



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

**Estimación de la eficiencia de métodos territoriales de muestreo de la roya del café
(*Hemileia vastatrix*) en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y la Escuela de Posgrado
como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

en Agroforestería y Agricultura Sostenible

Edwin Alcides Treminio Polanco


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 del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA Y
AGRICULTURA SOSTENIBLE**


FIRMANTES:




Fernando Casanoves, Ph.D.
Codirector de tesis




Jacques Avelino, Ph.D.
Codirector de tesis




Harold Gamboa, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Jorge Samaniego, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



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



Edwin Arceles Tremiño Polanco
Candidato

DEDICATORIA

A mi Señor Dios por regalarme la vida y con ella mucha salud, sabiduría e inteligencia para desarrollar esta tesis y terminar con éxito mi maestría, y por escuchar mis peticiones pese defraudarle constantemente.

A mi madre Ernestina Polanco y mi padre David Treminio por el incalculable apoyo y amor para cumplir mis sueños y crecer profesionalmente, por llenarme de fe y confianza para superar todos los obstáculos posibles, y por darme sus grandes ejemplos de integridad, honestidad y responsabilidad.

A mis dos bellas y hermosas sobrinitas, Brigitte y Francella, por contagiarme de su ternura e inspirarme a ser una persona leal y honesta con corazón humilde y hambre de superación.

A mi gran familia, en especial a mi hermana menor "mi dolor de cabeza", a mi hermana mayor "mujer de gran valor y ejemplo a seguir" y a mi hermanito Erick que siempre me ha demostrado su cariño con fuertes abrazos.

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios por su amor, paciencia y misericordia hacia mi persona, por todas las bendiciones que me ha dado aún sin merecerlas.

Al DAAD (Deutscher Akademischer Austausch Dienst-Servicio Alemán de Intercambio Académico), por la oportunidad que me brindó a lo largo de dos años y tres meses para culminar con éxito la maestría por medio del financiamiento de mis estudios.

A Procagica por el apoyo recibido para desarrollar sin dificultad esta investigación, la cual se enmarca en los objetivos y actividades del Programa y las necesidades de las instituciones del café para mejorar el control de la roya.

A mi co-director y gran ser humano Jacques Avelino, por su tiempo, dedicación y conocimientos científicos para crecer profesionalmente y terminar sin problema alguno este estudio. Dr., siempre le agradeceré su alto nivel científico, pero sobretodo la humildad y el buen deseo de aportar para que muchos jóvenes como yo crezcan profesionalmente. Que Dios multiplique sus buenas actitudes por siempre.

A mi co-director y gran amigo Fernando Casanoves, por su enorme paciencia, atención y orientación para desarrollar esta tesis. Dr., infinitas gracias por compartir sus grandes conocimientos con mi persona, pese a sus problemas de salud, siempre dedicó tiempo valioso y aportes importantes. Que Dios le bendiga con abundante salud para que muchas personas en el mundo sigan aprendiendo de usted y disfrutando de su delicioso asado argentino.

A mi gran amigo y compatriota Sergio Vílchez, por su carisma y su gran aporte en aspectos claves de la metodología de esta investigación. Sergio, muchas gracias por tu buena disposición de apoyarme e incentivarme a dejar en alto a Nicaragua, nuestro hermoso país.

A mis asesores Harold Gamboa y Jorge Samaniego por sus valiosos aportes y sugerencias para desarrollar esta tesis con mayor robustez y amplitud a lo largo de Centroamérica y República Dominicana.

Al IHCAFE, CENTA, MIDA e INDOCAFÉ por facilitarme información valiosa y útil para generar los principales resultados y recomendaciones específicas sobre los sistemas de vigilancia de la roya en sus respectivos países. Agradecimiento especial a Cristian Yizard Lizardo, Julio Grande y Quisqueya Pérez por su valioso tiempo para la recopilación de la información sobre los sistemas de monitoreo.

A mis amigos Juan Betanzos y Rafael Gómez por esa admiración y sentido del humor para poder sobrevivir en los momentos más aburridos en CATIE.

