el país más afectado fue El Salvador con un 74 % de incidencia, seguido de Guatemala con 70 %, luego Costa Rica con 64 %, después Nicaragua con 37 % y Honduras con 25 % (La Prensa Gráfica 2013). Para los otros países no fue posible identificar información más detallada al respecto entre la literatura de los Institutos de café.

Cuadro 7. Reportes de incidencia de roya (*H. vastatrix*) según revistas de institutos nacionales de café, encuesta, investigaciones científicas y tesis, para Costa Rica (CR), Honduras (HO), El Salvador (ES) y Guatemala (GU) en el periodo 1987 al 2017

Año	País	Año	País
1987	CR(McCook 2009)-HO(Cofre 2018)	2003	ES(McCook 2009, Cofre 2018)
1988	CR(ICAFFE 2014)	2004	
1989	CR(Avelino y Rivas 2015)-ES(Cofre 2018)	2005	
1990	CR(Avelino y Rivas 2015)-ES(Cofre 2018)	2006	
1991		2007	
1992		2008	
1993	GU(PROMECAFE 1999)	2009	CR(ICAFFE 2010)
1994	HO(PROMECAFE 1999)	2010	CR(ICAFFE 2011)
1995	HO(PROMECAFE 1999)	2011	HO(Cofre 2018)-ES(Cofre 2018)
1996	HO(PROMECAFE 1999)	2012	CR(ICAFFE 2013, Avelino y Rivas 2015)- HO(Cofre 2018, Avelino y Rivas 2015)-
1997	HO(PROMECAFE 1999)	2013	CR(ICAFFE 2014)-GU(Cofre 2018)
1998		2014	CR(ICAFFE 2015)-HO(FEWS NET 2016)- ES(FEWS NET 2016)
1999		2015	CR(ICAFFE 2016)-GU(ANACAFE 2015)
2000		2016	CR(ICAFFE 2017)-HO(IHCAFFE 2017)- GU(ANACAFE 2016a)
2001		2017	CR(ICAFFE 2017)-HO(IHCAFFE 2018)
2002	ES(McCook 2009, Cofre 2018)		

3.1.4 Reportes de incidencia en agrupaciones de roya

En el caso de las agrupaciones para la roya (*H. vastatrix*), las calificaciones asociadas a condiciones climáticas favorables para su desarrollo presentan varios estratos que varían según el grupo de años que lo conforman. Del Cuadro 7 se extrae el grupo 6 como el que obtiene la mejor nota total de 23.5 puntos. Este mismo grupo 6 registra 19 años con datos en el 2012 y 2009. El año 2012 fue identificado en la revisión bibliográfica como un año con epidemia de roya en Centroamérica, incluidos los países contemplados en este estudio. Durante el 2012 la cosecha tuvo pérdidas de la producción a nivel centroamericano asociadas al 53% de incidencia de la roya en la región. PROMECAFE reconoce el impacto de la roya en el año 2012 como la de mayor impacto desde el ingreso de la roya en Centroamérica en 1976, con declaraciones de emergencia en los diferentes países de la región debido a su impacto económico, social, político y ambiental (PROMECAFE 2013). ICAFFE asocia las pérdidas de la cosecha 2012-2013 a las condiciones climáticas favorables para la roya que propiciaron el incremento de enfermedades en los cafetales (ICAFFE 2013). En el año 2009 se reporta incidencia de roya solamente en Costa Rica, donde las regiones cafetaleras con mayores pérdidas productivas reportadas se ubican en Valle Occidental y Valle Central. El ICAFFE identifica entre los factores

precursores en la pérdida de la producción en 2009 las condiciones de clima adversas asociadas a lluvias excesivas y mal manejo del cafetal, entre otros (ICAFFE 2010).

El grupo 3 está conformado por los años 1999, 2003, 2004, 2005 y 2010, con una calificación de 21 puntos. De los cuales 2003 muestra incidencia de roya en El Salvador, 2010 en Costa Rica, mientras 1999, 2004 y 2005 no reportan incidencia. La ausencia de reportes de incidencia en la literatura no implica ausencia de las condiciones propicias en campo. OIC identifica un desplome en el precio del café en la cosecha 1998-1999 debido al colapso del sistema de cuotas. OIC reporta una crisis del sector cafetalero durante 2002 y 2005 que causó desempleo generalizado, abandono de fincas y desplazamientos de población a zonas urbanas, entre otros efectos (OIC 2014). La cosecha 2005-2006 fuertemente afectada por el comportamiento volátil de los precios del petróleo y factores climáticos como el Huracán Stan, que conllevó a reducción en la producción de El Salvador, Guatemala y Costa Rica (ICAFFE 2006). La cosecha 2004-2005 en Guatemala y El Salvador se vio afectada por fenómenos climáticos, por la vulnerabilidad del cultivo antes cambios climáticos (ICAFFE 2005).

El grupo 7 está conformado por los años 1994, 1995, 1996 y 2000, con una calificación de 16 puntos. De los cuales 1994, 1995 y 2000 reportan incidencia de roya en Costa Rica, así como el año 1996 fue año de roya en Honduras y El Salvador.

El grupo 5 está compuesto por los años 2008, 2011 y 2015, con una calificación de 16 puntos. De los cuales 2008 no reporta incidencia, 2011 reporta afectaciones en Honduras y El Salvador, mientras 2015 reporta solamente en Guatemala y Costa Rica.

El grupo 4 está integrado por los años: 1989, 1990, 2001, 2002, 2006, 2013, 2016 y 2017, con una calificación de 14 puntos. De los cuales 1989 y 1990 reportan roya en Costa Rica y El Salvador, 2002 y 2013 reportan en El Salvador, Guatemala y Costa Rica respectivamente, 2016 en Costa Rica, Guatemala y Honduras y 2017 reportan en Costa Rica y Honduras, mientras 2001 y 2006 no reportan incidencia.

El grupo 2 está constituido por los años 1997, 1998, 2007 y 2014, con una calificación de 12 puntos. De los cuales 1997 reporta roya en Guatemala, el año 2014 presenta evento de roya en Costa Rica, Honduras y El Salvador, mientras 1998 y 2007 no reportan incidencia.

El grupo 1 agrupa los años 1988, 1991, 1992 y 1993, con una calificación de 9.5 puntos. De los cuales 1988 reporta roya en Costa Rica, en 1993 reporta en Guatemala, mientras 1991 y 1992 no presentan reportes.

3.2 Resultados del ojo de gallo (*Mycena citricolor*)

3.2.1 Factores climáticos seleccionados

Se identifican en el Artículo I las variables climáticas que influyen en el desarrollo del ojo de gallo, estos son sintetizados en el Cuadro 8, donde se reporta el periodo del año en el cual es importante su efecto.

El ACP generado mediante el software InfoStat utilizando las variables del Cuadro 8 se muestra en la Figura 19. Se identifican las siguientes variables redundantes según las correlaciones del análisis ACP: número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 1, número de días con valores de lluvia mayor a 5 mm, en el periodo 2, número de días con valores de lluvia mayor a 5 mm, en el periodo 3 y cantidad total de lluvia del período 3. El Cuadro 9, contiene las variables meteorológicas que influyen de forma favorable en la ocurrencia de ojo de gallo (*M. citricolor*) sin duplican su efecto gracias al descarte de las variables redundantes.

Cuadro 8. Listado de variables identificadas en el Artículo I de esta investigación y su respectiva época considerada útil para para el desarrollo del ojo de gallo (*M. citricolor*) del café en Centroamérica

Variable	Código
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 2, de mayo a junio.	ATMN8_P2
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 4, de setiembre a noviembre.	ATMN8_P3
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 3, de julio a agosto.	ATMN8_P4
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 2, de mayo a junio.	PRCMY1_P2
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 3, de julio a agosto.	PRCMY1_P3
Número de días con valores de lluvia mayor a 5 mm, en el período 2, de mayo a junio.	PRCMY5_P2
Número de días con valores de lluvia mayor a 5 mm, en el período 3, de julio a agosto.	PRCMY5_P3
Cantidad total de lluvia del período 2, de mayo a junio.	PRCtot_P2
Cantidad total de lluvia del período 3, de julio a agosto.	PRCtot_P3
Cantidad total de lluvia del período 4, de setiembre a noviembre.	PRCtot_P4
Número de días de la duración del periodo 3, de julio a agosto.	PRCdura_P3

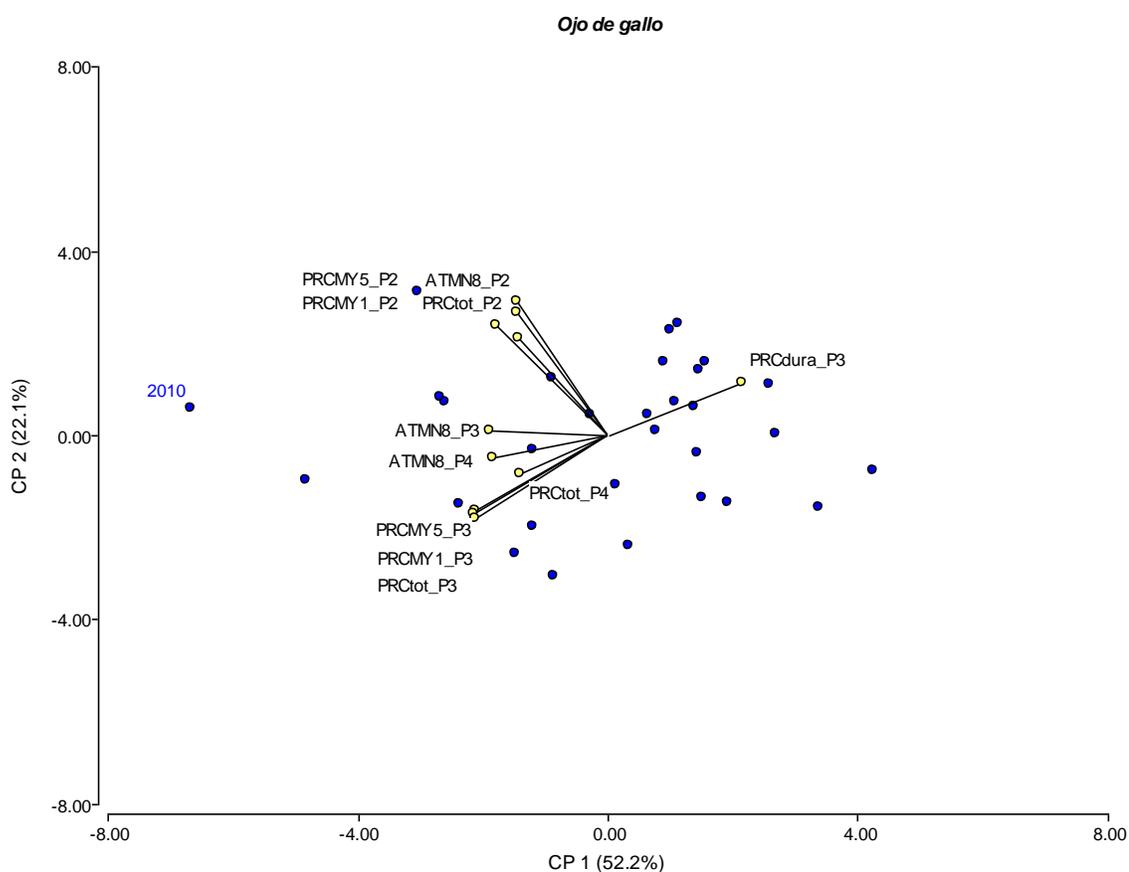


Figura 19. Biplot del Análisis de Componentes Principales (ACP), generado utilizando "año" como criterio de clasificación de las variables estudiadas para el caso del ojo de gallo (*M. citricolor*). El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 8

Cuadro 9. Variables climáticas y su respectivo periodo de acción que influyen en el desarrollo del ojo de gallo (*M. citricolor*) como enfermedad del café. Estas variables climáticas son consideradas no redundantes

Variable	Código
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 2, de mayo a junio.	ATMN8_P2
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 4, de setiembre a noviembre.	ATMN8_P3
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 3, de julio a agosto.	ATMN8_P4
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 2, de mayo a junio.	PRCMY1_P2
Cantidad total de lluvia del período 2, de mayo a junio.	PRCtot_P2
Cantidad total de lluvia del período 4, de setiembre a noviembre.	PRCtot_P4
Duración de la segunda época seca.	PRCdura _P3

3.2.2 Categorías climáticas

Se obtienen 6 grupos en el análisis de ACP para las variables climáticas no redundantes del análisis del ojo de gallo mostradas en el Cuadro 9, tras aplicar un dendrograma con criterio de clasificación año.

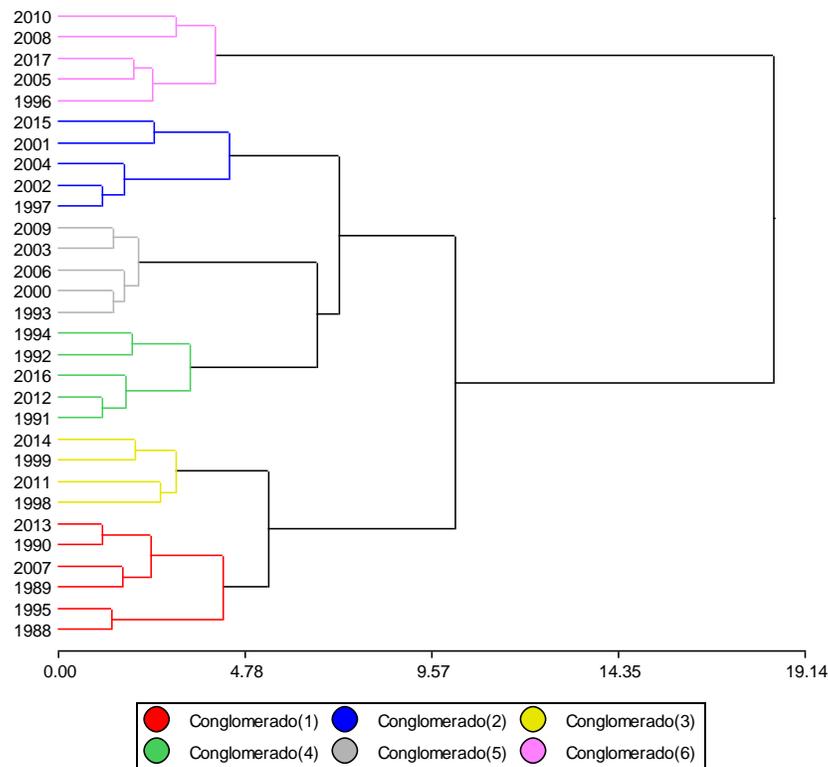


Figura 20. Dendrograma de las variables definidas para el ojo de gallo (*M. citricolor*), con año como criterio de clasificación. Se generan 6 grupos utilizando distancia Euclídea y el método Ward

Se generan calificaciones diferentes para los seis grupos resultantes en el análisis de pruebas de medias aplicadas a las variables climáticas que influyen en el desarrollo del ojo de gallo. En el Cuadro 10 se muestran las calificaciones obtenidas por cada grupo. En las variables de conteos (*) se realizan pruebas de medias mediante Modelos Lineales Generalizados Mixtos (GLMM, por sus siglas en inglés) con distribución binomial negativa y función de enlace logarítmica. En las variables continuas (**) se realizan pruebas de medias mediante Modelos Lineales Generales y Mixtos con método de estimación de máxima verosimilitud restringida (REML, por sus siglas en inglés). Se comprueba que dicha variable denominada lluvia total del periodo cumpla con los supuestos de normalidad, y homogeneidad de varianza.

Cuadro 10. Prueba de medias y categorización de las variables utilizadas para ojo de gallo (*M. citricolor*), en cada uno de los grupos generados. El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 8

Variable - Grupo		Grupo1			Grupo2			Grupo3			Grupo4			Grupo5			Grupo6		
Variable	Periodo	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota
PRCdura *	P3	22.32	B	4.5	50.83	A	2.0	24.3	B	4.5	41.17	A	2.0	36.8	A	2.0	11.48	C	6.0
ATMN8 *	P2	12.67	C	1.5	19.27	AB	5.0	15.74	BC	3.0	13.01	C	1.5	17.08	B	4.0	23.1	A	6.0
ATMN8 *	P3	15.03	BC	2.0	18.03	AB	4.0	17.13	AB	4.0	11.87	C	1.0	17.22	AB	4.0	22.16	A	6.0
ATMN8 *	P4	31.41	B	2.5	29.89	B	2.5	42.58	A	5.5	27.63	B	2.5	27.74	B	2.5	46.79	A	5.5
PRCtot **	P2	445.85	C	2.5	425.53	C	2.5	451.91	C	2.5	427.95	C	2.5	532.9	B	5.0	608.54	A	6.0
PRCtot **	P4	691.97	B	3.5	680.02	B	3.5	872.4	A	5.5	523.14	D	1.0	590.76	C	2.0	788.23	A	5.5
PRCMY1 *	P2	42.61	B	2.5	39.62	B	2.5	43.14	B	2.5	43.07	B	2.5	49.42	A	5.5	51.72	A	5.5
Nota total:		19			22			27.5			13			25			40.5		

Del Cuadro 10 se extrae que el grupo 6 obtuvo la mejor nota con un total de 40.5 puntos. El grupo 6 registra los años 1996, 2005, 2008 y 2010, categorizado en la tipología muy favorable. El grupo 3 está conformado por los años 1998, 1999, 2011 y 2014, con una calificación de 28 puntos, considerado favorable. El grupo 5 está integrado por los años 1993, 2000, 2003, 2006 y 2009, con una calificación de 25 puntos, clasificado como medio favorable. El grupo 2 está constituido por los años 1997, 2001, 2002, 2004 y 2015, con una calificación de 22 puntos, considerado desfavorable. El grupo 1 se compone por los años 1988, 1989, 1990, 1995, 2007 y 2013, con una calificación de 19.5 puntos, identificado como desfavorable. El grupo 4 se compone por los años 1991, 1992, 1994, 2012, 2016 y 2017 con una calificación de 13 puntos, ubicado en la tipología desfavorable.

3.2.3 Reportes de incidencia de ojo de gallo

Algunos investigadores reportan en sus publicaciones aquellos años en los cuales la incidencia de ojo de gallo ha sido alta. Wang y Avelino (1999) mencionan la ocurrencia de un episodio de ojo de gallo en Costa Rica, que se mantuvo presente durante el año 1986 a pesar de iniciar en el año 1985, donde su extensión se debió al inóculo residual. Granados (2015) en su trabajo doctoral reporta el año 2010 como la última epidemia regional de ojo de gallo con fuertes implicaciones en el Valle Central y Zona de los Santos en Costa Rica.

El Cuadro 11 contiene los reportes de incidencia de ojo de gallo en los últimos 30 años, según las siguientes fuentes: aquellos años identificados por los expertos de los institutos de café encuestados en la reunión de PROCAGICA en CATIE durante el año 2018; la incidencia reclutada durante el desarrollo de mesas de trabajo con productores y expertos regionales cafetaleros en el trabajo de investigación Cofre (2018); reportes de incidencia en los boletines cafetaleros de los institutos de café; años con incidencia regional mencionada en publicaciones científicas de expertos regionales en ojo de gallo.

Cuadro 11. Reportes de incidencia de ojo de gallo (*M. citricolor*) según revistas de institutos nacionales de café, investigaciones y tesis, para Costa Rica (CR), Honduras (HO), El Salvador (ES) y Guatemala (GU) en el periodo 1987 al 2017

Año	País	Año	País
1987	GU(Cofre 2018)	2003	GU(Cofre 2018)
1988		2004	CR(ICAFE 2005)-GU(Cofre 2018)
1989		2005	CR(ICAFE 2006)-GU(Cofre 2018)
1990	GU(Cofre 2018)	2006	CR(ICAFE 2007)-GU(Cofre 2018)
1991	GU(Cofre 2018)	2007	CR(ICAFE 2008)-GU(Cofre 2018)
1992	GU(Cofre 2018)	2008	CR(ICAFE 2009)-GU(Cofre 2018)
1993	GU(Cofre 2018)	2009	CR(ICAFE 2010)-GU(Cofre 2018)
1994	GU(Cofre 2018)	2010	CR(ICAFE 2011)-GU(Cofre 2018)
1995	GU(Cofre 2018)	2011	GU(Cofre 2018)
1996	CR(ICAFE 2006)-GU(Cofre 2018)	2012	GU(Cofre 2018)
1997	GU(Cofre 2018)	2013	CR(ICAFE 2014)-GU(Cofre 2018)
1998	GU(Cofre 2018)	2014	CR(ICAFE 2015)-GU(Cofre 2018)
1999	GU(Cofre 2018)	2015	GU(Cofre 2018)
2000	GU(Cofre 2018)	2016	GU(Cofre 2018)
2001	GU(Cofre 2018)	2017	GU(Cofre 2018)
2002	GU(Cofre 2018)		

Esta etapa investigativa muestra algunos puntos clave en el desarrollo o supresión de epidemias de ojo de gallo. ICAFE durante la cosecha 2012-2013 evidencia muy disminuida la incidencia del ojo de gallo, a tal punto que los ensayos en campo fracasan por la baja incidencia de inóculo. En Costa Rica se implementa un sistema de alerta temprana para el ojo de gallo según predictores climáticos como mojadura foliar, cantidad de lluvia y número de días con lluvia por semana (ICAFE 2012). ICAFE identifica las fuertes precipitaciones de octubre y noviembre del año 2013 como precursor del aumento en la incidencia de ojo de gallo en la cosecha 2013-2014, debido al lavado de nutrientes del suelo y fertilizantes aplicados (ICAFE 2013). Para los otros países no fue posible identificar información al respecto entre la literatura de los Institutos de café.

3.2.4 Reportes de incidencia en agrupaciones de ojo de gallo

En el caso de las agrupaciones para el ojo de gallo (*M. citricolor*), las calificaciones asociadas a condiciones climáticas favorables para su desarrollo presentan varios estratos que varían según el grupo de años que lo conforman. Del Cuadro 10 se extrae el grupo 6 como el que obtiene la mejor nota total de 39.5 puntos. Este mismo grupo 6 registra 15 años en 1996, además de 23 años en 2005, así como 23 años en 2008, los 23 años con datos en el 2010 y sus 21 años en 2017. En cuanto a los reportes, durante los años 1996, 2005, 2008 y 2010 se presenta incidencia en Costa Rica y Guatemala con pérdidas debido al ojo de gallo. El año 2017 registra incidencia de ojo de gallo solamente en Guatemala. El año 2010 fue identificado en la revisión bibliográfica como un año con epidemia de ojo de gallo en Costa Rica. ICAFE identifica pérdidas en la producción debido al ojo de gallo en diversas zonas cafetaleras de Costa Rica, aunque debido al buen manejo de las fincas las pérdidas no fueron tan malas como se esperaba (ICAFE 2011). ICAFE cuantifica pérdidas en la producción del 2008 debido al exceso de lluvias en la época de cosecha, altos costos de producción, entre otros (ICAFE 2009). Durante la cosecha del 2005 el ICAFE evidencio entre los factores que influyen en las pérdidas de producción del 2005 los factores climáticos y precios bajos de mercado (ICAFE 2006). Durante la cosecha de 1996, Costa Rica presencié hasta un 15% de afectación por ojo de gallo en las

zonas cafetaleras (Chaves 1996). ICAFE durante el 2012 percibió una reducción significativa del ojo de gallo en los cafetales (ICAFE 2013).

El grupo 3 está conformado por los años 1998, 1999, 2011 y 2014, con una calificación de 28 puntos. De los cuales 1998 y 1999 reportan afectación en Guatemala, 2014 solo afecto a Costa Rica y 2011 se tiene reportes de ojo de gallo en Guatemala.

El grupo 5 se compone por los años 1993, 2000, 2003, 2006 y 2009, con una calificación de 25 puntos. De los cuales 1993, 2000 y 2003 presentaron reportes en Guatemala, mientras 2006 y 2009 solo afectaron a Costa Rica.

El grupo 2 se conforma por los años 1997, 2001, 2002, 2004 y 2015, con una calificación de 22 puntos. De los cuales 1997, 2001 y 2002 reportan incidencia en Guatemala, mientras 2004 afecta a Costa Rica y Guatemala, así como 2015 no muestra reportes de perdidas según los Institutos de café.

El grupo 1 está constituido por los años 1988, 1989, 1990, 1995, 2007 y 2013, con una calificación de 19.5 puntos. De los cuales 1990 y 1995 reportan incidencia en Guatemala, mientras que en 2007 y 2013 el país afectado fue Costa Rica, así como 1988 y 1990 no registran problemas por ojo de gallo en los cultivos de café a nivel Regional.

El grupo 4 agrupa los años 1991, 1992, 1994, 2012 y 2016, con una calificación de 13 puntos. De los cuales 1991, 1992 y 1994 afectaron a Guatemala, mientras 2012, 2016 y 2017 no tiene reportes de incidencia en la Región.

3.3 Resultados de la broca (*Hypothenemus hampei*)

3.3.1 Factores climáticos seleccionados

Los resultados del Artículo I nos muestran variables climáticas que influyen en el desarrollo de la broca, tras sintetizarlas según su periodo de influencia en el año, se muestran en el Cuadro 12. Estas variables tras ser calculadas con datos reales de los cuatro países se convierten en el primer insumo de esta etapa investigativa.

Del ACP generado con las variables utilizadas para el análisis de la broca (*H. hampei*) que se muestran en el Cuadro 12 se obtiene la Figura 21. El ACP arroja la correlación de las variables, del cual se extrae la siguiente lista de variables redundantes: número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 1, número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 4, número de días con valores de lluvia mayor a 10 mm en el período 1, número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm en el período 1, cantidad total de lluvia del período 1, cantidad total de lluvia del período 3, cantidad total de lluvia del período 4, número de días de la duración del periodo 3, número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C en el periodo 1 y número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C en el periodo 2. El Cuadro 13, contiene las variables meteorológicas que influyen de forma favorable en la ocurrencia de plaga broca (*H. hampei*), que a su vez no duplican su efecto.

Cuadro 12. Variables identificadas en el Artículo I de esta investigación y su respectiva época considerada útil para para el desarrollo de la broca (*H. hampei*) del café en Centroamérica

Variable	Código
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 1, de diciembre a abril.	ATMN8_P1
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 2, de mayo a junio.	ATMN8_P2
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 4, de setiembre a noviembre.	ATMN8_P3
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 3, de julio a agosto.	ATMN8_P4
Número de días con valores de lluvia mayor a 5 mm, en el período 1, de diciembre a abril.	PRCMY5_P1
Número de días con valores de lluvia mayor a 10 mm, en el período 1, de diciembre a abril.	PRCMY10_P1
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 1, de diciembre a abril.	PRCMY1_P1
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 2, de mayo a junio.	PRCMY1_P2
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 3, de julio a agosto.	PRCMY1_P3
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 4, de setiembre a noviembre.	PRCMY1_P4
Cantidad total de lluvia del período 1, de diciembre a abril.	PRCtot_P1
Cantidad total de lluvia del período 2, de mayo a junio.	PRCtot_P2
Cantidad total de lluvia del período 3, de julio a agosto.	PRCtot_P3
Cantidad total de lluvia del período 4, de setiembre a noviembre.	PRCtot_P4
Duración de la primera época seca.	PRCdura_P1
Duración de la segunda época seca.	PRCdura_P3
Número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C, en el periodo 1, de diciembre a abril.	TMMN26_P1
Número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C, en el periodo 2, de mayo a junio.	TMMN26_P2
Número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C, en el periodo 3, de julio a agosto.	TMMN26_P3
Número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C, en el periodo 4, de setiembre a noviembre.	TMMN26_P4

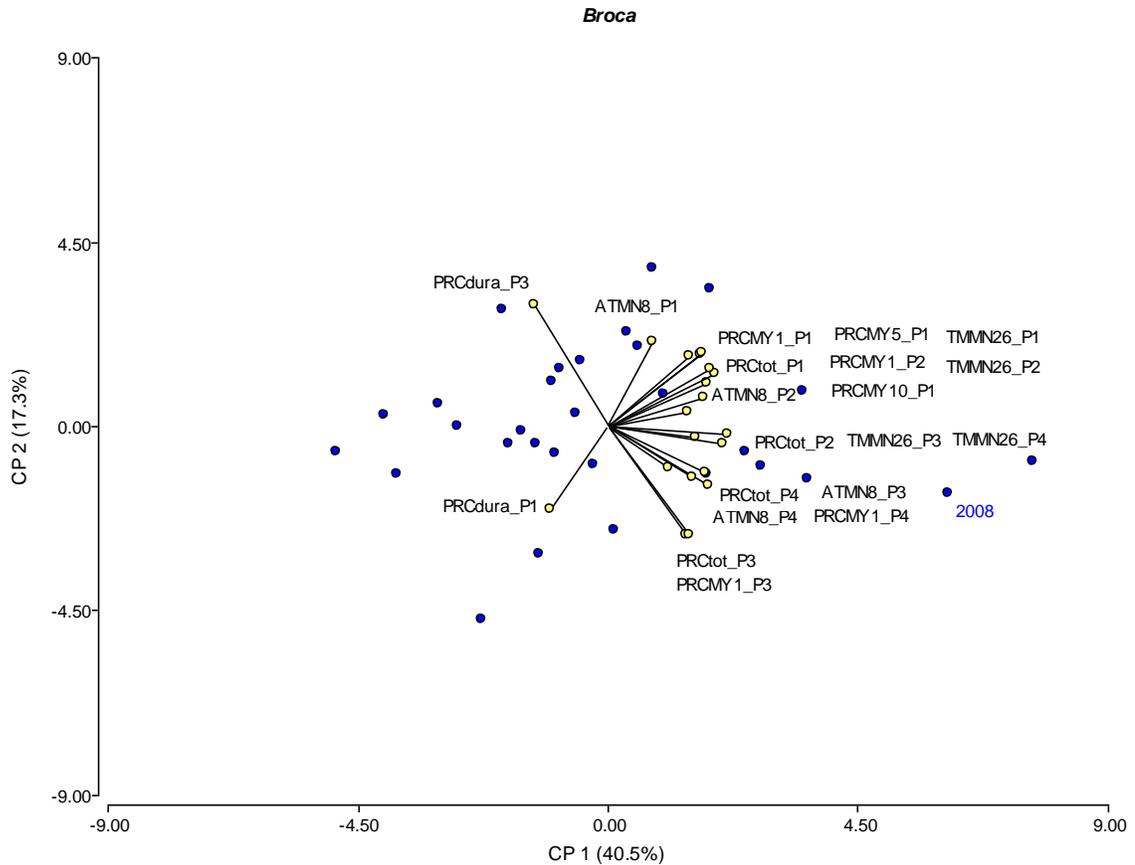


Figura 21. Biplot del Análisis de Componentes Principales (ACP), generado utilizando “año” como criterio de clasificación de las variables estudiadas para el caso de la broca (*H. hampei*). El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 12

Cuadro 13. Variables climáticas en su respectivo periodo de acción que influyen en el desarrollo de la broca (*H. hampei*) como plaga del café, consideradas no redundantes

Variable	Código
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 2, de mayo a junio.	ATMN8_P2
Número de días con valores de amplitud térmica inferior a 8°C en el periodo 4, de setiembre a noviembre.	ATMN8_P3
Número de días con valores de lluvia mayor a 5 mm, en el período 1, de diciembre a abril.	PRCMY5_P1
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 2, de mayo a junio.	PRCMY1_P2
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 3, de julio a agosto.	PRCMY1_P3
Número de días con valores de lluvia mayor a 1 mm, en el periodo 4, de setiembre a noviembre.	PRCMY1_P4
Cantidad total de lluvia del período 2, de mayo a junio.	PRCtot_P2
Duración de la primera época seca.	PRCdura_P1
Número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C, en el periodo 3, de julio a agosto.	TMMN26_P3
Número de días con valores de temperatura máxima menor a 26°C, en el periodo 4, de setiembre a noviembre.	TMMN26_P4

3.3.2 Categorías climáticas

Utilizando las 10 variables definidas no redundantes que muestra el Cuadro 13, se realiza un dendrograma utilizando como criterio de clasificación "año", mediante lo cual se obtienen 5 grupos ilustrados en la Figura 22.

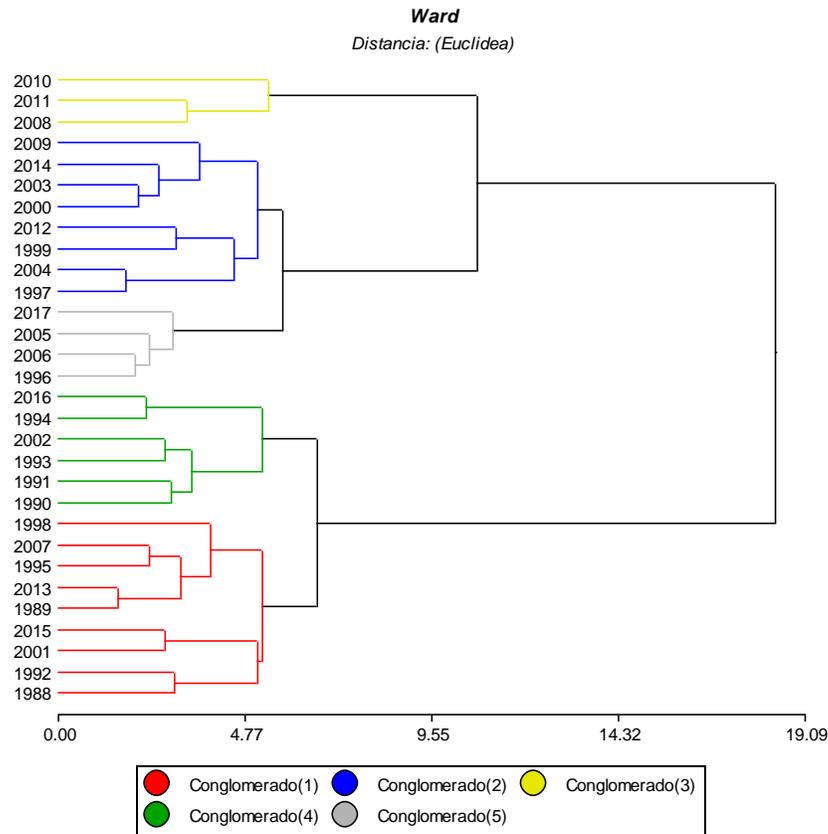


Figura 22. Dendrograma de las variables definidas para la broca (*H. hampei*), con año como criterio de clasificación. Se generan 5 grupos utilizando distancia Euclídea y el método de Ward.

En el Cuadro 14 se muestran las calificaciones obtenidas por cada grupo en el análisis de la broca (*H. hampei*), donde el grupo que presenta la nota más alta surge de sumar las notas de cada una de las variables específicamente para su grupo. En las variables de conteos (*) se realizan pruebas análisis de la varianza usando Modelos Lineales Generalizados Mixtos (GLMM, por sus siglas en inglés) con función binomial negativa y función de enlace logarítmica. En la variable cuantitativa (**) se realizan pruebas de medias mediante Modelos Lineales Generales y Mixtos con método de estimación de máxima verosimilitud restringida (REML, por sus siglas en inglés). Se comprueba que dicha variable denominada lluvia total del periodo cumpla con los supuestos de normalidad, homogeneidad y varianza.

Cuadro 14. Prueba de medias y categorización de las variables utilizadas para broca (*H. hampei*), en cada uno de los grupos generados. El detalle de las variables por código se aprecia en el Cuadro 13

Variable	Grupo	Grupo1			Grupo2			Grupo3			Grupo4			Grupo5		
		Periodo	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM	Nota	Media	PM
PRCdura *	P1	192.14	A	1.0	174.22	C	5.0	182.94	B	3.5	186.28	AB	2.0	184.18	B	3.5
ATMN8 *	P2	12.97	D	1.0	17.06	BC	3.0	23.36	A	5.0	15.66	CD	2.0	21.36	AB	4.0
ATMN8 *	P3	16.19	B	2.0	16.36	B	2.0	24	A	5.0	14	B	2.0	18.32	AB	4.0
PRCtot **	P2	416.75	C	1.5	499.72	B	3.0	558.8	A	4.5	438.47	C	1.5	590	A	4.5
PRCMY1 *	P2	39.06	D	1.0	46.76	BC	3.0	49.16	AB	4.0	43.98	C	2.0	51.33	A	5.0
PRCMY1 *	P3	45.96	B	3.5	37.5	C	1.5	60.99	A	5.0	39.88	C	1.5	48.11	B	3.5
PRCMY1 *	P4	66.4	A	3.5	64.14	A	3.5	69.99	A	3.5	55.96	B	1.0	62.8	A	3.5
PRCMY5 *	P1	8.49	BC	2.0	9.65	AB	3.5	11.12	A	5.0	7.41	C	1.0	9.66	AB	3.5
TMMN26 *	P3	23.65	B	1.5	26.06	AB	3.5	35.43	A	5.0	20.52	B	1.5	26.71	AB	3.5
TMMN26 *	P4	42.89	B	1.5	46.77	AB	3.5	58.96	A	5.0	38.81	B	1.5	47.74	AB	3.5
Nota total:				18.5			31.5			45.5			16			38.5

Del Cuadro 14 se extrae que el grupo 3 obtuvo la mejor nota con un total de 45.5 puntos. El grupo 3 registra los años 2008, 2010 y 2011, clasificado en la tipología muy favorable. El grupo 5 está conformado por los años 1996, 2005, 2006 y 2017, con una calificación de 38.5 puntos, categorizado como favorable. El grupo 2 está integrado por los años 1997, 1999, 2000, 2003, 2004, 2009 2012 y 2014, con una calificación de 31.5 puntos, considerado medio favorable. El grupo 1 está constituido por los años 1988, 1989, 1992, 1995, 1998, 2001, 2007, 2013 y 2015, con una calificación de 18.5 puntos, clasificado desfavorable. El grupo 4 se compone de los años 1990, 1991, 1993, 1994, 2002 y 2016, con una calificación de 16 puntos, ubicado en la tipología desfavorable.

3.3.3 Reportes de incidencia de broca

El Cuadro 15 lista para los cuatro países los años que reportaron de incidencia de broca en el análisis de la broca (*H. hampei*) en los últimos 30 años. Entre las fuentes consultadas se tienen: expertos de los institutos de café encuestados en la reunión de PROCAGICA en CATIE durante el año 2018, incidencia reclutada durante el desarrollo de mesas de trabajo con productores y expertos regionales cafetaleros en el trabajo de investigación de Cofre (2018), boletines cafetaleros de los institutos de café y publicaciones científicas de expertos regionales en broca.

La revisión literaria identifica años que sufrieron desarrollo o supresión de la incidencia de broca en los últimos 30 años. En el año 1989, 10 años después de su primer reporte, se inicia con el control biológico ante la broca en la región centroamericana (PROMECAFE 2008). A pesar de este esfuerzo regional, hoy día se reportan pérdidas de producción debido al coleóptero. En el año 2010 Costa Rica mantiene un 12.4% del área productiva nacional cafetalera con afectación por broca (ICAFE 2010). En 2007 se identifican Turrialba y Pérez Zeledón como las zonas cafetaleras más afectadas por broca, a pesar de ser muy lluviosas (ICAFE 2007). Se identifica Turrialba como la región cafetalera con más susceptibilidad para la incidencia de broca por sus condiciones climáticas que favorecen muchas floraciones al año, por lo que insertan un parasitoide (*Prorops nasuta*) como plan piloto de control biológico de broca, obteniéndose un parasitismo del 27% y reproducción de 5 avispas por fruto parasitado. Durante la cosecha 2010-2011 se identificó un promedio ponderado de ataque en campo de 2.76% mientras que la cosecha 2009-2010 alcanza valores de 3,19%, considerados valores aceptables dadas las condiciones climáticas de Turrialba, que se debe al manejo integrado de

la broca (MIB) que realizan los productores. En 2011 se inicia el sistema de alerta temprana para broca en Costa Rica (ICAFE 2011). Las cosechas 2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015 muestran promedio ponderados de infestación de 2.37%, 3.04% y 2.56% respectivamente (ICAFE 2014). La cosecha 2016-2017 identifica un promedio ponderado de infestación del 2.2% (ICAFE 2017). Solo en Costa Rica fue posible identificar información al respecto.