A todas las personas que amo y que a la distancia han depositado su confianza y han estado pendiente de cada una de mis etapas en mi estancia en CATIE, familiares y amigos en general.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo general	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.2	Hipótesis	3
1.3	Preguntas de investigación	3
II.	MARCO TEÓRICO.....	4
2.1	Agente responsable, taxonomía, descripción, hospederos y síntomas	4
2.2	Crisis de la roya anaranjada (<i>Hemileia vastatrix</i>) en Centroamérica	5
2.3	Plan regional de respuesta y sistemas de alerta temprana	7
2.4	Ciclo patológico de la roya del cafeto	9
2.5	Incidencia y severidad de la roya anaranjada	11
2.6	Principales factores que afectan la epidemia de la roya	12
III.	METODOLOGÍA	17
3.1	Ubicación del área de estudio.....	17
3.2	Depuración y estandarización de las bases de datos de los sistemas de monitoreo	18
3.3	Información disponible en cada país y descripción de las variables respuesta y de clasificación.....	20
3.4	Definición de las variables más importantes en el desarrollo de la roya y formación de categorías.....	24
3.5	Estimación del tamaño de muestra con datos de incidencia de los últimos años.....	25
3.6	Estimación del tamaño de muestra según incidencia observada y número de fincas por categoría	26
3.7	Costo-eficiencia de los sistemas de monitoreo.....	28
IV.	RESULTADOS.....	29
4.1	Hallazgos durante la depuración y estandarización de las bases de datos	29
4.2	Variables más influyentes en el desarrollo de la roya según la técnica de <i>Random Forest</i>	29
4.3	Categorías considerando altitud y variedad en cada país	30
4.4	Medias de la incidencia de la roya por categoría y mes de monitoreo.....	34
4.5	Sistema de monitoreo actual y propuesto en cada país	37
4.6	Costo del sistema de monitoreo actual y propuesto en cada país.....	43
V.	DISCUSIÓN	49
5.1	Importancia del sistema de monitoreo propuesto considerando vigilancia epidemiológica y cuarentenaria	49
5.2	Ventajas y desventajas del sistema de monitoreo propuesto.....	50
5.3	Metodología de transición del sistema de muestreo propuesto (de lo teórico a la aplicación)	51
VI.	CONCLUSIONES	53
VII.	RECOMENDACIONES.....	54
VIII.	LITERATURA CITADA	55
IX.	ANEXOS	62

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cantidad promedio de parcelas monitoreadas por año en los países del estudio...	19
Cuadro 2. Información disponible según el método de monitoreo en los países considerados en el estudio	21
Cuadro 3. Información de las bases de datos por año y mes de los países considerados en los cinco años de estudio.....	23
Cuadro 4. Variables de mayor importancia en el desarrollo de la roya anaranjada del café según análisis de <i>Random Forest</i> en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana	30
Cuadro 5. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según variedades en Honduras (2017-2018) con pruebas de comparación de medias DGC (Alfa=0,05).....	31
Cuadro 6. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según altitud en Honduras (2017-2018) con pruebas de comparación de medias LSD Fisher (Alfa=0,05).....	31
Cuadro 7. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según variedades en El Salvador (2017-2018) con pruebas de comparación de medias DGC (Alfa=0,05).....	32
Cuadro 8. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según altitud en El Salvador (2017-2018) con pruebas de comparación de medias LSD Fisher (Alfa=0,05).....	32
Cuadro 9. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según variedades en Panamá con pruebas de comparación de medias DGC (Alfa=0,05)	33
Cuadro 10. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según altitud en Panamá con pruebas de comparación de medias LSD Fisher (Alfa=0,05)	33
Cuadro 11. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según variedades en República Dominicana con pruebas de comparación de medias DGC (Alfa=0,05).....	34
Cuadro 12. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según altitud en República Dominicana con pruebas de comparación de medias LSD Fisher (Alfa=0,05).....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujos del ciclo patológico de <i>Hemileia vastatrix</i> (líneas continuas) y factores que lo afectan (líneas discontinuas). Adaptado y modificado por Avelino <i>et al.</i> (2004).....	10
Figura 2. Factores que influyen en el desarrollo de la roya anaranjada (<i>Hemileia vastatrix</i>). Adaptado y modificado por Avelino <i>et al.</i> (2006).....	12
Figura 3. Ubicación del área de estudio.....	17
Figura 4. Condicionales para establecer el sistema de monitoreo de la roya anaranjada en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana según lo propuesto por Madden <i>et al.</i> (1996) y Madden y Hughes (1999).....	26
Figura 5. Tamaño de muestra considerando la incidencia esperada y observada de la roya anaranjada en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana.....	27
Figura 6. Aumento del tamaño de muestra considerando un incremento de la incidencia de la roya anaranjada en el mes anterior en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana.....	27
Figura 7. Curvas de incidencia de la roya anaranjada del café en Honduras por categoría y meses de monitoreo.....	35
Figura 8. Curvas de incidencia de la roya anaranjada del café en El Salvador por categoría y meses de monitoreo.....	36
Figura 9. Curvas de incidencia de la roya anaranjada del café en Panamá por categoría y meses de monitoreo.....	36
Figura 10. Curvas de incidencia de la roya anaranjada del café en República Dominicana por categoría y meses de monitoreo.....	37
Figura 11. Sistema de monitoreo actual en Honduras.....	38
Figura 12. Sistema de monitoreo propuesto en Honduras, agregando a priori 10 parcelas a cada categoría por mes de monitoreo.....	39
Figura 13. Sistema de monitoreo actual en El Salvador.....	40
Figura 14. Sistema de monitoreo propuesto en El Salvador.....	40
Figura 15. Sistema de monitoreo actual en Panamá.....	41
Figura 16. Sistema de monitoreo propuesto en Panamá.....	41
Figura 17. Sistema de monitoreo actual en República Dominicana.....	42
Figura 18. Sistema de monitoreo propuesto en República Dominicana.....	43
Figura 19. Costo del sistema de monitoreo actual en Honduras.....	44
Figura 20. Costo del sistema de monitoreo propuesto en Honduras.....	44
Figura 21. Costo del sistema de monitoreo actual en El Salvador.....	45
Figura 22. Costo del sistema de monitoreo propuesto en El Salvador.....	45
Figura 23. Costo del sistema de monitoreo actual en Panamá.....	46
Figura 24. Costo del sistema de monitoreo propuesto en Panamá.....	47
Figura 25. Costo del sistema de monitoreo actual en República Dominicana.....	48
Figura 26. Costo del sistema de monitoreo propuesto en República Dominicana.....	48
Figura 27. Propuesta para la validación del nuevo método de monitoreo de la roya anaranjada del café en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana.....	52

LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

CENTA: Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal

CIRAD: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)

FNC: Federación Nacional de Cafeteros

IHCAFE: Instituto Hondureño del Café

IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

INDOCAFÉ: Instituto Dominicano del Café

OIRSA: Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria

ONG: Organizaciones No Gubernamentales

MIDA: Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá

PROCAGICA: Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roca del Café

PROMECAFE: Programa Regional Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura

SAT: Sistemas de Alerta Temprana

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SPATS: Sistema Participativo de Alertas Tempranas Sanitarias

RESUMEN

La roya anaranjada es una de las enfermedades más importantes del café. Tiene un ciclo de infección simple, pero causa epidemias policíclicas y poliéticas, estas determinadas principalmente por variables ambientales. La fuerte epidemia del 2012 generó pérdidas de 2,7 millones de sacos de café en el periodo 2012-2013 en Centroamérica y República Dominicana. La agresividad, impacto y evolución de la enfermedad ha forzado a que los institutos del café y las ONG establezcan medidas inmediatas y sistemas de monitoreo para mitigar y controlar las afectaciones en la región. La mayoría de estas herramientas de monitoreo no tienen base científica sólida que respalde el número de parcelas necesarias. Los muestreos se realizan con igual tamaños de muestra en todos los meses del año sin considerar la tendencia epidemiológica del hongo. Además, en algunos países el esfuerzo de muestreo es intenso y la variabilidad de los datos y los costos del monitoreo son altos. En otros casos, el monitoreo simplemente depende de un presupuesto anual, o es parte de un sistema integral que incluye otras actividades de manejo. En este trabajo se propone un método territorial costo-eficiente y confiable de muestreo de la roya del café con fundamentos estadísticos, a escala nacional, en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana con la finalidad de lograr una armonización de estas metodologías a nivel centroamericano y del caribe. Para la estimación del tamaño de muestra del método propuesto, primero se definieron las variables más importantes para la incidencia de roya usando la técnica Random Forest, donde predominaron la altura y la variedad. Con este resultado se formaron categorías que optimizan el método de muestreo y reducen la variabilidad. Se desarrolló un modelo con distribución beta-binomial para definir los parámetros p (proporción), $e.e$ (error estándar) y ρ (coeficiente de agregación), necesarios para estimar el número de parcelas. Como parte del proceso se tomó en cuenta la proporción de incidencia y los umbrales de riesgo por mes de monitoreo para determina el tamaño de muestra para lograr una precisión. Si el valor de ρ es significativo, la estimación se realiza usando la distribución beta binomial; si no lo es, se realiza con distribución binomial. Los sistemas de monitoreo actual y el propuesto se sometieron a valoración económica para identificar la factibilidad de ambos. Los resultados muestran que la estimación del tamaño de muestra propuesto usando distribución binomial y betabinomial, incluyendo el error estándar y el coeficiente de agregación, mejoran la precisión y eficiencia del sistema. También se considera el comportamiento epidemiológico de la roya para aumentar o disminuir el esfuerzo de monitoreo a lo largo del año. El sistema propuesto disminuye los costos de muestreos en los países estudiados, excepto en República Dominicana, que es importante para el mantenimiento del monitoreo a largo plazo.

Palabras claves: estimación, random forest, binomial, beta binomial, sistema de monitoreo, optimización, variabilidad, costos.