Cuadro 15. Reportes de incidencia de broca (*H. hampei*) según revistas de institutos nacionales de café, investigaciones y tesis, para Costa Rica (CR), Honduras (HO), El Salvador (ES) y Guatemala (GU) en el periodo 1987 al 2017

Año	País	Año	País
1987		2003	
1988		2004	CR(ICAFE 2005)
1989	HO(PROMECAFE 1999)	2005	CR(ICAFE 2006)-ES(Cofre 2018)
1990	HO(PROMECAFE 1999)-EL(PROMECAFE 1999)- GU(Cofre 2018, PROMECAFE 1999)	2006	CR(ICAFE 2007)-ES(Cofre 2018)
1991	HO(PROMECAFE 1999)-EL(PROMECAFE 1999)- GU(Cofre 2018, PROMECAFE 1999)	2007	CR(ICAFE 2008)
1992	HO(PROMECAFE 1999)-EL(PROMECAFE 1999)- GU(Cofre 2018, PROMECAFE 1999)	2008	CR(ICAFE 2009)
1993	HO(PROMECAFE 1999)-EL(PROMECAFE 1999)- GU(Cofre 2018, PROMECAFE 1999)	2009	CR(ICAFE 2010)
1994	EL(PROMECAFE 1999)-GU(Cofre 2018, PROMECAFE 1999)	2010	CR(ICAFE 2011)-ES(Cofre 2018)
1995	EL(PROMECAFE 1999)-GU(Cofre 2018)	2011	CR(ICAFE 2012)-ES(Cofre 2018)
1996	EL(PROMECAFE 1999)-GU(Cofre 2018)	2012	CR(ICAFE 2013)
1997	EL(PROMECAFE 1999)-GU(Cofre 2018)	2013	CR(ICAFE 2014)
1998	EL(PROMECAFE 1999)-GU(Cofre 2018)	2014	CR(ICAFE 2015)
1999	EL(PROMECAFE 1999)-GU(Cofre 2018)	2015	CR(ICAFE 2016)
2000	GU(Cofre 2018)	2016	CR(ICAFE 2017)-GU(Cofre 2018)
2001	GU(Cofre 2018)	2017	CR(ICAFE 2017)-HO(IHCAFE 2018)-GU(Cofre 2018)
2002			

3.3.4 Reportes de incidencia en agrupaciones de broca

En el caso de las agrupaciones para la broca (*H. hampei*), las calificaciones asociadas a condiciones climáticas favorables para su desarrollo presentan varios estratos que varían según el grupo de años que lo conforman. Del Cuadro 14 se extrae el grupo 3 como el que obtiene la mejor nota total de 45.5 puntos. Este mismo grupo 3 registra la totalidad de los 23 años con datos en el 2008, así como 23 años en 2010 y 21 años en 2011. El año 2008 fue identificado en la revisión bibliográfica como un año con alta incidencia de broca en Costa Rica, mientras durante los años 2010 y 2011 la afectación fue reportada en Costa Rica y El Salvador. ICAFE identifica la cosecha del 2008 con afectación de broca en las zonas de Turrialba y Pérez Zeledón debido a condiciones climáticas favorables (ICAFE 2009). ICAFE identifica en la cosecha del 2010 un promedio ponderado de 3.19% del ataque en las zonas cafetaleras (ICAFE 2011). ICAFE identifica en la cosecha del 2011 un promedio ponderado de 2.37% del ataque en las zonas cafetaleras (ICAFE 2012).

El grupo 5 está conformado por los años 1996, 2005, 2006 y 2017, con una calificación de 38.5 puntos. De los cuales 1996 afectó a El Salvador y Guatemala, mientras 2005 y 2006 presento incidencia en Costa Rica y El Salvador, así como 2017 fue reportado en Costa Rica, Guatemala y Honduras.

El grupo 2 está constituido por los años 1997, 1999, 2000, 2003, 2004, 2009 2012 y 2014, con una calificación de 31.5 puntos. De los cuales 1997 y 1999 afectó a El Salvador y Guatemala, mientras el año 2000 solo afecta a Guatemala, así como durante 2004, 2009, 2012

y 2014 perjudicó la cosecha de Costa Rica y el año 2003 no fue afectado por broca en Centroamérica.

El grupo 1 contiene los años 1988, 1989, 1992, 1995, 1998, 2001, 2007, 2013 y 2015, con una calificación de 18.5 puntos. De los cuales 1989 afecto a Honduras, 1992 reporta incidencia en Honduras, El Salvador y Guatemala, mientras que en 1995 y 1998 reportan broca los países de El Salvador y Guatemala, así como 2001 solo afecto a Guatemala, en cambio 2007 y 2013 fueron identificados como años de broca en Costa Rica y 1988 no fue afectado por broca.

El grupo 4 se compone de los años 1990, 1991, 1993, 1994, 2002 y 2016, con una calificación de 16 puntos. De los cuales 1990, 1991 y 1993 fueron reportados como años de broca en Honduras, El Salvador y Guatemala. Mientras 1994 afectó a El Salvador y Guatemala, así como 2016 daño las cosechas de Guatemala y Costa Rica. El año 2002 no fue reportado con broca en ninguno de los cuatro países estudiados.

4. Discusión

Las condiciones climáticas favorables para el desarrollo del ojo de gallo pueden a su vez propiciar la ocurrencia de broca en un mismo sitio. Los dos países de Centroamérica afectados por la incidencia de ojo de gallo son Guatemala y Costa Rica. En la revisión bibliográfica Honduras y El Salvador no muestran reportes de ojo de gallo durante los 30 años de análisis. Entre los años 1987 y el 2017 el 71% de las veces que se reporta broca en Costa Rica también ocurre incidencia de ojo de gallo, mientras que el 48% de las veces que se reporta ojo de gallo en Guatemala además ocurre incidencia de broca.

Las categorías climáticas que fueron categorizadas como muy favorables para broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*), por separado, contienen cada una los años conocidos por haber tenido marcadas incidencias de la plaga y las enfermedades estudiadas. Durante el año 2012 se dio una epidemia centroamericana de roya que es probable que iniciara su desarrollo desde el año 2009, debido a que desde 2009 se tenían las condiciones propicias en cuanto a clima favorable, precio bajo del café y manejo deficiente (Avelino y Rivas 2015). En el año 2010 se percibió una epidemia de ojo de gallo en Centroamérica (Avelino et al. 2015) aunque no fue reportada por todos los institutos de café de la región. Para el año 2008 en algunas regiones cafetaleras de Costa Rica principalmente en Turrialba, se presentó incidencia anormalmente alta de broca (Granados 2015).

En las categorías climáticas de roya se identifican dos grupos con el mismo puntaje y por tanto ubicados en la misma categoría. Las condiciones meteorológicas parecieran haber sido buenas o muy buenas a nivel regional a partir de 1999, es decir, en 7 años de los últimos 19. El grupo con el puntaje más alto es el 6, considerado con condiciones muy favorables, seguido del grupo 3, considerado favorable; que se diferencian en el puntaje de dos variables. La calificación de la variable cantidad de días con lluvia superior a 5 mm en el periodo que abarca de setiembre a noviembre, es 3.5 puntos mayor en el grupo 6 y la duración del periodo entre diciembre y abril, es 1 puntos mayor en el grupo 3. Observando las calificaciones que obtuvieron estos grupos 6 y 3 se evidencia que no alcanzaron las calificaciones máximas que pudieron ser hasta de 28 puntos. Es posible, por tanto, que se dé una configuración climática aún más favorable que las observadas en los últimos 30 años, incluso una mucho más favorable que la presentada en el año 2012 cuando se presentó la mayor epidemia de roya (*Hemileia vastatrix*) en Centroamérica. El año 2009 es el otro integrante de la categoría climática muy favorable donde se reporta incidencia de roya solamente en Costa Rica con las mayores pérdidas productivas reportadas en las regiones del Valle Occidental y Valle Central. El ICAFE identifica entre los factores precursores en la pérdida de la producción en 2009 las condiciones de clima adversas asociadas a lluvias excesivas y mal manejo del cafetal, entre otros (ICAFE 2010). Todas las variables observadas en el grupo calificado como muy favorable tienen los

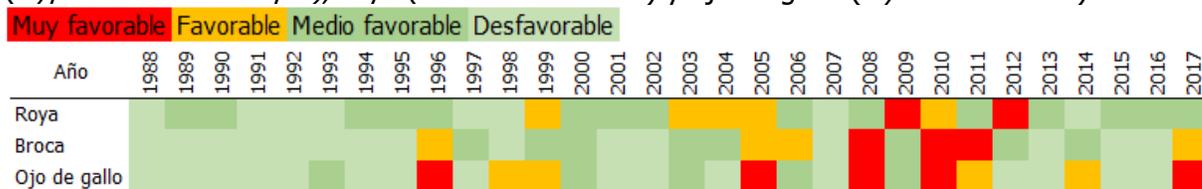
puntajes más altos y aunque no es excepcionalmente diferente no deja de ser poco frecuente, presentando un primer periodo seco (diciembre a abril) más corto, superado solo por el grupo favorable, así como la menor cantidad de días con lluvias superiores a 5 mm durante el último periodo lluvioso (setiembre a noviembre). Se obtiene la misma calificación para dos de los tres grupos de la categoría medio favorable, aunque estos dos años tienen diferentes calificaciones individuales para las variables analizadas, con lo que se identifica más de una configuración climática medio favorable para el desarrollo de la roya en Centroamérica.

En las categorías climáticas de ojo de gallo se señala un grupo muy favorable marcadamente diferente al resto, con 5 años muy buenos para el desarrollo del ajo de gallo a nivel regional desde el 1996. Los años calificados como muy favorables fueron excepcionales al compararlo con la calificación obtenida por los otros grupos de las variables climáticas analizadas. Comparando los años considerados muy favorables, se evidencia que aquellos muy favorables para el desarrollo de la roya no lo son para el ojo gallo.

En las categorías climáticas para broca se identifican dos grupos muy cercanos. Se registran riesgos meteorológicos regionales para broca en 7 de los últimos 22 años. De las 10 variables analizadas solo 6 muestran la nota máxima en el grupo muy favorable, en los últimos 30 años no se obtiene un grupo que contenga la calificación máxima de 50 puntos, por lo que podrían darse condiciones aún más favorables. Durante la revisión bibliográfica en busca de reportes de incidencia se identifica que los institutos de café de los países estudiados solamente reportan broca cuando se sale de lo normal, por lo que un reporte es importante.

El año 2005 fue favorable para roya, muy favorable para ojo gallo y favorable para la broca. El año 2010 fue un año favorable para roya y muy favorable para ojo de gallo y broca. A pesar de que las tipologías de ojo de gallo no comparten variables comunes ni periodo de análisis con roya, mientras que broca solo comparte una variable con roya y ojo de gallo comparte cuatro variables con broca. La variable común entre la roya y broca es la duración del primer periodo seco (diciembre a abril). Dos de esas variables comunes entre broca y ojo de gallo evalúan la cantidad de lluvia y días con lluvia del primer periodo lluvioso (mayo a junio) y las otras dos variables comunes son la amplitud térmica superior a 8°C durante el primer periodo lluvioso (mayo a junio) y el segundo periodo seco (julio a agosto). De estas cuatro variables comunes entre broca y ojo de gallo la que posee la calificación más influyente es la amplitud térmica superior a 8°C. Las condiciones climáticas durante los años 2005 y 2010 en algunos sitios fueron favorables para el desarrollo de roya, broca y ojo de gallo, por lo que no se considera que pueden ocurrir en las mismas zonas durante el mismo año.

Cuadro 16. Categorías de favorecimiento climático por año para el desarrollo de broca (*Hypothenemus hampei*), roya (*Hemileia vastatrix*) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*)



Se visualiza en la Cuadro 16 que antes de 1995 las condiciones meteorológicas fueron desfavorables para el desarrollo de las enfermedades y la plaga. Entre los años 2003 y 2012 se tuvo casi una década con condiciones favorables para problemas fitosanitarios varios. Después del 2012 se evidencian condiciones climáticas menos favorables, esto coincide en el caso de ojo de gallo con la información bibliográfica consultada y con broca a partir del 2004, mientras para roya desde el 2009. Las plagas nos señalan un cambio en las condiciones climáticas debido a la variabilidad, al identificarse condiciones muy favorables principalmente entre 2008 y 2012 que llevan a considerar que la plaga y las enfermedades son marcadores

de la variabilidad del clima. Se dio una evolución climática posiblemente asociada a variabilidad que fue cambiando rápidamente de favorecer una plaga a otra, en la última década.

En el análisis se combinan geográficamente las estaciones antes de definir qué tan favorables resultan los grupos, ya que la finalidad era identificar los años favorables a nivel regional, pero esto puede incluir ruido en el estudio. Dentro de estos años favorables para el desarrollo de enfermedades y la plaga puede haber lugares en los que no se dio la plaga. Existen condiciones a nivel de finca como variaciones de sombra inter-cafetal, elevación de la finca, microclima de la subregión y riego; que pueden influir en las condiciones climáticas de la finca y propiciar o no un evento de broca, roya u ojo de gallo. Como ocurrió en el año 2015, en el que Avelino (2015) reporta que no se dieron problemas por roya en 2012 en aquellas elevaciones por arriba de 1400 m s.n.m. Como ocurre con el ojo de gallo que tiene un umbral óptimo altitudinal de entre 1100 y 1500 m s.n.m., mientras por debajo de esto no se percibe tanto (Avelino et al. 2007). Mientras la broca se desarrolla mejor por debajo de los 1200 m s.n.m. que por encima de los 1600 m s.n.m. (Constantino et al. 2010).

Cabe recordar que la expresión de una enfermedad o plaga no depende del clima nada más, sino también del manejo y de la naturaleza del hospedero (Avelino 2007; 2015). Aún con condiciones meteorológicas adecuadas puede que no se exprese la enfermedad o plaga si el manejo es adecuado, lo que está ligado a la rentabilidad económica del cultivo. En aquellas cosechas en que se tienen precios bajos del café, los productores pierden el interés en el cultivo y como consecuencia se tiene el abandono de la actividad, eliminación y descuido de los cafetales (MAG 2008).

La información de la literatura gris o de entrevistas es extremadamente imprecisa y esto también puede explicar que no haya coincidencia clara entre los reportes de incidencia y las tipologías. Las entrevistas a expertos de los Institutos de café de Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica no aportaron datos de años anormalmente fuertes en incidencia, pero fueron útiles en cuanto a la identificación de fuentes a consultar.

5. Conclusiones

La incidencia e incluso la ocurrencia de una epidemia requiere un conjunto de condiciones que van allá del clima. Un cafetal con poco manejo inter-finca puede generar una mala cosecha durante un año con condiciones propicias para la ocurrencia de plagas y enfermedades. Mientras que un cafetal con la inversión necesaria para la cosecha puede generar una producción normal durante un año con condiciones climáticas aptas para el desarrollo de broca, roya u ojo de gallo.

Cada país tiene condiciones propias de finca que influyen en la incidencia de plagas y enfermedades, entre ellas, el clima local que generan microclimas debido a las elevaciones de siembra y condiciones atmosféricas, además de las variedades de café implantadas en cafetales y manejo de finca. Costa Rica y Guatemala son los únicos países de la región con reportes de ojo de gallo. Según la revisión bibliográfica Costa Rica es quien registra más años con afectación por roya, Guatemala es el país con mayor cantidad de años con ojo de gallo, mientras que El Salvador y Honduras reportan la misma cantidad de años con reportes de broca. En Costa Rica se tienen 16 años reportados con roya, 14 años con afectación por broca y 10 años con incidencia de ojo de gallo. Guatemala reporta 6 años con roya, 29 años con afectación por ojo de gallo y 14 años con incidencia de broca. En El Salvador se reportan 14 años con broca y 8 años con afectación por roya. Honduras reporta 6 años con broca y 12 años con incidencia de roya.

Se construyeron categorías climáticas que permiten definir años más o menos favorables para roya, broca y ojo de gallo basado en el conocimiento experto y de la literatura sobre los factores meteorológicos que afectan esas plagas. Estas categorías climáticas teóricas señalan

un periodo de 2008 a 2012 que ha sido extremadamente favorable para las plagas y enfermedades en café. Hay cierta coherencia entre las categorías y lo reportado en la literatura, aunque no perfecta ya que las enfermedades no dependen únicamente del clima, y tampoco es muy fidedigna la memoria de los productores, y los informes de los institutos de café que no reportan completamente la incidencia de la plaga y las enfermedades.

Las condiciones representadas en esas categorías pueden utilizarse para pronosticar los años meteorológicamente favorables a la roya, broca y ojo de gallo, particularmente si se logran relacionar con valores de indicadores oceánicos y/o atmosféricos como el ENOS en la región 3.4, el CLLJ y la AMO; por su influencia en el clima de la región centroamericana.

Se identifican diferentes años con diferente rango de favorecimiento por enfermedad y plaga. Entre el año 2013 y hasta el 2012 existe un patrón de años especialmente favorables para desarrollo de broca, roya y ojo de gallo debido a la variabilidad climática de Centroamérica en esos años. Los escenarios climáticos de esos años particularmente favorables o no para la incidencia de roya, broca y ojo de gallo podrían ser construidos con oscilaciones océano-atmosféricas que ayuden a identificar los patrones climáticos de las tipologías.

6. Recomendaciones

En un siguiente paso a esta investigación se considera prudente verificar las agrupaciones aquí definidas mediante un análisis con datos de incidencia en campo para broca, roya y ojo de gallo de las que disponen los institutos de café de las cuales no se dispuso durante el desarrollo de esta investigación.

Se requiere una mejora de la cobertura de estaciones meteorológicas en zonas cafetaleras.

7. Referencias bibliográficas

- Alfaro, E. 2002. Some Characteristics of the Annual Precipitation Cycle in Central America and their Relationships with its Surrounding Tropical Oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9(2): 88-103.
- ANACAFE. 2015. Revista el Cafetal. ANACAFE. (2015) 42. 24 p.
- ANACAFE. 2016. Guía de variedades de café. Guatemala. 50 p.
- ANACAFE. 2016a. Memoria de labores 2017 y 2018. 138 p.
- Araya, J y Alfaro, E. 2008. Prueba e implementación de algoritmos de control de calidad de datos de temperatura superficial del aire en un contexto operativo. *Tecnología en Marcha*. 21(3): 47-61.
- Araya, J. y E. Alfaro. 2009. Algoritmos de Control de Calidad para Detección de Secuencias Atípicas de Contactos en Pluviómetros de Balancín. *Tecnología en Marcha*. 22(2): 63-78.
- Avelino, J; Cabut, S; Barboza, B; Barquero, M; Alfaro, R; Esquivel, C; Durand, J; Cilas, C. 2007. Topography and Crop Management Are Key Factors for the Development of American Leaf Spot Epidemics on Coffee in Costa Rica. *Ecology and Epidemiology*. 97:1532-1542.
- Avelino, J.; Rivas, G. 2015. La roya anaranjada del cafeto <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>, 47 p.

- Avelino, J; Cristancho, M; Georgiou, S; Imbach, P; Aguilar, L; Bornemann, G; Läderach, P; Anzueto, F; Hruska, AJ. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008 – 2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. Springer. 7: 303-321.
- Bombardi, R.; Kinter, J. y Frauenfeld, O. 2019. A Global Gridded Dataset of the Characteristics of the Rainy and Dry Seasons. Bull. Amer. Meteor. Soc. 32 p.
- Chaves, O-C. 1996. Características biológicas del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en el cultivo del café en Costa Rica y su control. Hojas Divulgativas. Sandoz Agro S.A. San José, Costa Rica. 4 p.
- Coen, E. 1973. El Folklore Costarricense relativo al Clima. Revista de la Universidad de Costa Rica. (35):135-145.
- Cofré Venegas, HF. 2018. Análisis retrospectivo de los factores ambientales y socioeconómicos influyentes en la manifestación de plagas/enfermedades del café, entre 1987 y 2017, en la vertiente pacífica de Centroamérica. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 107 p.
- Constantino, L; Gil. 2010. La broca del café, un insecto que se desarrolla de acuerdo con la temperatura y la altitud. Brocarta, Cenicafé. 39(1) 2p. Disponible: https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/brocartas/publicaciones_brocarta_039_la_broca_del_cafe...un_insecto_que_se_desarrol
- Constantino, L; Gil, Z; Jaramillo, A; Benavides, P; Bustillo, A. 2011. Efecto del cambio y la variación climática en la dinámica de infestación de la broca del café, *Hypothenemus hampei* en la zona central cafetalera de Colombia. Simposio de Variabilidad Climática. Libro de Memorias 38. Congreso Sociedad Colombiana de Entomología. 106-121 p.
- CSC. 2016. Consejo Salvadoreño de café. Disponible: <http://www.csc.gob.sv/historia/>
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., González L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2019. Centro de Transferencia InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- FEWS NET. 2016. El impacto de la roya de café en el sector cafetalero de América Central. América Central, Informe especial. 12 p.
- FIC. 2005. Descripción de la metodología FICLIMA (en línea). España, Madrid. Consultado 15 de mayo 2018. Disponible: https://www.ficlimate.org/metodologia_downscaling_estadistica_FICLIMA.pdf
- Ghini, R; Hamada, E; Pedro Júnior, J; Gonçalves, R. 2011. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. Summa Phytopathologica. 37(2): 85-93p.
- Granados, M. (2015). Estudio de la epidemiología y alternativas de manejo agroecológico del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en café bajo Sistemas agroforestales en Costa Rica. Tesis Doctoral. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 257 p.

- Guharay, F.; Monterrey, J.; Monterroso, D.; Staver, Ch. 2000. Manejo integrado de plagas en el cultivo del café. Managua, Nicaragua, CATIE. 265 p. (Serie Técnica. Manual Técnico N°44).
- Hernández, KM; Fernández, W. 2015. Estudio de la evaporación para el cálculo del inicio y conclusión de la época seca y lluviosa en Costa Rica. Tópicos meteorológicos y oceanográficos. 1: 18-26.
- ICAFFE. 2005. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 85 p.
- ICAFFE. 2006. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 73 p.
- ICAFFE. 2007. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 78 p.
- ICAFFE. 2008. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 81 p.
- ICAFFE. 2009. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 96 p.
- ICAFFE. 2010. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 103 p.
- ICAFFE. 2011. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 99 p.
- ICAFFE. 2012. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 99 p.
- ICAFFE. 2013. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 105 p.
- ICAFFE. 2014. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 101 p.
- ICAFFE. 2015. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 109 p.
- ICAFFE. 2016. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 110 p.
- ICAFFE. 2017. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 107 p.
- ICAFFE. 2018. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Congreso cafetalero ordinario. ICAFFE. 103 p.

- IHCAFE. 2017. Memoria cosecha 2015 y 2016. IHCAFE. 52 p. Disponible: https://issuu.com/cesarmaradiaga2/docs/revista_ihcafe_en_mac_final_02
- IHCAFE. 2016. Memoria cosecha 2016 y 2017. IHCAFE. 52 p. Disponible: <https://www.ihcafe.hn/publicaciones/>
- IMN; GEF; CRRH; PNUD. 2008. Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. CRRH ed. San José, Costa Rica, s.e. 75 p.
- INSIVUMEH. 2017. Normas Climáticas. Disponible en: http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=1004
- IPCC. 2007. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambio climático: Base de ciencia física. Contribución del grupo de trabajo I al cuarto informe de evaluación del IPCC. Cambridge University Press. Cambridge Reino Unido y Nueva York, EE. UU. 139 p.
- La Prensa Gráfica. 2013. OIC: la roya afecta 74 % de café en ES. (en línea). Consultado el 08 de agosto del 2019. Disponible en <http://www.laprensagrafica.com/oic--la-roya-afecta-74--de-cafe-en-es>
- MAG. 2008. Agro cadena de café. Ministerio de Agricultura y ganadería. Costa Rica. 49 p.
- McCook, S. 2009. La Roya del café en Costa Rica: Epidemias, innovación y medio ambiente, 1950-1995. Revista Historia. (59)60: 99-117.
- OIC. 2014. La Organización Internacional del Café de 1963 a 2013: 50 años sirviendo a la comunidad cafetera mundial. Organización Internacional del Café. Londres, Reino Unido. 46 p.
- PROMECAFE. 1999. Compendio de resultados de la acción de PROMECAFE: 1993-1998. Tegucigalpa, Honduras. 113 p.
- PROMECAFE. 2008. Boletín No 114. PROMECAFE 30 años al servicio de la caficultura regional. PROMECAFE. 16 p.
- PROMECAFE. 2013. Programa integrado de combate a la roya del café y recuperación de la capacidad productiva en la región centroamericana y el Caribe. Informe de Proyecto PROMECAFE-IICA. 26 p.
- PROMECAFE. 2018. Boletín No. 155 abril-junio 2018. Informe de Proyecto PROMECAFE-IICA. 24 p.
- UNAH. 2012. Atlas climático y de gestión de riesgo de Honduras. Tegucigalpa, Honduras. 161 p. Consultado 21 septiembre 2018. Disponible en: <https://ihcit.unah.edu.hn/productos/atlas-climatico/>
- Ureña, P; E. Alfaro; J. Soley. 2016. Propuestas metodológicas para el rellenado de datos ausentes en series de tiempo geofísicas. Guía Práctica de uso. Documento Técnico. Centro de Investigaciones Geofísicas, Escuela de Física y Centro de Investigaciones en Ciencias

del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Consultado 21 septiembre 2018. Disponible en: <http://kerwa.ucr.ac.cr/>, <http://kimuk.conare.ac.cr/>

Villarreyra, R; Cerda, R; Avelino, J. 2016. Efecto de la sombra sobre las plagas y enfermedades, a través del microclima, fenología y estado fenológico del cafeto. Informe Proyecto Cascada. CATIE. 34 p.

Wang, A; Avelino, J. 1999. El ojo de gallo del cafeto (*Mycena citricolor*). In Benoit Bertrand, Bruno Rapidel (ed.). Desafíos de la caficultura en Centroamérica. Francia, s.e. p. 243-260.

8. Anexos

Entrevista

El formato de entrevista utilizado para encuestar a los expertos en la caficultura de Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica se observa en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Formato de entrevista

Tesista MAAS-CATIE: Karina Hernández Espinoza
Formación: Lic. Meteorología

Durante el desarrollo de esta investigación se planea buscar escenarios climáticos entre aquellos años que tienen como factor común la ocurrencia de una plaga o enfermedad del café. Se trabajará en una ventana de tiempo de los últimos 30 años. Se utilizarán registros de eventos fuerte de la plaga broca, así como las enfermedades roya y ojo de gallo. En los países de Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica.



Entrevista dirigida a: Técnicos expertos en la caficultura de Centroamérica.

Objetivo: Recopilar información sobre la incidencia de broca, roya y ojo de gallo en Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica en los últimos 30 años (1987-2017).

Preguntas:

- Datos personales:

Nombre	
Cargo	
Institución	
País	
- ¿Cómo priorizan la plaga y enfermedades en su país? Donde, 1: primero en importancia, 2: segundo en importancia y 3: tercero en importancia.

Patógeno	Importancia
Broca	
Roya	
Ojo de gallo	
- ¿Qué Regiones Políticas y/o Climáticas de su país tienen hoy día más incidencia de la plaga y enfermedades?

Patógeno	Región Política	Región Climática
Broca		
Roya		
Ojo de gallo		
- ¿En esa zona que menciona, recuerda años con mucha ocurrencia de la plaga y enfermedades?

Patógeno	Región Política	Región Climática	Años
Broca			
Roya			
Ojo de gallo			
- ¿En los últimos 30 años (1987-2017), hubo años en particular en los que recuerde alta incidencia de la plaga y enfermedades en su país?
¿En cuál Región Política y/o Climática de su país?

Patógeno	Región Política	Región Climática	Años
Broca			
Roya			
Ojo de gallo			
- ¿Por qué considera que ocurrieron ataques de la plaga y enfermedades en los años que indica?

Patógeno	Año	Razón
Broca		
Roya		
Ojo de gallo		
- ¿Qué fuentes de información puedo consultar?

Publicación	Institución	Contacto
- ¿Qué otro ente gubernamental o privado puede tener esta información?

Documento	Institución	Contacto

Agradezco su apoyo en el desarrollo de mi investigación.

Artículo III. Escenarios climáticos para la ocurrencia de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) en Centroamérica

Resumen

Se identifica el efecto significativo que los factores océano-atmosféricos ejercen sobre las categorías climáticas para cuatro periodos al año y cada una de las enfermedades y la plaga. Las categorías climáticas surgen de las similitudes entre variables climáticas que favorecieron el desarrollo de la plaga y las enfermedades en los últimos 30 años en Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica. Se utilizan los factores oceánico-atmosféricos estandarizados: AMO, Niño3.4 y CLLJ, así como sus interacciones. Las tres categorías de cada uno de los factores océano-atmosféricos se generan calculando terciles para cada periodo del año. El Niño3.4 no muestra diferencias significativas entre las categorías climáticas por tanto se considera sin influencia en el desarrollo de la roya en Centroamérica. Las diferencias significativas de los factores océano atmosféricos entre las categorías climáticas de broca son pocas. El ojo de gallo no muestra diferencias entre las categorías climáticas para el caso de AMO.

Se generan cuatro categorías climáticas a partir de las categorías climáticas definidas en el Artículo II para cada enfermedad y la plaga. Las categorías "Desfavorable" muestran mayormente medias muy bajas a diferencia de las medias altas que presenta la categoría "Favorable". La categoría intermedia es la "Medio favorable". Existen configuraciones particulares para las categorías "Muy favorable" en las dos enfermedades y la plaga.

Los escenarios climáticos surgen de las categorías climáticas "Muy favorable", estas son caracterizados según las categorías de los factores océano atmosféricos individualmente para broca (*Hypothenemus hampei*), roya (*Hemileia vastatrix*) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*). Se obtienen dos escenarios de clima para el desarrollo de una epidemia de roya, cinco escenarios climáticos que propician una epidemia de ojo de gallo y para broca se identifican tres escenarios con condiciones climáticas muy favorables para que ocurra una epidemia.

Palabras clave:

Clima, oscilación océano atmosférica, tipología y alerta temprana.

Abstract

Significant effect between ocean-atmospheric factors and climate categories in four seasons or year for every disease and the plague are found. Climate categories come up from the climate variables that help to develop the plague and diseases in the last 30 years in Guatemala, Honduras, El Salvador and Costa Rica. Standardized ocean-atmospheric factors are Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), El Niño Southern Oscillation (ENOS in Spanish) in Niño3.4 region, Climate Low Level Jet (CLLJ) and his interactions. Categories of factors are estimate with terciles for each season of year. Niño3-4 did not show significant difference in climate categories and for it is considered without influence in develop of coffee rust. Berry borer plague have few significant differences for factors in climate categories. American leaf spot did not show differences in AMO factor for climate categories.

Four climate categories were created in base of climate categories from article II for each disease and the plague. "Very favorable" scenario show many low means unlike the high means in "Favorable" scenario. "Very favorable" categories have particular configurations.

Scenarios were result of climate categories "Very favorable", this category was categorized in base of ocean-atmospheric factors categories separately for berry borer plague (*Hypothenemus hampei*), coffee rust (*Hemileia vastatrix*) and American leaf spot (*Mycena*

citricolor). Two scenarios are described for coffee rust, five for American leaf spot and three for berry borer plague with very favorable conditions to develop of an epidemic event.

Keywords:

Climate, oceanic atmospheric oscillation, typology and early warning.

1. Introducción

Existen factores océano-atmosféricos que modulan el clima. A nivel centroamericano se reconocen la influencia de El Niño 3.4, AMO, CLLJ y sus interacciones. Estos factores influyen en el clima centroamericano en diferentes épocas del año y zonas geográficas. Los tres factores mantienen pronósticos de mediano plazo lo que los hace útiles para sistemas de alerta temprana.

EL factor ENOS está conformado por una componente oceánica denominada la corriente El Niño costero y las condiciones atmosféricas sobre el Pacífico ecuatorial. Es cuando se da el acople océano atmosférico que se decreta su existencia. La fase cálida del ENOS, El Niño, es originado por el calentamiento anormal de las aguas del Pacífico Ecuatorial unido a la disminución del índice de la Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés). La fase fría del ENOS, La Niña, es originada por el enfriamiento anormal de las aguas del Pacífico ecuatorial unido al aumento de SOI (Reynolds 1988). El ENOS es conocido por ser la principal fuente de variabilidad climática interanual del Trópico. El Niño 3.4 es un indicador de las condiciones de El Niño en su región central del Pacífico Tropical. Se calcula con las anomalías de la temperatura superficial del Océano Pacífico en el área 170°W - 120°W, 5°S - 5°N y es una de las regiones de monitoreo del ENOS (Reynolds 1988).

Los efectos del ENOS varían según la fase de la cuál hablemos, siendo este el factor más estudiado. El Niño genera condiciones secas y calurosas en la región centroamericana (GWP 2014). La sequía se produce por la barrera que genera el reforzamiento del viento alisio en los vientos suroeste. La sequía en Centroamérica del año 2014, fue causada principalmente por El Niño, induciendo lluvias por debajo del promedio durante la época lluviosa y temperaturas superiores al promedio en la época seca de la región centroamericana (GWP 2014). La Niña genera condiciones lluviosas en la región centroamericana. En las regiones climáticas del Pacífico y el Caribe genera aumento de precipitación. La Niña es uno de los factores que deben ser monitoreados como parte de los sistemas de alerta temprana, por su gran influencia en la cantidad de precipitación percibida en la región (CATHALAC 2018).

El índice AMO tiene influencia en los patrones lluviosos de Centroamérica. AMO es una señal de la anomalía de temperatura superficial del Océano Atlántico Norte tras eliminarse cualquier tendencia lineal, monitoreada entre 0°N - 80°N. AMO en complemento con el índice normalizado PDO-Niño3, es considerado el mejor predictor de la intensidad del veranillo, los máximos de precipitación en el periodo de agosto a octubre y finalización de la época lluviosa (Fallas-López y Alfaro 2012). PDO es la oscilación decadal del Pacífico que forma parte de los forzantes de la variabilidad climática en la Vertiente Pacífica. Niño3 es el índice de la anomalía de temperatura superficial del Mar de la sección de El Niño en el Pacífico Tropical Este.

El factor atmosférico CLLJ es considerado el mayor modulador del clima en Centroamérica. CLLJ es una rápida corriente de viento con dirección este-oeste que se ubica sobre el Mar Caribe, se localiza aproximadamente en 15°N y 75°O. CLLJ mantiene un ciclo anual con dos máximos cerca de 925hPa, uno en julio y otro en enero-febrero (Amador 2008).

Las plagas y enfermedades que atacan al café se ven afectadas o beneficiadas por las variaciones del clima. La región centroamericana posee microclimas propios de la interacción entre factores atmosféricos, oceánicos y la topografía caracterizada por gradientes altitudinales en distancias cortas. Esto implica que los factores océano atmosféricos pueden influir en el

microclima de cada cafetal según sus condiciones particulares de elevación y sombra, entre otros.

ENOS es el factor climático que el sector cafetalero más asocia con los efectos adversos del clima en la producción cafetalera. Jaramillo y Arcila (2009) mencionan que durante un evento El Niño las precipitaciones pueden disminuir hasta un 20% afectando la cosecha de café principalmente por déficit hídrico en el suelo. ICAFE (2014a) indica que ante un evento El Niño, se considera probable el incremento de la broca en el cafetal debido al aumento de las temperaturas que acorta el ciclo biológico de la broca del café y el aumento de la radiación y menor humedad relativa que reduce el efecto de su controlador biológico, la *Beauveria bassiana*. ICAFE (2014b) considera al ENOS como un factor influyente en el desarrollo de la roya debido a la variación que provoca en el patrón de lluvias, por lo que recomienda asegurar la nutrición de los cafetos durante la época usual de lluvias cuando se oficializa la presencia de un evento El Niño, para fortalecer las plantas ante un posible ataque roya.

La variabilidad climática es considerada por el sector cafetalero como un precursor del desarrollo de plagas y enfermedades. La afectación del ojo de gallo en Costa Rica está relacionada con variaciones en el patrón de lluvias. Una reducción de las lluvias implica defoliación del cafeto por estrés lo cual conlleva a una disminución de la epidemia debido a la reducción del inoculo en la primera época seca y durante el veranillo. Mientras más lluvioso sea el veranillo, más intensa será la epidemia (Avelino et al. 2007). Bajo condiciones climáticas favorables para el desarrollo del ojo de gallo, pueden generarse pérdidas de hasta 60% de la producción en la cosecha actual y una reducción del 100% en el potencial productivo del cafeto en la próxima cosecha (ICAFE 2012). La variabilidad climática puede favorecer o afectar el desarrollo de la broca. Colombia durante el monitoreo del porcentaje de infestación de broca en El Niño del 2009-2010, La Niña del 2008 y la fase Neutra del 2007; identificó el efecto del ENOS en la broca. Declarando que durante un evento El Niño la incidencia de broca es mayor que durante un evento La Niña (Constantino et al. 2011).

El Cambio Climático promueve la migración de especies. Las proyecciones de Cambio Climático indican una variación en los patrones de lluvia, así como aumento en la temperatura mundial. ENOS en los próximos años, según predicciones de Cambio Climático, presentará un aumento en su frecuencia e intensidad, lo que conlleva a la consolidación océano atmosférica de fenómenos que podrían generar inundaciones en algunas zonas y sequías en otras. Muchas especies podrían verse en la necesidad de adaptarse a nuevos territorios que hoy día cuentan con climas no aptos para su desarrollo y colonización (IPCC 2007). Avelino y Rivas (2015) mencionan que el efecto principal del Cambio Climático sobre la roya podría ser la reducción de su periodo de latencia, el cuál mientras más corto sea mayor será la epidemia. Avelino et al. (2007) evidencian los efectos que variaciones micro climáticas debidas a la ubicación del cultivo afectan el desarrollo del ojo de gallo en Costa Rica. Jaramillo et al. (2011) indican que cambios en el clima prometen generar efectos sobre la dinámica poblacional en las epizootias agrícolas, debido a que afectan el desarrollo, reproducción y sobrevivencia del insecto broca.

Además de la información reportada anteriormente en la literatura existe en el Artículo II de esta investigación un análisis que permite diferenciar climáticamente la influencia del clima de los últimos 30 años sobre el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo del café. Se evidencia que existen años con condiciones favorables para el desarrollo de broca y a su vez son favorables para el desarrollo del ojo de gallo. Antes de 1995 las condiciones climáticas no fueron favorables, mientras que desde el año 2003 hasta el año 2012 las condiciones climáticas fueron favorables para problemas fitosanitarios asociados a broca, roya y ojo de gallo. Desde el 2012 al 2017 se identifican condiciones climáticas menos favorables para broca, roya y ojo de gallo. La última década muestra condiciones climáticas asociadas a la variabilidad climática que fueron cambiando rápidamente el favorecimiento de una enfermedad o plaga a otra.

Existe monitoreo constante y pronósticos de los factores océano-atmosféricos ENOS, AMO y CLLJ, así como conocimiento su efecto en el clima de la región centroamericana. Se definieron en el Artículo II una serie de tipologías climáticas para el desarrollo de enfermedades y plaga en Centroamérica. Es posible por tanto evidenciar las asociaciones entre las tipologías climáticas definidas en el Artículo II y los factores océano atmosféricos. Estas asociaciones permiten identificar escenarios de clima que generen condiciones muy favorables para el desarrollo broca (*Hypothenemus hampei*), roya (*Hemileia vastatrix*) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*). del café.

2. Materiales y métodos

Se listan en la Figura 23 los métodos utilizados en el desarrollo de la investigación que se detallan en esta sección.



Figura 23. Diagrama del proceso metodológico aplicado en la identificación de escenarios climáticos para broca, roya y ojo de gallo en Centroamérica, utilizando los factores océano atmosféricos ENOS, AMO y CLLJ, así como las categorías climáticas del Artículo II

2.1 Categorías de factores océano-atmosféricos

Los datos de los indicadores utilizados se ajustan temporalmente. Los datos de AMO, Niño3.4 y CLLJ se encuentran disponibles en resolución temporal mensual. Se promedian los tres indicadores en cuatro periodos al año: periodo 1 (P1) del 1 de diciembre al 30 de abril, periodo 2 (P2) del 1 de mayo al 30 de junio, periodo 3 (P3) del 1 de julio al 31 de agosto y periodo 4 (P4) del 1 de septiembre al 30 de noviembre. Estos promedios se generan para que los factores sean comparables con Los grupos climáticos generados en el Artículo II de esta investigación. Se estandarizan los valores de los factores para cada uno de los cuatro periodos para facilitar la comparación entre factores.