ABSTRACT

Coffee rust is one of the most important diseases of coffee. It has a simple infection cycle but causes polycyclic and polycyclic epidemics, depending of several environmental variables. The strong epidemic of 2012 generated losses of 2.7 million bags of coffee in the period 2012-2013 in Central America and the Dominican Republic. The aggressiveness, impact and evolution of the disease has forced the coffee institutes and NGOs to establish immediate actions and monitoring systems to mitigate and control the affectations in the region. Most of these monitoring tools have no solid scientific basis to support the sample size required. Sampling is done with equal sample sizes in all months of the year without considering the epidemiological tendency of the Coffe rust. In addition, in some countries the sampling effort is intense and the variability of the data and monitoring costs are high. In other cases, monitoring simply depends on an annual budget, or is part of a comprehensive system that includes other management activities. This paper proposes a cost-efficient and reliable territorial method of coffee rust sampling with statistical foundations, at a national level, in Honduras, El Salvador, Panama and the Dominican Republic with the aim of achieving a harmonization of these methodologies at a Central American and the Caribbean. To estimate the sample size of the proposed method, the most important variables were first defined for the incidence of rust using the Random Forest technique, where height and variety were selected. With this result, categories were formed to optimize the sampling method and reduce variability. A model with beta-binomial distribution was developed to define the parameters p (proportion), $e.e$ (standard error) and ρ (aggregation coefficient), necessary to estimate the sample size. As part of the process, the incidence rate and the risk thresholds per month of monitoring were taken into account to determine the sample size to achieve more precision. If the value of ρ is sinnificative, the estimation is made using the binomial beta distribution; if it is not, it is done with binomial distribution. The current and proposed monitoring systems were subjected to economic valuation to identify the feasibility of both. The results show that the estimation of the proposed sample size using binomial and beta-binomial distribution, including the standard error and the aggregation coefficient, improve the accuracy and efficiency of the system. The epidemiological behavior of coffee rust is also considered to increase or decrease the monitoring effort throughout the year. The proposed system reduces the costs of sampling in the countries studied, except in the Dominican Republic, which is important for the maintenance of long-term monitoring.

Key words: estimation, randomforest, binomial and beta binomial, monitoring system, optimization, variability, costs.

I. INTRODUCCIÓN

La epidemia de la roya del café es causada por el hongo *Hemileia vastatrix*. En 1970 llegó a América, primero invadió Brasil, y en 1986 alcanzó casi todas las áreas en América del Sur y Central donde se cultiva el café (MCCook 2006; MCCook 2008). La roya se basa en un ciclo de infección simple, sin embargo, es capaz de generar epidemias policíclicas en una estación y poliéticas durante temporadas sucesivas. Por esta razón un gran número de variables ambientales pueden influir para que el hongo se desarrolle a plenitud (Avelino *et al.* 2004). Según Avelino y Rivas (2013), variables biofísicas, características productivas del hospedero y aspectos del manejo son los principales factores que afectan la epidemia. La lluvia transporta las uredosporas a corta distancia y el agua favorece su germinación hasta que penetra el tejido de la hoja (Gálvez *et al.* 1980; Santacreo *et al.* 1983b; Holguín 1985). El viento también participa en la dispersión en seco de las esporas (Phiri *et al.* 2001).

Otra de las variables importantes en el desarrollo de la roya es la temperatura. El periodo de incubación se acorta en momentos en que las temperaturas no son muy altas ni muy bajas. También las altas incidencias y la tendencia de la curva de la roya varían según los estratos altitudinales (Avelino y Rivas 2013). A mayor altitud y menor carga fructífera menor incidencia, a menor altitud y mayor carga fructífera mayor incidencia (Avelino y Savary 2002; Avelino *et al.* 2006). La variedad es también un factor de gran influencia para el desarrollo de la roya (Avelino y Rivas 2013); por esta razón en Colombia se está cuadruplicando el uso de las variedades resistentes sobre las susceptibles (Ángel 2019). Finalmente, la sombra es otro de los factores relevantes en el desarrollo de *H. vastatrix*, aunque su efecto es controvertido. El año 2012 presentó una extensa época seca y cortos periodos secos intercalados en la época lluviosa. Bajo estas condiciones, la disponibilidad de sombra en las cafetales pudo haber disminuido el efecto agresivo de la roya (Avelino y Rivas 2013).

Las epidemias de roya han sido fuertes en Centroamérica desde 2012, generando pérdidas cuantiosas. La producción de café se redujo considerablemente: un 16% en 2013 comparado con 2011-12 y un 10% en 2013-14 en comparación con 2012-13. En el ciclo 2012–2013 la producción decayó, generando pérdidas de aproximadamente 2,7 millones de sacos en Centroamérica y República Dominicana. La enfermedad presentó alta tasa de incidencia: 74% en El Salvador, 70% en Guatemala, 37% en Nicaragua y 25% en Honduras. Además, provocó un impacto socioeconómico muy significativo y alarmante en la región (Avelino *et al.* 2015; FEWS NET *et al.* 2016).