En el caso de El Niño3.4 se utilizan anomalías de la temperatura superficial del océano Pacífico en el área 170°W - 120°W, 5°S - 5°N generados por IRI (International Research Institute for Climate and Society) (Kaplan et al. 1998), disponibles en el sitio web: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Indices/.nino/.EXTENDED/.NINO34/T+exch+table+text+text+skipanyNaN+-table+.html>

Los rangos de El Niño3.4 (alto, medio y bajo) para cada uno de los cuatro periodos fueron generados utilizando los datos de El Niño3.4 desde 1988 al 2017 y la estimación de los percentiles 33 y 67 por periodo que se muestran en el Cuadro 18. Tal como indica el Cuadro 19, si el valor del periodo se encuentra entre el valor mínimo y el percentil 33 se categoriza como "Bajo" considerado un Niño3.4 más frío de lo normal, si el valor del periodo se encuentra entre el percentil 33 y el percentil 67 se categoriza como "Medio" representando las condiciones normales y si el valor del periodo se encuentra entre el percentil 67 y el valor máximo se categoriza como "Alto" que implica un Niño3.4 más cálido de lo normal.

Los datos utilizados en este análisis de AMO son generados por Physical Sciences Division del ESRL (Earth System Research Laboratory) de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (Enfield et al. 2001), consultables en el sitio web: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>

Se generan rangos de AMO (alto, medio y bajo) para cada uno de los cuatro periodos usando los datos de la oscilación AMO desde 1988 al 2017. El Cuadro 18 contiene los percentiles 33 y 67 por periodo para el caso de AMO. Tal como muestra el Cuadro 19 si el valor para el periodo se encuentra entre el valor mínimo y el percentil 33, inclusive, se categoriza como "Bajo" que implica un AMO más frío de lo normal, si el valor del periodo se encuentra entre el percentil 33 y el percentil 67, inclusive, se categoriza como "Medio" que denota un AMO normal y si el valor del periodo se encuentra entre el percentil 67 y el valor máximo se categoriza como "Alto" que evidencia un AMO más cálido de lo normal.

Los datos de la cortante vertical del viento para el análisis del CLLJ en la grilla 12.5-17.5°N y 75-80°O (Amador et al. 2010) pueden ser descargados del sitio web de NCEP/NCAR: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html>. Estos datos son generados por el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) (Kalnay et al. 1996).

Para CLLJ (alto, medio y bajo) se generan rangos de cada uno de los cuatro periodos utilizando los datos de la componente del viento zonal para calcular la cortante del viento, desde 1988 al 2017 y la estimación de los percentiles 33 y 67 por periodo que se presenta en el Cuadro 18. Como muestra el Cuadro 19, si el valor del periodo se encuentra entre el valor mínimo y el percentil 33, inclusive, se categoriza como "Bajo" que se considera un CLLJ más acelerado de lo normal, si el valor del periodo se encuentra entre el percentil 33 y el percentil 67, inclusive, se categoriza como "Medio" que representa un CLLJ con velocidad normal y si el valor del periodo se encuentra entre el percentil 67 y el valor máximo se categoriza como "Alto" que denota un CLLJ menos acelerado de lo normal.

Cuadro 18. Percentiles de los factores océano atmosféricos a nivel de periodos P1 del 1 de diciembre al 30 de abril, P2 del 1 de mayo al 30 de junio, P3 del 1 de julio al 31 de agosto y P4 del 1 de septiembre al 30 de noviembre

Variable	Periodo	Mínimo	Percentil 33	Percentil 67	Máximo	Variable	Periodo	Mínimo	Percentil 33	Percentil 67	Máximo
AMO	P1	-0.240	-0.040	0.100	0.260	AMO	P3	-0.300	0.090	0.280	0.500
NIÑO3-4	P1	-1.240	-0.140	0.400	1.510	NIÑO3-4	P3	-1.310	-0.170	0.500	2.000
CLLJ	P1	-11.160	-10.470	-9.610	-8.480	CLLJ	P3	-13.180	-11.990	-10.050	-7.740
DME_AMO-N34	P1	-3.010	-0.660	0.470	1.780	DME_AMO-N34	P3	-2.520	-0.340	0.990	3.540
DME_AMO-CLLJ	P1	-2.150	-0.540	0.390	0.780	DME_AMO-CLLJ	P3	-0.700	0.430	1.720	3.000
DME_CLLJ-N34	P1	-1.940	-0.430	0.380	1.590	DME_CLLJ-N34	P3	-3.940	-1.480	0.060	2.200
DME_AMO-N34+CLLJ	P1	-2.840	-0.420	0.150	1.430	DME_AMO-N34+CLLJ	P3	-4.270	-0.560	0.460	3.810
AMO	P2	-0.210	0.030	0.170	0.460	AMO	P4	-0.330	0.050	0.240	0.410
NIÑO3-4	P2	-1.030	0.060	0.600	1.410	NIÑO3-4	P4	-1.470	-0.300	0.610	2.560
CLLJ	P2	-13.670	-10.960	-10.040	-7.360	CLLJ	P4	-9.460	-7.970	-6.700	-3.710
DME_AMO-N34	P2	-2.770	-0.900	0.640	2.320	DME_AMO-N34	P4	-2.990	-0.590	0.920	3.140
DME_AMO-CLLJ	P2	-1.750	-0.080	0.990	2.410	DME_AMO-CLLJ	P4	-3.290	-2.110	-0.180	0.620
DME_CLLJ-N34	P2	-3.630	-1.050	-0.040	2.620	DME_CLLJ-N34	P4	-2.840	0.670	2.250	4.590
DME_AMO-N34+CLLJ	P2	-3.960	-0.820	0.150	2.560	DME_AMO-N34+CLLJ	P4	-2.16	1.33	2.83	5.77

Se generan tres variables nuevas mediante la diferencia de medias estandarizada (DME) de los factores por periodo, para generar un indicador de interacción entre dichos factores. Las nuevas variables son: la diferencia de medias estandarizada entre la AMO y Niño3.4 (DME_AMO-N34), la diferencia de medias estandarizada entre la AMO y el CLLJ (DME_AMO-CLLJ), así como la diferencia de medias estandarizada entre el CLLJ y Niño3.4 (DME_CLLJ-N34), además de la diferencia de medias estandarizada entre la AMO y el Niño3.4 más el CLLJ (DME_AMO-N34+CLLJ). Una metodología similar fue utilizada por Fallas y Alfaro (2012) en su análisis de herramientas predictivas estacionales para la precipitación en América Central, utilizando otros factores climáticos.

Cuadro 19. Rangos utilizados en la generación de las tres categorías océano-atmosféricas utilizadas

Categoría	Rango
Bajo	Min ≤ dato ≤ P33
Medio	P33 < dato ≤ P67
Alto	P67 < dato ≤ Max

2.2 Análisis estadístico

Se identifican, en el Artículo II de esta investigación, categorías climáticas de favorecimiento para broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) del café en Guatemala, Honduras, El Salvador y Costa Rica. Los grupos climáticos obtenidos se organizan en cuatro categorías según su nivel de favorecimiento sobre cada plaga o enfermedad: muy favorable, favorable, medio favorable y desfavorable. Este análisis permitió asignar cada uno de los últimos 30 años en alguna de las categorías climáticas.

Se identifican las relaciones estadísticamente significativas entre las categorías climáticas y los seis factores océano-atmosféricos ENOS, AMO, CLLJ, DME_AMO-N34, DME_AMO-CLLJ y DME_CLLJ-N34; para cada enfermedad y la plaga. Se realizan pruebas de medias de dos colas mediante Modelos Lineales Generales y Mixtos con método de estimación de máxima verosimilitud restringida (REML, por sus siglas en inglés). Previamente, se comprueba que los indicadores cumplan con los supuestos de normalidad, homogeneidad y varianza. Todos los análisis se realizan usando el software estadístico InfoStat versión 2019 (Di Rienzo et al. 2019) Se conservan aquellas pruebas de medias con nivel de significancia de 0.05 utilizando igualdad de medias ($\mu_1 = \mu_2$) como hipótesis nula. Se grafican solo los resultados significativos de las pruebas de medias, identificando mediante letras sus similitudes y diferencias estadísticas. Se utilizan colores para identificar los resultados que arrojan las pruebas de medias, utilizando una paleta de color que va desde el amarillo hasta el rojo. Cada color identifica una de las letras generadas en el análisis de medias, de forma que amarillo se asocia a la media mayor, mientras que rojo se asocia a las menores medias y los tonos naranja se asocian a valores intermedios de la media.

Utilizando los resultados de las pruebas de medias, las categorías de los factores y las categorías climáticas se identifica la relación entre los factores océano atmosféricos Niño3.4, AMO, CLLJ, DME_AMO-N34, DME_AMO-CLLJ y DME_CLLJ-N34 y el desarrollo de la broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) a lo largo del año.

Se identifican escenarios climáticos para epidemias de broca, roya y ojo de gallo. Se identifican las categorías que presentan los factores océano-atmosféricos durante los años que conforman la categoría climática definida como "Muy favorable" para cada enfermedad y la plaga. Cada escenario es descrito a nivel de periodo para evidenciar el efecto que los factores océano-atmosféricos ejercieron sobre el clima de la región durante esos años.

2.3 Aplicación de los escenarios climáticos

Definida esta asociación entre factores predictores de la variabilidad climática de la región centroamericana y conociendo los pronósticos de estos fue posible generar una serie de escenarios climáticos de condiciones muy favorables para el desarrollo de broca, roya y ojo de gallo que permitirá al sector cafetalero centroamericano una mejor adaptación ante el Cambio Climático. La aplicación de los escenarios climáticos consiste en comparar los pronósticos trimestrales de los factores océano-atmosféricos contra los escenarios definidos para la broca

(*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) u ojo de gallo (*Mi. citricolor*), según corresponda. De forma que, si los pronósticos de los factores océano-atmosféricos coinciden con los terciles de los escenarios climáticos de epidemias durante el periodo de diciembre a abril, se tiene una alerta roja como precaución. Si tras avanzar el año los pronósticos de los factores, tras cumplir con los terciles del escenario del primer periodo, cumple con los del periodo de mayo a junio se tiene mantiene la alerta roja. En caso de que los factores pronosticados para el periodo de julio y agosto siguen cumpliendo con los terciles del escenario respectivo se confirma la alerta roja y se deben implementar técnicas de recuperación del cultivo ante la presencia de la plaga/enfermedad. El análisis debe realizarse por separado para cada enfermedad y la plaga.

El pronóstico de AMO puede ser consultado en el enlace <https://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/decadal/Forecastindices.html>. Este pronóstico es generado por Physical Science Division (PSD, por sus siglas en inglés) de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés), para los próximos nueve años, además del comportamiento real de AMO en los últimos 15 años. Además del enlace <https://www.kylemacritchie.com/meteorology/nao.php>. Pronostico desarrollado por PhD. Kyle MacRitchie a 3 meses plazo, con el comportamiento real de AMO durante el último trimestre.

El pronóstico del Niño 3.4, puede ser consultado en el enlace <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/plume.html>. Este pronóstico es un ensamble de modelos para los próximos meses que completa el año con el comportamiento real del Niño 3.4 y es generado por The North American Multi-Model Ensemble (NMME, por sus siglas en inglés) de NOAA.

El pronóstico del CLLJ no se encuentra disponible por sí mismo, pero puede dársele un seguimiento trimestral mediante la Perspectiva del Clima que genera el Foro del Clima Regional, que puede ser consultado en el link <http://recursoshidricos.org/perspectiva-del-clima/>

3. Resultados

3.1 Relación entre categorías climáticas de roya y categorías de los factores océano-atmosféricos

Las pruebas de medias entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticas definidos para la roya (*H. vastatrix*) en el Artículo II se muestran en la Figura 24 así como los Cuadros 20 y 21. El Cuadro 20 arroja los valores-p de las pruebas de hipótesis. La Figura 24 muestra los gráficos de aquellas medias con diferencias significativas al 95%. Se identifican diferencias entre los grupos definidos en las categorías climáticas, generadas en el Artículo II, y los factores océano atmosféricos en los cuatro periodos del año. El Cuadro 21 identifica la influencia de los factores océano-atmosféricos sobre el desarrollo de la roya durante cada periodo del año. Se identifican en color rojo aquellas pruebas para los cuales se rechaza la hipótesis nula, es decir, cuando no hay igualdad de medias.

Cuadro 20. Valores-p de la prueba de medias entre los factores océano-atmosféricos y los grupos climáticas definidos para la roya (*H. vastatrix*) en el Artículo II. El color rojo identifica aquellas relaciones con significancia al 5%

Enfermedad	Periodo	AMO	CLLJ	NIÑO3-4	DME	DME	DME	DME
					AMO-NIÑO3.4	AMO-CLLJ	CLLJ-NIÑO3.4	AMO-NIÑO3.4+CLLJ
ROYA	Dic-Abr	0.0242	0.0123	0.4835	0.0862	0.0013	0.4941	0.1787
	May-Jun	0.2028	0.5964	0.8703	0.4436	0.0226	0.8605	0.7957
	Jul-Ago	0.0019	0.417	0.8077	0.1852	0.0005	0.729	0.3652
	Set-Nov	0.0004	0.0218	0.8905	0.2856	0.0148	0.5333	0.1580

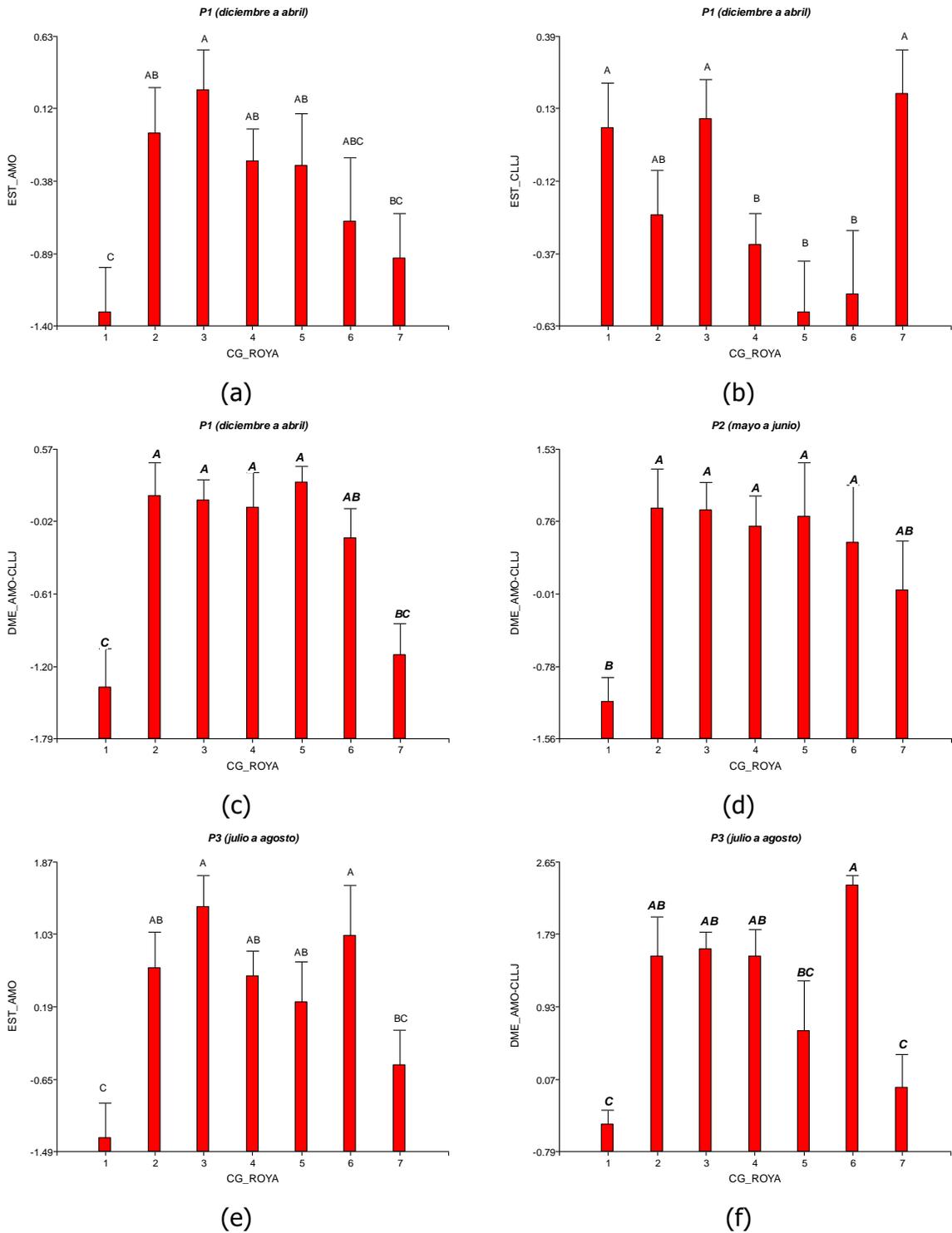


Figura 24. Gráficos de las pruebas de medias con diferencias significativas al 5%, entre los factores océano-atmosféricos y los grupos climáticos definidos para la roya (*H. vastatrix*). Relación de la roya con AMO(a), CLLJ(b) y DME_AMO-CLLJ(c) durante P1. Relación de la roya con DME_AMO-CLLJ(d) durante P2. Relación de la roya con AMO(e) y DME_AMO-CLLJ(f) durante P3. Relación de la roya con AMO(g), CLLJ(h) y DME_AMO-CLLJ(i) durante P4. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18

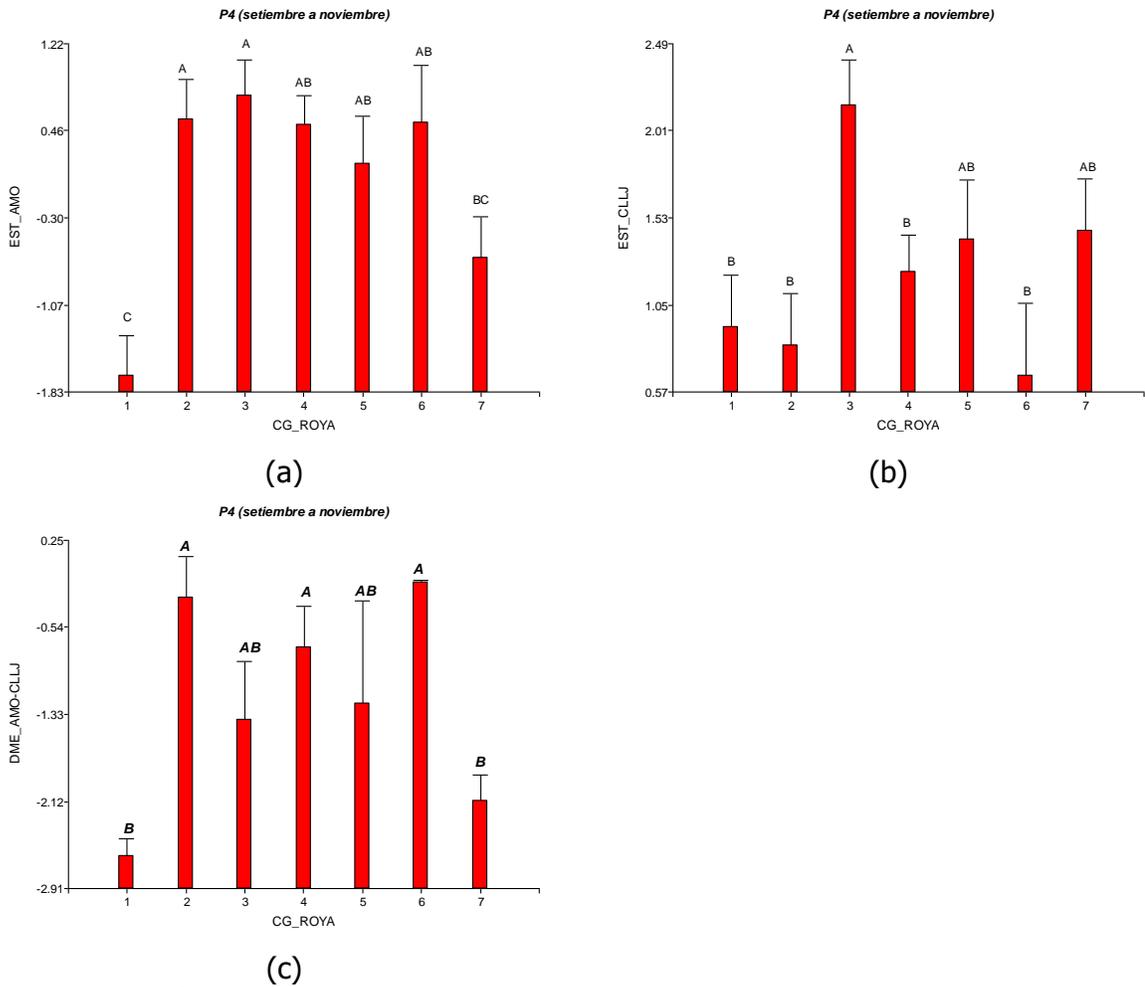


Figura 25. Gráficos de las pruebas de medias con diferencias significativas al 5%, entre los factores océano-atmosféricos y los grupos climáticos definidos para la roya (*H. vastatrix*). Relación de la roya con AMO(a), CLLJ(b) y DME_AMO-CLLJ(c) durante P4. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18

Cuadro 21. Influencia de los factores océano-atmosféricos sobre el desarrollo de la roya (*H. vastatrix*). Los colores simbolizan las diferencias de medias: ■ más altas, ■ medianamente altas, ■ intermedias, ■ medianamente bajas y ■ más pequeñas

Factor	Periodo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7
AMO	Dic-Abril	Red	Orange	Yellow	Orange	Yellow	Orange	Red
CLLJ	Dic-Abril	Yellow	Orange	Yellow	Red	Red	Red	Yellow
DME_AMO-CLLJ	Dic-Abril	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Orange	Red
DME_AMO-CLLJ	May-Jun	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Orange
AMO	Jul-Ago	Red	Orange	Yellow	Orange	Orange	Yellow	Red
DME_AMO-CLLJ	Jul-Ago	Red	Orange	Orange	Orange	Orange	Yellow	Red
AMO	Sept-nov	Red	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Red
CLLJ	Sept-nov	Red	Red	Yellow	Red	Orange	Red	Orange
DME_AMO-CLLJ	Sept-nov	Red	Yellow	Orange	Yellow	Orange	Yellow	Red
Tipologías		Desfavorable	Desfavorable	Favorable	Medio favorable	Medio favorable	Muy favorable	Medio favorable

Los grupos que perciben de una forma más clara el efecto que ejercen los fenómenos de macro escala sobre las condiciones del cafetal son el 1, 3 y 6. El grupo 1 clasificado por sus condiciones climáticas en la tipología "Desfavorable" es el grupo con las medias más bajas durante todo el año, excepto para el CLLJ durante diciembre-abril. El grupo 2 es otro grupo "Desfavorable" que difiere del grupo 1. AMO presenta valores medios durante diciembre-abril y julio-agosto, así como valores altos en setiembre-agosto. CLLJ tiene valores medios en entre diciembre-abril y valores bajos en setiembre-noviembre. AMO menos CLLJ muestra valores altos durante el año, menos julio-agosto.