Según algunas investigaciones, entre mayor sea la producción de café mayores serán los riesgos de ataque de la enfermedad porque se incrementa la receptividad de las hojas a la roya (Avelino *et al.* 1993; Avelino *et al.* 2004; Avelino *et al.* 2006; Costa *et al.* 2006). En El Salvador, para el ciclo 2012/2013, se esperaba una producción por encima de la obtenida en el ciclo anterior (2011/2012); ese alto pico de producción lo convirtió en el más susceptible al ataque de la enfermedad en la región, generando pérdidas elevadas y un declive de la producción

que hasta la actualidad no se ha logrado estabilizar. En el ciclo 2013/2014 a nivel nacional se sufrió una pérdida del 55% de la producción considerando como base la producción del ciclo 2011/2012, y apenas se ha logrado recuperar el 20% al ciclo 2015/2016 (Avelino *et al.* 2004; Avelino *et al.* 2006; Costa *et al.* 2006; Lopez-Bravo *et al.* 2012; Cerda *et al.* 2017).

A raíz de los ataques severos de roya y para evitar la reproducción y expansión de la enfermedad, se han establecido medidas inmediatas y planes territoriales de muestreo con el fin de frenar y controlar las afectaciones en Centroamérica. Existen sistemas de monitoreo de la incidencia con parcelas permanentes y temporales, donde se realizan frecuentes visitas y esfuerzos de muestreos muy diferentes entre países, pero no tienen una base científica sólida que respalde el número de parcelas que están muestreando. Las instituciones ejecutan métodos que tienen un tamaño de muestra similar todos los meses del año sin considerar la tendencia epidemiológica de la enfermedad.

Algunos países tienen un método con un elevado número de parcelas que les da seguridad en las estimaciones de la incidencia, sin embargo, la variabilidad de los datos y los costos de muestreo son altos. Otros han definido el tamaño muestral según un presupuesto anual limitado, o simplemente consideran el monitoreo como parte de un sistema integral que incluye otras actividades de manejo en las fincas. Por esta razón, en este trabajo se propone un método territorial costo-eficiente y confiable de muestreo de la roya del café (*Hemileia vastatrix*), con fundamentos estadísticos a escala nacional en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana, para lograr una armonización de estas metodologías a nivel centroamericano. La importancia de esta investigación radica en optimizar los sistemas actuales proponiendo métodos y herramientas que mejoran la precisión y confiabilidad de los sistemas, y disminuyan los costos de muestreos si es posible. Lo descrito se logra con la categorización según las variables más influyentes en la enfermedad y la estimación del tamaño de muestra tomando en cuenta el error estándar y coeficiente de agregación con distribución binomial y beta binomial.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Proponer un método territorial eficiente y confiable de muestreo de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) con fundamentos estadísticos a escala nacional en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana para lograr una armonización de estas metodologías a nivel centroamericano.

1.1.2 Objetivos específicos

- Describir y evaluar la eficiencia y la confiabilidad de los métodos territoriales de muestreo que se están aplicando en los países de influencia de PROCAGICA para la toma de decisiones sobre el control de la roya de café.

- Proponer mejoras a cada uno de estos métodos territoriales de muestreo para volverlos más eficientes y confiables, y facilitar su armonización con el fin de establecer una red regional de vigilancia.

1.2 Hipótesis

No hay efecto de los años, de las épocas del año, de la diversidad de manejo, de las condiciones productivas y de la topografía sobre la incidencia de la roya.

1.3 Preguntas de investigación

- a) ¿Cuál es la variabilidad de los datos recopilados por los métodos territoriales de muestreo de Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana?
- b) ¿Cuál es la variabilidad de los datos por fecha de monitoreo, por año (relacionado con precio, clima, producción), por tipo de finca (topografía, producción, manejo)?
- c) ¿Cuál es la inversión económica del monitoreo actual?
- d) ¿Cuál es la relación costo-variabilidad-confiabilidad del monitoreo?
- e) ¿Cómo integrar la información obtenida con los sistemas de monitoreo actuales para proponer un método territorial de muestreo más eficiente y confiable?
- f) ¿Qué armonización de método se puede proponer?

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Agente responsable, taxonomía, descripción, hospederos y síntomas

La roya del cafeto es causada por el hongo *Hemileia vastatrix*. El género *Hemileia* tiene alrededor de 50 especies (Aime 2006), sin embargo, únicamente dos son capaces de causar daños al café (*H. vastatrix* y *H. coffeicola*). *H. coffeicola* es un hongo que provoca la roya harinosa del café, identificada únicamente en África. La roya anaranjada (*Hemileia vastatrix*) ha tomado este pseudónimo para marcar una diferencia ante la roya harinosa. Este hongo se multiplica por uredospora, la cual es reniforme, equinulada sobre su mitad superior y lisa en la parte ventral. Este aspecto le dio el nombre al género, que significa mitad-liso. El hongo además produce teliosporas y basidiosporas (Rayner 1972; Coutinho *et al.* 1995; Fernandes *et al.* 2009), que se producen con frecuencia en las lesiones viejas (Coutinho *et al.* 1995; Fernandes *et al.* 2009).