La categoría "Favorable" del grupo 3 es claramente un grupo con las medias más altas para todos los factores en el año, excepto la diferencia de AMO y CLLJ que tienen valores medios en julio-noviembre. El grupo 6 ubicado en la categoría "Muy favorable" muestra los factores de mayo-agosto con valores altos. AMO con valores medios en diciembre-abril y setiembre-noviembre, así como CLLJ valores muy bajos en esos mismos periodos. La diferencia de AMO y CLLJ es media en diciembre-abril y alta en setiembre-noviembre.

En cuanto al grupo 4 y 5, ambos dentro de la categoría "Medio favorable", su desarrollo a nivel anual es muy similar. AMO se encuentra con valores medios en los tres periodos de análisis. El CLLJ presenta valores altos en entre diciembre-abril, así como valores medios o altos en setiembre-noviembre. La diferencia entre AMO y CLLJ para diciembre-abril tiene valores muy altos, mientras que valores altos en mayo-junio, en cambio valores de medios a altos entre julio-noviembre. Otro grupo "Medio favorable" para la roya es el grupo 7, que muestra diferencias con el grupo 4 y 5.

Cuadro 22. Comportamiento de los factores océano-atmosféricos durante los tres años que conforman la categoría "Muy favorable" para el desarrollo de la roya (*H. vastatrix*) a lo largo del año. Las categorías de los factores océano-atmosféricas se describen en el Cuadro 18

Factor	Periodo	Año 2009	Año 2012
AMO	Dic-Abr	Bajo	Medio
CLLJ	Dic-Abr	Bajo	Bajo
DME_AMO-CLLJ	Dic-Abr	Medio	Medio
DME_AMO-CLLJ	May-Jun	Bajo	Alto
AMO	Jul-Ago	Medio	Alto
DME_AMO-CLLJ	Jul-Ago	Alto	Alto
AMO	Set-nov	Medio	Alto
CLLJ	Set-nov	Bajo	Medio
DME_AMO-CLLJ	Set-nov	Alto	Alto

Aquellos años que conforma la categoría climática "Muy favorable" para la roya son extraídos y se reportan en el Cuadro 22 las categorías de los factores océano-atmosféricos que se le asocian. Se contiene en esta categoría climática el año 2012, reportado en el Artículo II como un año con epidemia de roya a nivel centroamericano. Durante el periodo de diciembre-abril se presenta un Jet (CLLJ) más acelerado de lo normal y un Mar Caribe entre normal y más cálido de lo normal, que genera una diferencia estandarizada de medias con valores medios. El periodo mayo-junio muestra valores extremos entre ambos años. Para el periodo julio-agosto la diferencia estandarizada entre la temperatura superficial del Atlántico y la corriente en chorro, indican valores en los que dicha diferencia da alta, lo que implica que está relacionada ya sea a una mayor intensidad de la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe o a condiciones del Atlántico con temperaturas altas a su vez con el Jet acelerado. Mientras el periodo de

setiembre-noviembre visualiza valores de la temperatura superficial del mar en el Atlántico se mantuvieron al menos normal o más cálidos y la diferencia del Atlántico con el Jet mostró valores altos.

3.2 Relación entre categorías climáticas de ojo de gallo y categorías de los factores océano-atmosféricos

Entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos del análisis del Artículo II para el ojo de gallo (*M. citricolor*) se generaron pruebas de medias que se detallan en la Figura 25 así como el Cuadro 23 y 24. El Cuadro 23 muestra los valores-p de las pruebas de hipótesis. Las diferencias de medias con significancia al 5% entre los grupos climáticos y los factores océano atmosféricos se visualizan con el color rojo. La Figura 25 lista los gráficos de aquellas medias con diferencias significativas al 5%. Para los cuatro periodos del año se identifican diferencias de medias entre las tipologías climáticas para los factores océano atmosféricos. El Cuadro 24 identifica la asociación de los factores océano atmosféricos sobre el desarrollo del ojo de gallo durante cada periodo del año. En color rojo identifica aquellas pruebas para los cuales se rechaza la hipótesis nula, es decir, cuando no hay igualdad de medias.

Cuadro 23. Valores-p para la prueba de medias entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos del ojo de gallo (*M. citricolor*). El color rojo identifica aquellas relaciones con significancia al 5%

Enfermedad	Periodo	AMO	CLLJ	NIÑO3.4	DME_AMO-NIÑO3.4	DME_AMO-CLLJ	DME_CLLJ-NIÑO3.4	DME_AMO-NIÑO3.4+CLLJ
OJO DE GALLO	Dic-Abr	0,2117	0,3099	0,3139	0,0413	0,3153	0,0852	0,0088
	May-Jun	0,3597	0,5117	0,0337	0,0685	0,87	0,0488	0,0502
	Jul-Ago	0,5062	0,0018	0,0016	0,0451	0,6237	0,0004	0,0071
	Set-Nov	0,6885	0,0193	0,0019	0,0625	0,4897	0,0013	0,0153

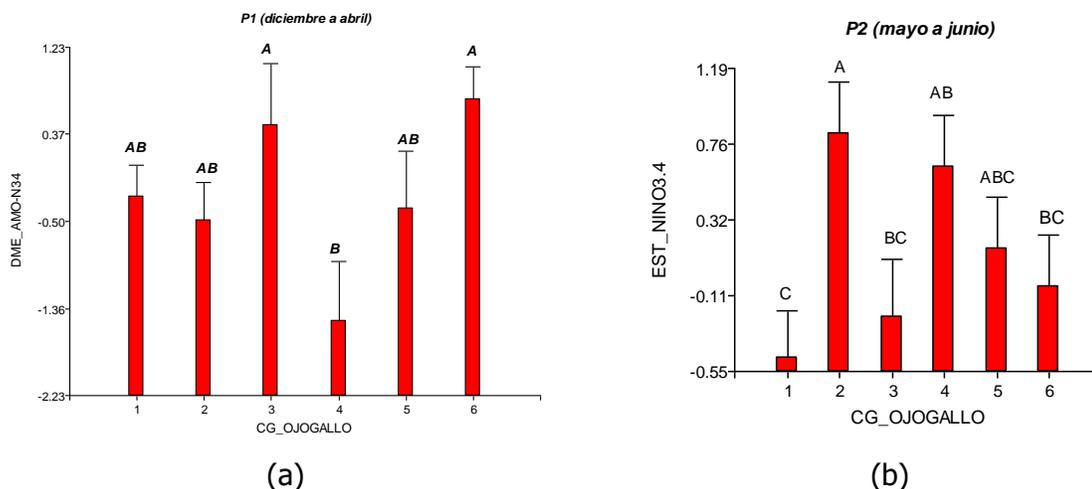
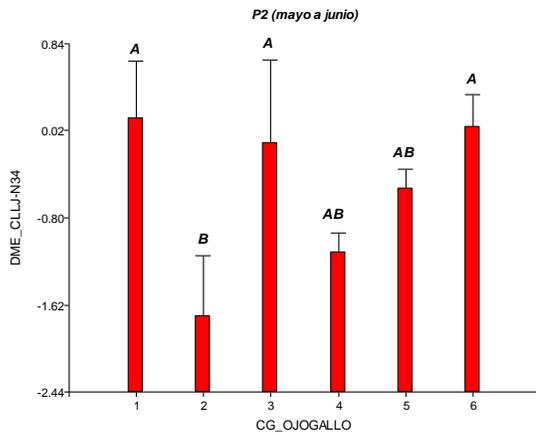
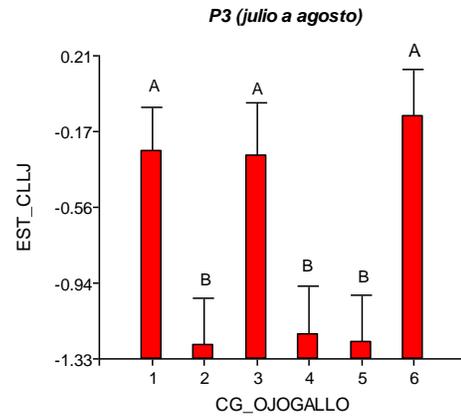


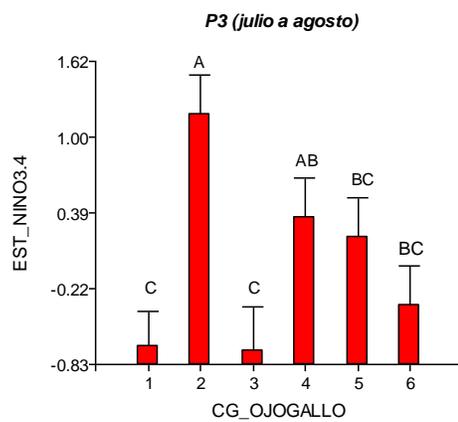
Figura 26. Gráficos de las diferencias de medias con significativas al 5%, entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos del ojo de gallo (*M. citricolor*). Relación del ojo de gallo con DME_AMO-N34(a) y DME_AMO-N34+CLLJ(k) durante P1.



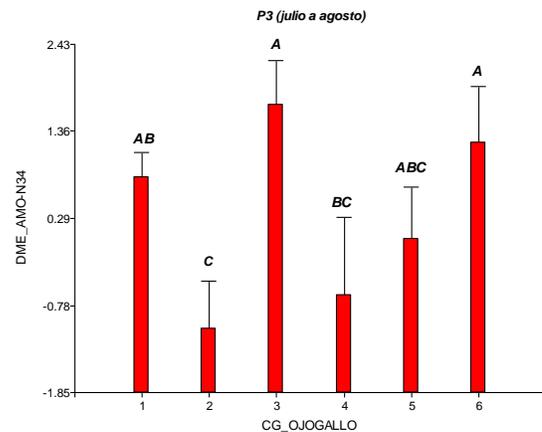
(c)



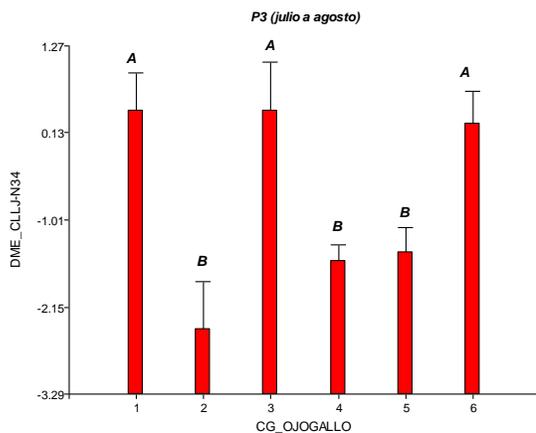
(d)



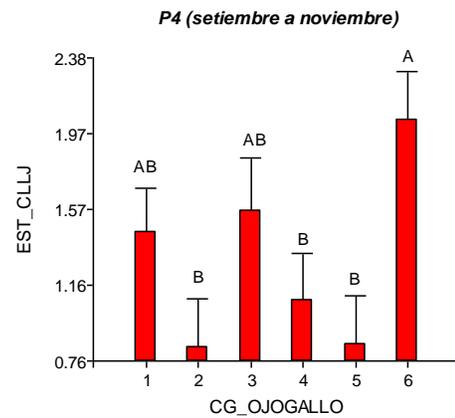
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 27. Gráficos de las diferencias de medias con significativas al 5%, entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos del ojo de gallo (*M. citricolor*). Relación del ojo de gallo con NIÑO3-4(b) y DME_CLLJ-N34(c) durante P2. Relación del ojo de gallo con CLLJ(d), NIÑO3-4(e), DEM_AMO-N34(f) y DME_CLLJ-N34(g) durante P3. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18

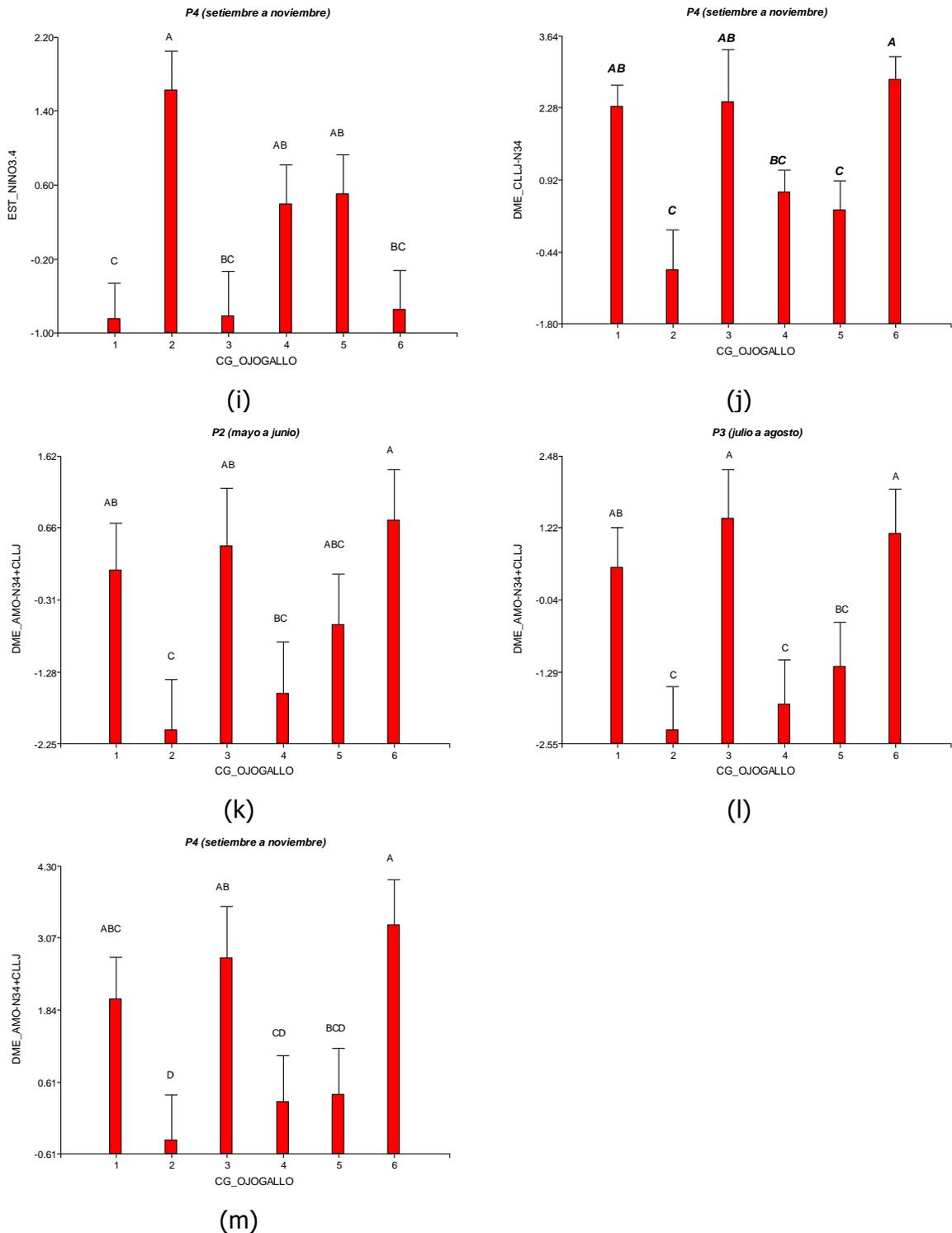


Figura 28. Gráficos de las diferencias de medias con significativas al 5%, entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos del ojo de gallo (*M. citricolor*). Relación del ojo de gallo con DME_AMO-N34+CLLJ(l) durante P3. Relación del ojo de gallo con CLLJ(h), NIÑO3-4(i), DME_CLLJ-N34(j) y DME_AMO-N34+CLLJ(m) durante P4. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18

Cuadro 24. Influencia que los factores océano-atmosféricos sobre el desarrollo del ojo de gallo (*M. citricolor*). Los colores simbolizan las diferencias de medias: ■ más altas, ■ altas, ■ intermedias, ■ medianamente bajas y ■ más pequeñas

Factor	Periodo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
DME_AMO-N34	Dic-Abr						
DME_AMO-N34+CLLJ	Dic-Abr						
NIÑO3-4	May-Jun						
DME_CLLJ-N34	May-Jun						
CLLJ	Jul-Ago						
NIÑO3-4	Jul-Ago						
DME_AMO-N34	Jul-Ago						
DME_CLLJ-N34	Jul-Ago						
DME_AMO-N34+CLLJ	Jul-Ago						
CLLJ	Set-nov						
NIÑO3-4	Set-nov						
DME_CLLJ-N34	Set-nov						
DME_AMO-N34+CLLJ	Set-nov						
Tipologías climáticas		Desfavorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Medio favorable	Muy favorable

De los seis grupos definidos para el ojo de gallo fueron los grupos 4 y 6 los que presentaron una relación más clara con los factores océano. La categoría climática "Muy favorable" del grupo 6 es la que presenta las medias más altas durante el año, excepto por Niño3.4 que se identifica con valores medios en sus tres periodos de análisis considerados que van de mayo-noviembre. El único grupo considerado en la categoría "Favorable" es el grupo 3. Esta muestra valores muy altos de los índices del periodo julio-agosto, excepto Niño3.4 con valores muy bajos. Los factores del periodo setiembre-noviembre son medios, mientras los valores de los factores en diciembre-junio son medios y altos.

El grupo 5 categorizado como "Medio favorable" tiene valores mayormente medios, excepto en CLLJ y la diferencia de este con Niño3.4 que se muestra muy bajas durante julio-noviembre, así como Niño3.4 y la diferencia de AMO con Niño3.4 sumando CLLJ que se identifican bajas durante julio-agosto.