El género *Hemileia* pasó a ser clasificado dentro de la familia de las *Chaconiaceae*, después de que estudios moleculares confirmaran que estaba más cercano a esta familia que a las *Pucciniaceae* (Cummins y Hiratsuka 2003). Según Aime (2006), se considera que *H. vastatrix* está alejado de *Puccinia* y muy cercano a *Maravalia cryptostegiae* (familia *Chaconiaceae*). Además, este autor propone que ambos hongos sean movidos a la familia de las *Mikronegeriaceae* por su cercanía con *Mikronegeria alba*. En el árbol de las royas, *H. vastatrix* tiene una posición basal, por ello es considerada una roya primitiva. El hongo se clasifica como phylum: *basidiomycota*, clase: *urediniomycetes*, orden: *uredinales*, familia: *chaconiaceae*, género: *Hemileia*, especie: *vastatrix*.

La roya causada por *H. vastatrix* es un parásito obligado que afecta las hojas vivas de las especies del género *Coffea*, siendo *C. arabica* el más atacado. Los síntomas iniciales de la enfermedad aparecen en el envés de las hojas, por donde penetra el hongo. Los síntomas de las afectaciones son pequeñas lesiones amarillentas que en el transcurso del tiempo se vuelven coalescentes, produciendo las uredosporas con su color anaranjado característico. En el haz de las hojas se observan manchas cloróticas y, finalmente, las lesiones se vuelven necróticas (Avelino y Rivas 2013).

Hasta ahora no se ha identificado ningún hospedero alternativo a la roya anaranjada. Aunque las basidiosporas germinan sobre el cafeto, no logran infectarlo (Saccas y Charpentier 1971; Fernandes *et al.* 2009), lo que genera la necesidad de investigar si el hongo depende de otro hospedero para completar su ciclo, quizás una orquídea (Rayner 1972). A causa de estos aspectos, antes se identificaba a la roya anaranjada como heteroica, pero sin hospedero alternativo conocido. En el sitio de origen, probablemente bosques tropicales, las royas eran autoicas con reproducción a través de teliosporas. Sin embargo, con la constante migración de sus hospederos a otros ecosistemas, algunas especies de royas evolucionaron dando nuevos tipos de esporas, afectando otra diversidad de hospederos, en la lucha por la supervivencia. Luego se generaron procesos de reducción del ciclo (Figueiredo y Passador 2008).

La roya anaranjada probablemente evolucionó cuando el Arábica emergió de su ecosistema original (el bosque), hacia un tipo de ecosistema más seco y con estaciones climáticas marcadas. La teliospora, de paredes celulares delgadas, no se adapta a estas condiciones. *Hemileia vastatrix* desarrolló y conservó únicamente una entidad de reproducción, la uredospora, de paredes gruesas, la cual se adapta para la supervivencia, dispersión, infección y reproducción sexual (Fernandes *et al.* 2009; Carvalho *et al.* 2011). La uredospora puede desarrollar un proceso de meiosis (Rajendren 1967). Esta reproducción sexual oculta se llamó criptosexualidad (Carvalho *et al.* 2011).

2.2 Crisis de la roya anaranjada (*Hemileia vastatrix*) en Centroamérica

La mayoría de los productores de café de América Latina tienen la capacidad de ser resilientes a las presiones de la roya anaranjada, y a grandes epidemias causadas por hongos. Tras los brotes de roya en los últimos años, las entidades gubernamentales y no gubernamentales dedicadas a la investigación han desarrollado gran cantidad de variedades resistentes con programas de mejoramiento; los híbridos Timor son ejemplo de resistencia a la mayoría de las razas de *H. vastatrix* que se han identificado en plantaciones de café (Avelino y Savary 2002).

Los híbridos Timor resultan del cruce entre *Coffea arabica* y *C. canephora*, generando las variedades agrupadas llamadas Catimor. Ejemplo de estos híbridos son el nativo de Colombia, variedades hondureñas como IHCAFE 90 y Lempira, o la variedad costarricense Costa Rica 95. La cantidad de variedades resistentes que se han generado y que están disponibles es muy aceptable, pero no ha sido la solución más eficiente para resolver totalmente el problema de la roya, porque no están utilizadas mayormente excepto en Honduras. Además, aunque existe una buena diversidad de variedades resistentes, la oferta de semilla y/o plantas de una fuente que garantice calidad y origen es muy limitada para la región centroamericana y República Dominicana. También, cambiar de variedades en un cultivo perenne como el café, requiere de alta inversión, cero o muy baja cosecha durante al menos dos años, y por lo tanto un ingreso reducido que los pequeños productores no pueden permitirse a menos que cuenten con un apoyo económico externo (Avelino 1999).

En los países centroamericanos, el café es uno de los productos agrícolas de mayor importancia por sus altos índices de producción y rentabilidad agrícola. Es relevante mencionar que Honduras, Guatemala, El Salvador, Costa Rica, Panamá, República Dominicana y Jamaica forman parte del PROMECAFE (Programa Regional Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura), y producen en conjunto alrededor del 20% del café exportado a nivel mundial. En países como El Salvador, Honduras, Nicaragua y Guatemala, la mano de obra del café es relevante como fuente clave de ingresos; este aspecto genera mayor seguridad financiera en las familias de pequeños productores. En estos países, la caficultura emplea a cerca de 1,8 millones de personas al año. Los ingresos obtenidos al desempeñar estas actividades son muy importantes sobre todo en zonas remotas, con pocas

oportunidades de alcanzar una seguridad alimentaria sustentable, o donde la diversificación de los cultivos es casi inalcanzable (FEWS NET *et al.* 2014).

En vista de que el café es uno de los rubros más importantes, es también un eje clave en la economía de los países centroamericanos. Sin embargo, como todo cultivo, es afectado por diversidad de plagas y enfermedades agresivas y de efecto leve. Por ejemplo, en 2012 la incidencia de la roya anaranjada (*Hemileia vastatrix*) alcanzó proporciones epidémicas en la región, afectando México y Centroamérica (Avelino *et al.* 2015). El hongo ataca a las plantas provocando pérdida foliar masiva y prematura, reduciendo la capacidad fotosintética. Las plantas afectadas disminuyen su tasa de floración, generando menor producción de cerezas de café. Las plantaciones de café se vuelven vulnerables a otras enfermedades cuando han sido afectadas por roya, causando mayor descenso de la productividad y vida útil de la plantación (Avelino y Rivas 2013).

Los países centroamericanos afectados por esta enfermedad han estimado las pérdidas durante y después de las epidemias; sin embargo, las estimaciones obtenidas son inciertas y difíciles de comparar entre países. Los niveles bajos de la producción durante y después de los años de las epidemias, en comparación con la producción anterior, no son un reflejo exacto de las pérdidas generadas por la enfermedad ya que se confunde con la variación natural de la producción entre años. Sin embargo, los datos de disminución de producción obtenidos son importantes para verificar o comparar la tendencia en relación con epidemias o afectaciones en años anteriores; además, pueden ser utilizados para desarrollar proyecciones para futuros ataques (Avelino *et al.* 2006).

La roya apareció en Colombia en 1983 (Buriticá Céspedes 2010), y en los años 2008 a 2011 disminuyó la producción en un 31% en comparación con 2007. El año de la epidemia fue el 2012 y su efecto en Centroamérica fue una reducción del 16% en la producción para la cosecha 2012-13, en comparación con la cosecha del ciclo anterior (2011-12). Durante esta crisis es importante mencionar la relevancia de dos casos: El Salvador y Costa Rica, que, según reportes, indicaron un aumento de la cosecha en el ciclo 2012-13 del 5% y 1%, respectivamente. Pero la producción de El Salvador se redujo en un 54% en 2013-14 en comparación con la cosecha 2012-13, teniendo como causa principal las afectaciones severas de roya en los cafetales. Un 10% adicional de la reducción en la producción, a nivel centroamericano, se registró para la cosecha 2013-14, en comparación al ciclo anterior. Los cafetales fuertemente afectados, en su momento requirieron *stumping* (recepta, poda baja a 40 cm del suelo) para renovar el tejido vegetativo y estimular una nueva producción. Por consiguiente, estas áreas empezaron a producir normalmente desde los ciclos 2015 a 2016; este último aspecto indica que los impactos de la roya prevalecieron por al menos tres años (Avelino *et al.* 2015).

En Colombia y Centroamérica, las epidemias de la roya del cafeto causaron grandes impactos sociales y dieron lugar a problemas de seguridad alimentaria, como resultado de la alta dependencia del café por parte de la mayoría de los productores y trabajadores. Muchos

productores de granos básicos, que en tiempos de cosecha de café se dedican a esta actividad, fueron afectados económicamente ya que muchos cafetales desaparecieron o no requirieron de gran cantidad de mano de obra por su baja producción.