El grupo 4 clasificado en la categoría "Desfavorable" presenta los factores a lo largo del año con valores bajos y muy bajos, excepto Niño3-4 que se mantiene con valor medio en mayo-agosto. Los grupos 1 y 2 son categorizados también como "Desfavorable" y varían entre sí y con respecto al grupo 4. El grupo 2 presenta valores muy bajos en los factores durante el año, excepto Niño3-4 que se mantiene con valores altos todo en los tres periodos y la diferencia de AMO y Niño3-4 que tiene valor medio en diciembre-abril. El grupo 1 muestra valores muy altos de Niño3-4 durante sus tres periodos, así como valores muy altos de las diferencias entre AMO y Niño3-4 en mayo-agosto. CLLJ con valores muy altos en julio-agosto y el resto de los factores con valores medios en sus respectivos periodos.

Cuadro 25. Comportamiento de los factores océano-atmosféricos durante los cinco años que conforman la categoría "Muy favorable" para el desarrollo del ojo de gallo (*M. citricolor*) a lo largo del año. Las categorías de los factores océano atmosféricas se describen en el Cuadro 18

Factor	Periodo	Año 1996	Año 2005	Año 2008	Año 2010	Año 2017
DME_AMO-N34	Dic-Abr	Medio	Alto	Alto	Medio	Alto
DME_AMO-N34+CLLJ	Dic-Abr	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
NIÑO3-4	May-Jun	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto
DME_CLLJ-N34	May-Jun	Medio	Alto	Alto	Alto	Bajo
CLLJ	Jul-Ago	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio
NIÑO3-4	Jul-Ago	Medio	Medio	Medio	Bajo	Medio
DME_AMO-N34	Jul-Ago	Bajo	Alto	Medio	Alto	Medio
DME_CLLJ-N34	Jul-Ago	Alto	Medio	Medio	Alto	Medio
DME_AMO-N34+CLLJ	Jul-Ago	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio
CLLJ	Set-nov	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
NIÑO3-4	Set-nov	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo
DME_CLLJ-N34	Set-nov	Medio	Alto	Alto	Alto	Alto
DME_AMO-N34+CLLJ	Set-nov	Medio	Alto	Medio	Alto	Alto

Las categorías de los factores océano-atmosféricos para los años que conforman la categoría climática "Muy favorable" para el ojo de gallo del café, específicamente para los periodos y factores del Cuadro 23, se listan en el Cuadro 24. El año 2010 es un año reportado con epidemia de ojo de gallo en Guatemala y Costa Rica en el Artículo II. En cuanto a los escenarios para el periodo diciembre y abril las temperaturas del Mar Atlántico en general tuvieron valores promedios o altos, el Jet presentó intensidades mayores a las normales, así como una diferencia estandarizada asociada al dipolo del Atlántico y Caribe con valores de medios a altos (Enfield y Alfaro 1999), finalmente también se muestra que la diferencia normalizada del acople entre los índices oceánicos asociados al dipolo y la corriente en chorro da valores altos en todos los casos, lo que implica que para los 5 años utilizados se muestra que el dipolo estaba en su fase positiva activa y la corriente en chorro se encontraba con valores más débiles. En el caso del periodo mayo a junio los índices trabajados se muestran que el Jet tenía valores medios o altos mientras que, predominaron los escenarios en los que la diferencia normalizada entre el CLLJ y la región Niño 3.4 presentaba valores altos. En el periodo julio a agosto la mayoría de los años de estudio se encontró que la temperatura del Atlántico estaba normal o cálida, en su mayoría la CLLJ presentó valores menos intensos, la región Niño 3.4 tenía condiciones normales o de Niña y las diferencias medias estandarizadas tuvieron valores promedios o mayores al promedio. Para el periodo setiembre a noviembre en todos estos años estudiados la CLLJ tenía valores por debajo de los promedios, la región Niño 3.4 estaba normal o fría y las diferencias estandarizadas anduvieron entre los valores promedio y altos.

3.3 Relación entre categorías de broca y categorías de los factores océano-atmosféricos

Se realizan pruebas de medias entre los grupos climáticos generados en el Artículo II durante el análisis del desarrollo de la broca (*H. hampei*) y los factores océano atmosféricos, estas se muestran en la Figura 26 así como el Cuadro 26 y 27. El Cuadro 26 arroja los valores-p de las pruebas de hipótesis. El color rojo muestra las diferencias de medias con significancia

al 5% entre los grupos climáticos y las tipologías océano-atmosféricas. La Figura 26 muestra los gráficos de aquellas medias con diferencias significativas al 95%. Se identifican factores significativos solamente para los tres primeros periodos del año, no se identificó ningún factor significativo entre setiembre y noviembre. El Cuadro 27 visualiza la manera en que los factores océano atmosféricos influyen sobre el desarrollo de la broca durante los meses de diciembre a agosto, de forma que el color rojo se asocia a medias altas, el amarillo a medias bajas y las tonalidades naranjas se relacionan con valores intermedios.

Cuadro 26. Valores-p para la prueba de medias entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos definidos para la broca (*H. hampei*). El color rojo identifica aquellas relaciones con significancia al 5%

Plaga	Periodo	AMO	CLLJ	NIÑO3-4	DME	DME	DME	DME
					AMO-NIÑO3.4	AMO-CLLJ	CLLJ-NIÑO3.4	AMO-NIÑO3.4+CLLJ
BROCA	Dic-Abr	0.1608	0.7407	0.1181	0.002	0.411	0.0606	0.0005
	May-Jun	0.0748	0.1493	0.2455	0.0301	0.4155	0.1506	0.0244
	Jul-Ago	0.1326	0.0124	0.3318	0.1858	0.1967	0.0639	0.0657
	Set-Nov	0.4518	0.0824	0.1637	0.1798	0.6139	0.1523	0.1226

Cuadro 27. Influencia de los factores océanos-atmosféricos sobre el desarrollo de la broca (*H. hampei*). Los colores simbolizan las diferencias de medias: ■ más altas, ■ intermedias y ■ más pequeñas

Factor	Periodo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
DEM_AMO-N34	Dic-Abr					
DME_AMO-N34+CLLJ	Dic-Abr					
DEM_AMO-N34	May-Jun					
DME_AMO-N34+CLLJ	May-Jun					
CLLJ	Jul-Ago					
Tipologías climáticas		Desfavorable	Medio favorable	Muy favorable	Desfavorable	Favorable

De los seis grupos que surgen del análisis para broca se identifican el grupo 3 y 4 como los que perciben mejor la influencia del clima. La categoría climática "Muy favorable" del grupo 3 presenta sus cuatro factores océano atmosféricos con las medias más altas durante el año. El grupo 5 clasificado como "Favorable" presenta valores medios en sus factores para el año, excepto la diferencia de AMO y Niño3-4 con valores altos. La categoría climática "Medio favorable" ubicada en el grupo 2 muestra valores medios de los factores en diciembre-junio y solo CLLJ con valores muy bajos. El grupo 4 considerado en la categoría "Desfavorable" mantiene sus cuatro factores con las medias más bajas a lo largo del año.

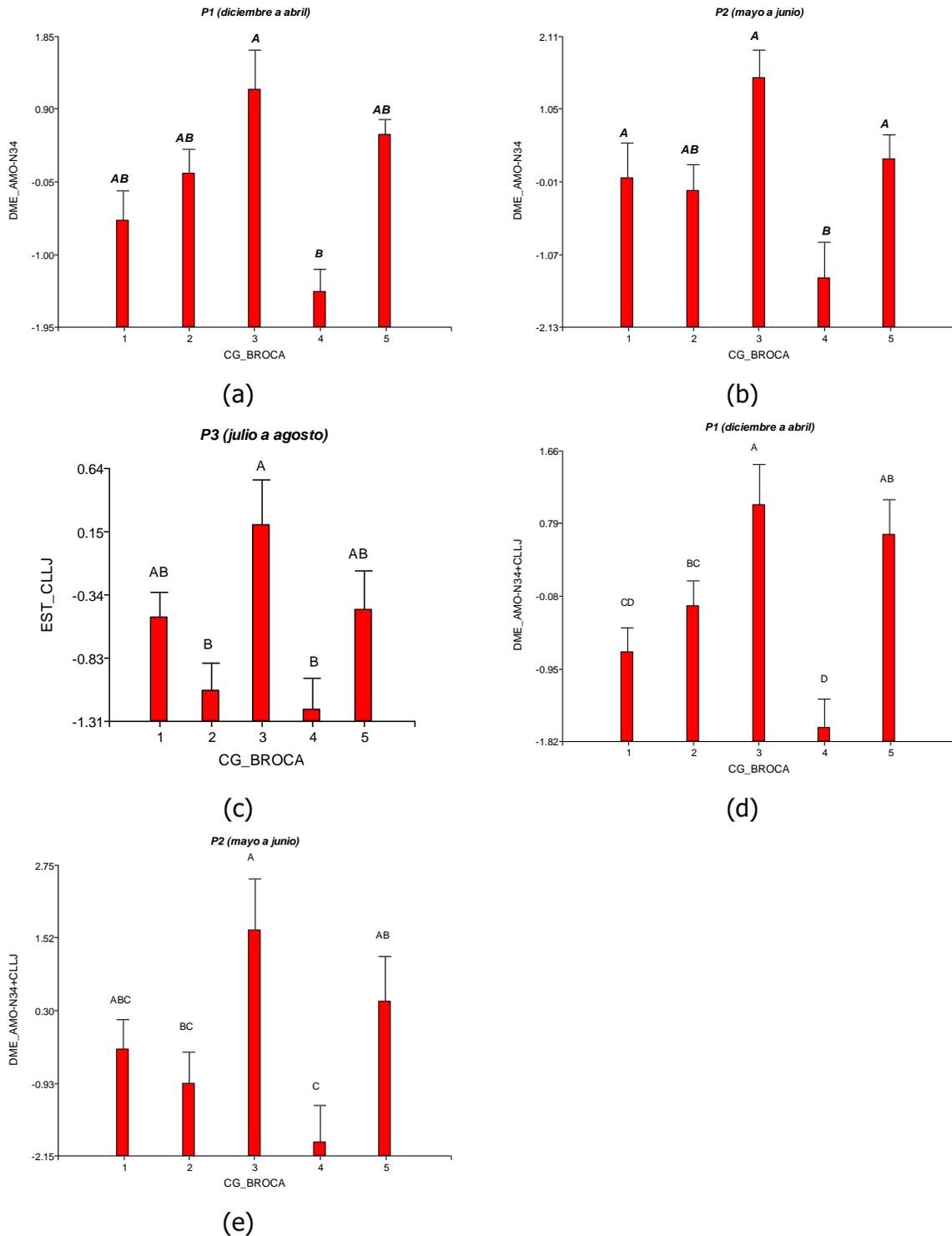


Figura 29. Gráficos de aquellas medias con diferencias significativas al 5%, entre los factores océano atmosféricos y los grupos climáticos definidos para la broca (*H. hampei*). Relación de la broca con DME_AMO-N34(a) y DME_AMO-N34+CLLJ(d) durante P1. Relación de la broca con DME_AMO-N34(b) y DME_AMO-N34+CLLJ(e) durante P2. Relación de la broca con CLLJ(c) durante P3. Los detalles de los periodos se definen en Cuadro 18

Cuadro 28. Comportamiento de los factores océano-atmosféricos durante los tres años que conforman la categoría “Muy favorable” para el desarrollo la broca (*H. hampei*) a lo largo del año. Las categorías de los factores océano atmosféricas se describen en el Cuadro 18

Factor	Periodo	Año 2008	Año 2010	Año 2011
DEM_AMO-N34	Dic-Abr	Alto	Medio	Alto
DME_AMO-N34+CLLJ	Dic-Abr	Alto	Alto	Alto
DEM_AMO-N34	May-Jun	Alto	Alto	Alto
DME_AMO-N34+CLLJ	May-Jun	Alto	Alto	Alto
CLLJ	Jul-Ago	Alto	Alto	Alto

El Cuadro 28 contiene las categorías de los factores para los años que conforman la categoría climática “Muy favorable” para el desarrollo de la broca del café, específicamente para los periodos y factores listados en el Cuadro 26. El año 2008 fue documentado en el Artículo II con epidemia de broca en Turrialba y Pérez Zeledón de Costa Rica. El periodo diciembre-abril presenta valores del Atlántico con temperaturas normales o por encima de los promedios y los DME con valores altos en su mayoría, indicando que no solo estaba presente el dipolo Atlántico – Pacífico, sino también, que el Jet estaba con valores menos intensos con respecto a la intensidad del dipolo. El periodo mayo-junio presenta condiciones similares a las del período de diciembre a abril, con el Atlántico más caliente de lo normal, la región de Niño 3.4 con valores fríos, el Jet normal o menos intenso y los índices normalizados con valores altos en todos los casos. El periodo julio-agosto muestra valores altos del Jet en los tres escenarios.

4. Discusión

Existe conocimiento de la influencia que los factores océano atmosféricos AMO, CLLJ y Niño3.4 ejercen sobre el clima de la región centroamericana, aunque no son claros los efectos regionales de todas sus combinaciones. La mayor parte de la variabilidad climática de la región centroamericana puede ser explicada por la interacción entre ENOS y índices del Atlántico como AMO (Fallas y Alfaro, 2012). Existe importante asociación entre SSTA del Mar Atlántico Tropical y las precipitaciones en el Caribe centroamericano. (Enfield y Alfaro 1999). Hay dependencia de la intensidad y magnitud del veranillo asociada al gradiente entre los Océanos Atlántico y Pacífico (Maldonado et al. 2016). CLLJ tiene una clara relación con el ENOS de forma que según sea su combinación se evidencia un aumento o decremento de la precipitación en la costa Caribe de Centroamérica. La combinación de ENOS y CLLJ tiene influencia en el desarrollo de los ciclones tropicales durante los meses de julio y agosto (Amador et al. 2010). La actividad ciclónica tropical en el Mar Caribe es influenciada por el ENOS (Amador et al. 2016). El ENOS es el principal modulador del clima en la región Centroamericana, influenciando tanto la precipitación como la temperatura (Maldonado et al. 2018). AMO es considerada un modulador del impacto de la sequía producida por ENOS (Amador et al. 2016).

Se evidencia la ausencia de asociación que tienen algunos factores océano atmosféricos sobre las plagas y enfermedades, así como la asociación que tiene la diferencia de medias de estos mismos factores en el mismo periodo. Fallas y Alfaro (2012) utilizan la resta de factores océano atmosféricos en busca de los mejores predictores, comprobando su utilidad debido a que a diferencia de los factores individuales logra agrupar las interacciones océano atmosféricas del periodo de análisis. La interpretación de los valores resultantes es compleja y

en el caso de esta investigación se identifica que más de una configuración de los factores genera una misma categoría de diferencia estandarizada de medias entre los mismos factores, por lo que su análisis debe abordarse desde la interpretación de los factores individuales que le dieron origen, aun cuando estos no resulten significativos por sí mismos.

Tras buscar la interacción entre los factores océano-atmosféricos y los grupos climáticos, generados en el Artículo II, fue posible identificar asociaciones de estos que favorecen el desarrollo de una epidemia de roya (*H. vastatrix*), ojo de gallo (*M. citricolor*) o broca (*H. hampei*) del café en Centroamérica. Las asociaciones entre los grupos climáticos y los factores océano-atmosféricos varían según sea alguna de las enfermedades o la plaga. La roya no presentó asociación significativa entre las categorías climáticas y el factor Niño3.4 en ninguno de los periodos analizados. Tampoco presenta diferencias significativas al 5% entre las diferencias estandarizadas entre Niño3.4 y los otros factores. El ojo de gallo por su parte no evidencia efecto alguno por parte de AMO, en los periodos de estudio, pero si se encuentra significancia al 5% cuando se asocia con Niño3.4 mediante su diferencia de medias en los dos periodos asociados a épocas secas. La broca no muestra influencia del Niño3.4 ni AMO por sí mismos, pero si en su diferencia de medias durante los dos primeros periodos del año.

Considerando las categorías de los factores océano-atmosféricos específicamente para la categoría climática "Muy favorable" fue posible identificar escenarios climáticos que favorecen el desarrollo de una epidemia de roya (*H. vastatrix*), ojo de gallo (*M. citricolor*) o broca (*H. hampei*) del café en Centroamérica. Es posible generar información mediante un monitoreo de pronóstico de los factores océano-atmosféricos, considerando específicamente los periodos del año aquí definidos para cada factor en cada una de las enfermedades o la plaga. Esta información puede ser utilizada para que las autoridades competentes ajusten sus planes de vigilancia según sean las condiciones climáticas. En caso de que se cumplan las condiciones de los factores durante el periodo diciembre a abril se deben incrementar las medidas de vigilancia bajo una alerta roja porque ya se tendrían las condiciones climáticas propicias para el desarrollo de una epidemia. Si además los factores océano atmosféricos cumplen los requerimientos en el periodo mayo a junio, julio a agosto y setiembre a noviembre debe mantenerse la alerta roja climática. Por lo que este insumo climático viene a ser uno de los indicadores climáticos que conformar un sistema de la alerta temprana. Tras la ocurrencia de una epidemia los escenarios climáticos pueden ser útiles en la caracterización climática del año, utilizando esta vez datos reales de los factores y ya no los pronosticados, para el cobro de seguros agrícolas, así como análisis de impacto de la epidemia.

La roya (*H. vastatrix*) presenta dos escenarios climáticos muy favorables para su desarrollo que se diferencian entre sí, a pesar de conformar ambos la categoría climática "Muy favorable" para el desarrollo de la roya del café. Se identifican por tanto dos escenarios de condiciones océano-atmosféricas que pueden generar las condiciones climáticas propicias para el desarrollo de la roya a nivel de epidemia. El escenario 1 considerado muy favorable para la roya se aprecia en el Cuadro 22. Basándose en los pronósticos de los factores que se encuentran disponibles al menos con un trimestre de antelación. Si durante el periodo diciembre-abril se pronostica un AMO, CLLJ y su diferencia de medias con valores bajo lo normal, existe por tanto un riesgo alto de epidemia de roya. Momento en que se identifica una alta posibilidad de epidemia de roya. Si tras cumplir esto, para el periodo mayo-junio se pronostica con AMO y AMO-CLLJ con valores bajo lo normal además de CLLJ con tercil intermedio, se tiene un riesgo potencial de desarrollo de una epidemia de roya. Debe por tanto mantenerse la alerta roja. Si tras cumplir estos requisitos previos, el pronóstico para el periodo julio-agosto coincide con AMO en valores normales, CLLJ bajo lo normal y su diferencia con valores por arriba de lo normal, se confirma el riesgo alto de epidemia de roya. Una vez que cumplió con los terciles de los factores en el resto del año y además el pronóstico durante setiembre-octubre cumple con AMO con valores medios, CLLJ por debajo de lo normal y su

diferencia con valores arriba de lo normal se tiene sin duda alguna, la presencia de roya en el cafetal, por lo que deben implementarse medidas de restauración del cafeto para evitar pérdidas secundarias en el próximo ciclo productivo. En aquellos casos en que las condiciones de los escenarios no se cumplan a cabalidad se tiene una condición de riesgo intermedio y si no se cumplen en lo absoluto se tiene un riesgo bajo para el desarrollo de una epidemia de roya. El segundo escenario que debe ser evaluado para definir un potencial año con incidencia de roya del café se ubica también en el Cuadro 22.

De los dos escenarios climáticos para la roya del café durante el periodo de diciembre-abril mostrados en la Cuadro 29, se identifican configuraciones de las categorías de los factores océano-atmosféricos que muestran condiciones normales (2009) y más lluviosas de lo normal (2012). Es importante recalcar que, aunque el Jet presenta uno de sus máximos entre enero y febrero, durante estos dos años se encuentra acelerado de forma que su promedio de cinco meses arroja valores bajo lo normal que se asocian a velocidades de los vientos que conforman CLLJ más acelerado de lo normal. Esta condición puede inducir lluvias orográficas en las zonas montañosas del país, así como derrames (lluvias de corta intensidad) en la Vertiente Pacífico de nubes formadas en el Caribe.

Cuadro 29. Escenarios climáticos del periodo diciembre a abril para roya (*H. vastatrix*). Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la enfermedad

Factor	Periodo	Año 2009	Año 2012
AMO	Dic-Abr	Bajo	Medio
CLLJ	Dic-Abr	Bajo	Bajo
NIÑO3-4	Dic-Abr	Medio	Bajo
DME_AMO-CLLJ	Dic-Abr	Medio	Medio

Los escenarios climáticos de roya del café durante el periodo mayo-junio presentados en el Cuadro 30, se identifican categorías de los factores océano-atmosféricos AMO y CLLJ que muestran un periodo que favorece el desarrollo de la roya tanto con un inicio adelantado (año 2012) de la época lluviosa como con un inicio retrasado (año 2009) de la época lluviosa.

Cuadro 30. Escenarios climáticos del periodo mayo a junio para roya (*H. vastatrix*). Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la enfermedad

Factor	Periodo	Año 2009	Año 2012
AMO	May-Jun	Bajo	Alto
CLLJ	May-Jun	Medio	Medio
NIÑO3-4	May-Jun	Medio	Medio
DME_AMO-CLLJ	May-Jun	Bajo	Alto

Para la roya del café los escenarios climáticos durante el periodo julio-agosto del Cuadro 31, arrojan configuraciones de las categorías de los factores océano-atmosféricos que favorecen el desarrollo del hongo con un veranillo normal (año 2009) o más lluvioso de lo normal (año 2012). Se obtiene aquí una diferencia de medias estandarizadas de la misma categoría para ambos escenarios aun cuando sus valores de CLLJ y AMO son diferentes en cada año.

Cuadro 31. Escenarios climáticos del periodo julio y agosto para roya (*H. vastatrix*). Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la enfermedad

Factor	Periodo	Año 2009	Año 2012
AMO	Jul-Ago	Medio	Alto
CLLJ	Jul-Ago	Bajo	Medio
NIÑO3-4	Jul-Ago	Alto	Alto
DME_AMO-CLLJ	Jul-Ago	Alto	Alto

Ambos escenarios climáticos para la roya del café durante el periodo de setiembre-noviembre presentados en el Cuadro 32, identifican configuraciones de las categorías de los factores océano-atmosféricos que muestran una época seca que finaliza antes de lo normal con desfavorecimiento de formación de ciclones tropicales (2009) y una época seca que inicia antes de lo normal (2012).

Cuadro 32. Escenarios climáticos del periodo setiembre a noviembre para roya (*H. vastatrix*). Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la enfermedad

Factor	Periodo	Año 2009	Año 2012
AMO	Set-nov	Medio	Alto
CLLJ	Set-nov	Bajo	Medio
NIÑO3-4	Set-nov	Alto	Medio
DME_AMO-CLLJ	Set-nov	Alto	Alto

Se identifican cinco escenarios que pueden desencadenar en una epidemia del **ojo de gallo** (*M. citricolor*) en Centroamérica. En aquellos periodos en que los factores de diferencias de medias estandarizados coinciden en su categoría se evidencia que estos fueron generados con diferentes categorías de factores base. El escenario 1 que es muy favorable para el desarrollo de ojo de gallo se muestra en el Cuadro 25. La componente climática del sistema de alerta temprana va a consistir en evaluar el comportamiento de los factores océano atmosféricos según sus valores pronosticados con tres meses de antelación. Estos valores pronosticados de los factores deben ser evaluados de forma independiente en cada uno de los cinco escenarios de forma que si en agosto tomamos el escenario 1 y los pronósticos nos muestran un AMO y CLLJ bajo lo normal además de Niño3.4 arriba de lo normal de forma que se obtenga una diferencia de AMO y Niño3.4 normal y esta diferencia más CLLJ por arriba de lo normal, se tendrán altas posibilidad de epidemia. Si además durante febrero los pronósticos indican un Niño3.4 normal y CLLJ bajo lo normal que conlleve a su diferencia en valores normales, se justifica una alerta verde para ojo de gallo que recomiende fortalecer la nutrición del cafetal. Cuando los pronósticos cumplen el mismo escenario en los periodos anteriores y además en abril se pronostican para el tercer periodo valores de AMO bajo lo normal, Niño3.4 arriba de lo normal y CLLJ normal que conllevan a la diferencia de CLLJ, así como Niño3.4 alto la diferencia de medias entre AMO y Niño3.4 bajo lo normal y esta resta más CLLJ con valores normales; se mantienen condiciones climáticas propicias para una epidemia de ojo de gallo. Si aunado a esto se identifica durante junio que los pronósticos de los factores durante el cuarto periodo serán AMO bajo lo normal, Niño3.4 alto y CLLJ normal que concluye en la diferencia entre CLLJ y Niño3.4 normal, así como la diferencia de AMO y Niño3.4 sumando CLLJ con valores normales; se tiene por tanto la presencia de ojo de gallo en el cafetal y se deben implementar medidas de restauración del cafeto para evitar pérdidas secundarias en el siguiente ciclo productivo. En caso de que las condiciones de los escenarios no se cumplan

completamente se tiene una condición de riesgo intermedio y si no se cumplen del todo se tiene un riesgo bajo para el desarrollo de una epidemia de ojo de gallo. Los otros escenarios 2, 3, 4 y 5 muy favorables para el ojo de gallo en los cuales debe realizarse la evaluación se muestran también en el Cuadro 25.

Los escenarios climáticos entre diciembre y abril para ojo de gallo mostrados en el Cuadro 33 muestran una configuración de categorías de los factores océano-atmosférico favorables para el hongo durante una primera época seca normal (años 1996 y 2010), o por un periodo seco más lluvioso de lo normal (años 2005 y 2017) y por una época seca más lluviosa de lo normal sin lluvias intensas (año 2008). Debe recalarse que en todos los años el Jet se mantuvo menos acelerado de lo normal, excepto en el año 2008 que se mantuvo acelerado.

Cuadro 33. Escenarios climáticos para ojo de gallo (*M. citricolor*) durante el periodo diciembre-abril. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para el hongo

Factor	Periodo	Año 1996	Año 2005	Año 2008	Año 2010	Año 2017
AMO	Dic-Abr	Bajo	Alto	Medio	Alto	Alto
CLLJ	Dic-Abr	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto
NIÑO3-4	Dic-Abr	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Medio
DME_AMO-N34	Dic-Abr	Medio	Alto	Alto	Medio	Alto
DME_AMO-N34+CLLJ	Dic-Abr	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

El Cuadro 34 presenta los escenarios climáticos para ojo de gallo de mayo a junio con una configuración de categorías de los factores océano-atmosférico que favorecen al ojo de gallo con una época lluviosa más extensa de lo normal (año 2010), o una época lluviosa más extensa y ventosa de lo normal (año 2008), o una época lluviosa más ventosa que inicia y finaliza antes de lo normal (año 2005), también con una época lluviosa que inicia y finaliza después de lo normal (año 1996), además de una época lluviosa que inicia y finaliza antes de lo normal (año 2017).

Cuadro 34. Escenarios climáticos para ojo de gallo (*M. citricolor*) durante el periodo mayo-junio. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para el hongo

Factor	Periodo	Año 1996	Año 2005	Año 2008	Año 2010	Año 2017
AMO	May-Jun	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto
CLLJ	May-Jun	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio
NIÑO3-4	May-Jun	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto
DME_CLLJ-N34	May-Jun	Medio	Alto	Alto	Alto	Bajo

Para el periodo julio a agosto se aprecian los escenarios climáticos del ojo de gallo en la Cuadro 35 con una configuración de categorías de los factores océano-atmosférico que favorecen al hongo con un veranillo menos marcado de lo normal (año 2010), un veranillo más lluvioso de lo normal (año 2005), un veranillo menos lluvioso de lo normal (año 1996), un veranillo normal (2008) y un veranillo no tan bien definido que a su vez fue más lluvioso de lo normal (2017).

Cuadro 35. Escenarios climáticos para ojo de gallo (*M. citricolor*) durante el periodo julio-agosto. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para el hongo

Factor	Periodo	Año 1996	Año 2005	Año 2008	Año 2010	Año 2017
AMO	Jul-Ago	Bajo	Alto	Medio	Alto	Alto
CLLJ	Jul-Ago	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio
NIÑO3-4	Jul-Ago	Medio	Medio	Medio	Bajo	Medio
DME_AMO-N34	Jul-Ago	Bajo	Alto	Medio	Alto	Medio
DME_CLLJ-N34	Jul-Ago	Alto	Medio	Medio	Alto	Medio
DME_AMO-N34+CLLJ	Jul-Ago	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio

Las configuraciones de categorías de los factores océano-atmosférico que conforman los escenarios climáticos para ojo de gallo de setiembre a noviembre se presentan en la Cuadro 36. Se aprecia que el ojo de gallo se favorece con una segunda época lluviosa más lluviosa de lo normal con favorecimiento de desarrollo de ciclones tropicales (año 2010 y 2017), o una segunda época lluviosa menos lluviosa de lo normal (año 1996), o una segunda época lluviosa más lluviosa de lo normal (año 2005), o una segunda época lluviosa normal (año 2008). Debe evidenciarse que los cinco escenarios presentaron una época seca con vientos más acelerados de lo normal que se asocia a la reducción de lluvias convectivas.

Cuadro 36. Escenarios climáticos para ojo de gallo (*M. citricolor*) durante el periodo setiembre-noviembre. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para el hongo

Factor	Periodo	Año 1996	Año 2005	Año 2008	Año 2010	Año 2017
AMO	Set-nov	Bajo	Alto	Medio	Alto	Alto
CLLJ	Set-nov	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
NIÑO3-4	Set-nov	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo
DME_CLLJ-N34	Set-nov	Medio	Alto	Alto	Alto	Alto
DME_AMO-N34+CLLJ	Set-nov	Medio	Alto	Medio	Alto	Alto

En el análisis de factores para el desarrollo de **la broca (*H. hampei*)** se identifica igualdad de factores entre los años 2008 y 2011, aunque los factores que dieron origen a las diferencias de medias de estos factores no son los mismos. Se identifican tres escenarios climáticos muy favorables para el desarrollo de una epidemia de la broca. El escenario 1 para broca se muestra en el Cuadro 28. La componente climática del sistema de alerta temprana busca identificar aquella configuración climática de diciembre a agosto que sea muy favorable para el desarrollo de la broca. Cuando las condiciones de los escenarios no se cumplan al pie de la letra se tiene una condición de riesgo intermedio y si no se cumplen en ningún periodo se tiene un riesgo bajo para el desarrollo de una epidemia de broca. Los otros dos escenarios en los cuales se deben evaluar los pronósticos de las oscilaciones se aprecian en el Cuadro 28.

Durante el periodo diciembre-abril los factores océano-atmosféricos de los escenarios climáticos de broca muestran en la Cuadro 37 condiciones favorables con una época seca con lluvia normal y menos ventosa (año 2010), así como por una época seca más húmeda y ventosa de lo normal (años 2008 y 2011).

Cuadro 37. Escenarios climáticos que favorecen a la broca (*H. hampei*) entre diciembre y abril. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la plaga

Factor	Periodo	Año 2008	Año 2010	Año 2011
AMO	Dic-Abr	Medio	Alto	Medio
Niño3-4	Dic-Abr	Bajo	Alto	Bajo
CLLJ	Dic-Abr	Bajo	Alto	Medio
DEM_AMO-N34	Dic-Abr	Alto	Medio	Alto
DME_AMO-N34+CLLJ	Dic-Abr	Alto	Alto	Alto

El periodo mayo-junio identifica para los factores océano-atmosféricos, Cuadro 38, de los escenarios climáticos de broca condiciones favorables para el coleóptero con una primera época lluviosa más extensa de lo normal (año 2008), así como una primera época lluviosa extensa de lo normal con condiciones menos ventosas (año 2010) y una primera época lluviosa que finaliza más tarde de lo normal con condiciones menos ventosas (año 2011).

Cuadro 38. Escenarios climáticos que favorecen a la broca (*H. hampei*) entre mayo y junio. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la plaga

Factor	Periodo	Año 2008	Año 2010	Año 2011
AMO	May-Jun	Alto	Alto	Medio
Niño3-4	May-Jun	Bajo	Bajo	Bajo
CLLJ	May-Jun	Medio	Alto	Alto
DEM_AMO-N34	May-Jun	Alto	Alto	Alto
DME_AMO-N34+CLLJ	May-Jun	Alto	Alto	Alto

La Cuadro 39 presenta los factores océano-atmosféricos de los escenarios climáticos de broca en el periodo julio-agosto, donde se evidencia el favorecimiento de la broca ante condiciones de un Jet débil, es decir, en ausencia de un veranillo bien definido.

Cuadro 39. Escenarios climáticos que favorecen a la broca (*H. hampei*) entre julio y agosto. Factores en color azul son no significativos, factores en color negro son significativos para la plaga

Factor	Periodo	Año 2008	Año 2010	Año 2011
AMO	Jul-Ago	Medio	Alto	Bajo
Niño3-4	Jul-Ago	Medio	Bajo	Bajo
CLLJ	Jul-Ago	Alto	Alto	Alto

5. Conclusiones

Se identifican escenarios climáticos basado en factores océano atmosféricos asociados a condiciones muy favorables para el desarrollo de broca (*H. hampei*), roya (*H. vastatrix*) y ojo de gallo (*M. citricolor*) en Centroamérica.

El desarrollo de la roya se ve influenciado principalmente por los factores AMO, CLLJ y la diferencia de medias estandarizada entre estas. El Niño 3.4 no influye en la incidencia de roya. Niño3.4 no tiene efecto sobre el desarrollo de la roya en ningún periodo del año. Tampoco se

identifica ninguna asociación para el desarrollo de la roya entre Niño3.4 y alguno de los factores AMO o CLLJ mediante la diferencia de medias estandarizada.

En roya existen diferencias entre las medias de los factores que la influyen. Uno de los grupos de la categoría "Desfavorable", muestra valores muy bajos en todos sus factores para todos los periodos excepto un factor. La categoría "Muy favorable" contiene configuraciones particularmente diferentes durante los periodos diciembre-abril y julio-agosto, que coinciden con los periodos definidos para analizar las épocas secas del año.

A nivel anual el desarrollo del ojo de gallo se ve favorecido principalmente por los factores CLLJ y Niño3.4, así como su resta. Para fines de alerta temprana deben utilizarse todos los factores significativos debido a que no se tiene un factor que favorezca el desarrollo del ojo de gallo durante todo el año.

AMO no influye por sí mismo en la incidencia de ojo de gallo. Incluso su diferencia de medias estandarizada con Niño3.4 tampoco favorece a la enfermedad, más no así su relación con CLLJ que resulta significativa en todos los periodos del año.

En el ojo de gallo se aprecian diferencias claras entre la categoría "Muy favorable" y "Desfavorable". La categoría "Muy favorable" presenta la mayor cantidad de factores con las medias más altas. Uno de los tres grupos calificados como "Desfavorable" mantiene la mayor cantidad de medias más bajas.

La broca obtuvo factores que la influyen en los tres primeros periodos, por lo que para alerta temprana debe utilizarse una combinación de la diferencia de medias entre AMO y Niño3.4 así como la suma de CLLJ a este factor, seguido de CLLJ para el periodo coincidente con el veranillo.

El Niño3.4 no influye a la broca en ningún periodo del año. Si se asocia este con AMO se obtienen relaciones positivas para el desarrollo de broca en el primer semestre del año.

Existen para la broca diferencias claras entre las categorías climáticas respecto a las medias de sus factores. La categoría "Muy favorable" se distingue del resto por sus medias muy altas en todos los factores, mientras uno de los grupos de la categoría "Desfavorable" presenta todos sus factores con las medias más bajas.

6. Recomendaciones

Validar las asociaciones entre las categorías de broca, roya y ojo de gallo del café mediante la implementación de monitoreo en finca para corroborar estas relaciones y así afinar el SAT café propuesto en esta investigación.

Construir un nuevo modelo que tome en cuenta el rezago de las condiciones favorables o no del periodo anterior para identificar el nivel de riesgo de ocurrencia para la plaga/enfermedad en aquellos casos donde no se cumplen a cabalidad los escenarios aquí identificados.

Se debe mejorar el conocimiento que se tiene en la región en cuanto a las interacciones entre factores océano-atmosféricos y su efecto en el clima centroamericano.

Incluir los resultados aquí obtenidos como insumo del Foro del Clima Centroamericano para generar alertas en el Foro de Aplicaciones. Incluir los resultados como componente climática del sistema de alerta temprana utilizado por OIRSA para el cultivo de café.

7. Referencias bibliográficas

Amador, J. 2008. The Intra-Americas Sea Low-Level Jet. Overview and future research. *Trend and Directions in Climate Research*. 1146: 153-188.

- Amador, JA; Alfaro, Eric; Rivera ER; Calderón, B. 2010. Hurricanes and Climate Change, Volume 2. Chapter 9: Climatic features and their relationship with Tropical Cyclones over de Intra-Americas Seas. James B. Elsner, Robert E. Hodges, Jill C. Malmstadt, Kelsey N. Scheitlin. New York, United States, Springer. (2): 149-173
- Amador, JA; Rivera ER; Duran-Quesada, AM; Mora, G; Sáenz, F; Calderón, B; Mora, N. 2016. The easternmost tropical Pacific. Part I: A climate review. *Revista de Biología Tropical*. (64): S1-S22.
- Avelino, J; Cabut, S; Barboza, B; Barquero, M; Alfaro, R; Esquivel, C; Durand, J-F; Cilas, C. 2007. Topography and crop management are key factors for the development of American Leaf Spot epidemics on coffee in Costa Rica. *Phytopathology*. 97(12): 1533-1542.
- Avelino, J; Rivas, G. 2014. La roya anaranjada del cafeto. Consultado 21 septiembre 2018. Disponible en <http://hal.archivesouvertes.fr/hal-01071036>. p. 1-47
- CATHALAC. 2018. Boletín climático mayo. *Boletín climático*, s.l.; :6.
- Constantino, L; Gil, Z; Jaramillo, A; Benavides, P; Bustillo, A. 2011. Efecto del cambio y la variación climática en la dinámica de infestación de la broca del café, *Hypothenemus hampei* en la zona central cafetalera de Colombia. Simposio de Variabilidad Climática. Libro de Memorias 38. Congreso Sociedad Colombiana de Entomología. P 106-121.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., González L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2019. Centro de Transferencia InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Enfield, D; Alfaro, E. 1999. The dependence of Caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific Oceans. *J. of Climate*, 12:2093-2103.
- Fallas, B; Alfaro, E. 2012. Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a los Foros Climáticos Regionales. 1: Análisis de tablas de contingencia. *Revista Climatología*. 12(2012): 61-79.
- GWP (Global Water Partnership). 2014. Sequia 2014: UN escenario que se puede evitar. s.l., s.e. p. 4. n°2.
- IMN; GEF; CRRH; PNUD. 2008. Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. CRRH ed. San José, Costa Rica, s.e. 75 p.
- ICAFFE. 2012. Revista Informativa II-2012. Instituto Costarricense de Café. 16 p.
- ICAFFE. 2014a. Boletín técnico, No 5. Instituto Costarricense de Café. 1 p.
- ICAFFE. 2014b. Boletín técnico, No 6. Instituto Costarricense de Café. 1 p.
- IPCC. 2007. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambio climático: Base de ciencia física. Contribución del grupo de trabajo I al cuarto informe de evaluación del IPCC. Cambridge University Press. Cambridge Reino Unido y Nueva York, EE. UU. 139 p.

- Jaramillo-Robledo, A. y Arcila-Pulgarín, J. 2009. Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de El Niño y su efecto en la caficultura. CENICAFE. 105 p.
- Jaramillo, J; Muchugu, E; Vega, FE; Davis, A; Borgemeister, C; Chabi-olaye, A. 2011. Some Like It Hot: The Influence and Implications of Climate Change on Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) and Coffee Production in East Africa. PLoS ONE. 6(9): 1-14.
- Kaplan, A., M. Cane, Y. Kushnir, A. Clement, M. Blumenthal, and B. 1998. Rajagopalan, Analyses of global sea surface temperature 1856-1991, *Journal of Geophysical Research*. 18567-18589.
- Kalnay, E; Kanamitsu, M; Kistler, R; Collins, W; Deaven, D; Gandin, L; Iredell, M; Saha, S; White, G; Woollen, J; Zhu, Y; Chelliah, M; Ebisuzaki, W; Janowiak, J; Mo, K; Ropelewski, C; Wang, L; Leetmaa, A; Reynolds, R; Jenne, R; Joseph, D . 1996. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project. *Bull Am Meteorol Soc.* (77): 437-471.
- Maldonado, T.; Alfaro, E. J.; Rutgersson, A.; Amador, J. A. 2016. The early rainy season in Central America: the role of the tropical North Atlantic SSTs. *International Journal of Climatology*. 37(9): 3731-3742.
- Reynolds, R.W., 1988: A real-time global sea surface temperature analysis. *J. Climate*. (1): 75-86.
- Zhang, R; Delworth, T. 2006. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters*. (33): 1-5.