En las zonas rurales la mayor demanda de recolectores es de octubre a marzo, que corresponde al período de cosecha cuando el 70% de los trabajadores son contratados temporalmente. En este proceso, los ingresos generados a partir de la recolección de café se utilizan para comprar suministros para el primer ciclo agrícola y para complementar la dieta de los hogares cuando la escasez de alimentos es bien marcada, generalmente de abril a agosto (Ruíz-García y Mendoza-Tijerino 2014; Avelino *et al.* 2015). Un caso particular es Colombia, donde según la Federación Nacional de Cafeteros (FNC), más de 500 000 familias crecen y obtienen sus medios de vida de la cosecha de café, y para más de 200 pueblos, el café es la única fuente de ingresos.

El empleo en Centroamérica disminuyó en un 16% en 2012-13 y en un 7% en 2013-14 debido a la epidemia de roya del café. Además, durante la cosecha 2013-14, el Programa Mundial de Alimentos en Honduras y Guatemala y Acción contra el Hambre en Nicaragua, reportaron una reducción de 13 a 27% en los salarios del café (FEWS NET *et al.* 2014). Debido a toda esta problemática, las personas empleadas para la cosecha de café y que dependían de esta actividad para establecer y manejar sus sistemas de producción, no podían aumentar el rendimiento de granos básicos debido a las precarias condiciones de sus cultivos; esto dificultó una compensación por las reducciones salariales y la posibilidad de satisfacer sus necesidades alimentarias. A estas dificultades se le suma que la mayoría de los cosechadores de café vienen de áreas que han sido afectadas por las condiciones de extremas sequías en los últimos dos años, y que ahora están experimentando estrés alimentario como resultado de la reducción de la producción de granos básicos (Avelino *et al.* 2015).

Además de la reducción en la producción, el precio internacional de otras variedades arábicas suaves cayó fuertemente en un 55% entre septiembre de 2011 y diciembre de 2013 (de 274 a 126 USD por 46 kg de café verde), mientras que los costos de producción alcanzaron su nivel más altos en la última década, por ejemplo: USD139 por 46 kg de café verde en 2012-13 en Costa Rica, un 109% más que en los últimos 10 años; y USD143 por 46 kg en 2011-12 en Guatemala, y un aumento de 97% de 2002 a 2003 (ICO 2014).

2.3 Plan regional de respuesta y sistemas de alerta temprana

En Centroamérica y República Dominicana la mayoría de los institutos del café, con el apoyo de diversas organizaciones, están desarrollando métodos y planes de muestreo como estrategia focalizada para el control temprano de plagas y enfermedades, principalmente roya. Así mismo se están utilizando sistemas informáticos con aplicaciones de telefonía móvil que facilitan la asistencia técnica para un eficiente manejo agronómico de las plantaciones. La

caficultura en la región ha reflejado una situación vulnerable al ataque de plagas y enfermedades (Avelino y Rivas 2013; Soto 2017).

El parque cafetalero tiene plantaciones viejas, compuesto por variedades susceptibles a la roya y sensibles por la poca inversión en mantenimiento. Ante esta problemática se han definido las siguientes áreas de actividad estratégica:

1. Investigación: En las áreas de producción/productividad, manejo del cultivo (eficiente), manejo integrado de plagas y enfermedades, manejo postcosecha y diversificación.
2. Producción: Fortalecer las capacidades de productores con énfasis en la extensión rural y transferencia de tecnologías.
3. La colaboración recíproca y explotación de las fortalezas de la región tales como condiciones agroecológicas favorables y el origen común (cultura, ambiente), sacar provecho de la organización regional existente y promover el financiamiento y la asistencia técnica, constituyen oportunidades y fortalezas propias de los países de la región de PROMECAFE.

PROMECAFE es una organización regional que fomenta y comparte las actividades de los sistemas de alerta temprana de cada país, además sirve como mecanismo de reunión en materia de conocimientos técnicos para el control de plagas y enfermedades del café. Actualmente establece nexos estratégicos que permiten proveer información climatológica necesaria para emitir alertas tempranas. Los eventos climáticos extremos generan condiciones óptimas para el incremento de ataques de plagas y enfermedades; en este contexto, las instituciones priorizan el control temprano de afectaciones de la roya.

Cada instituto cafetalero ha determinado las condiciones climáticas que son detonantes del aumento de la incidencia de roya; esta información facilita el monitoreo de la enfermedad. En los sistemas de alerta temprana del café se capacita a los productores para que desarrollen, de manera eficiente, el monitoreo de sus parcelas; también se promueve la participación y apoyo de técnicos agrícolas de las instituciones locales de cada país con el fin fortalecer la identificación de plagas/enfermedades; así mismo se facilita el desarrollo de destrezas y ejecución de las actividades de monitoreo y control a los agricultores (Soto 2017).

IICA ha generado el Sistema Participativo de Alertas Tempranas Sanitarias (SPATS) donde se priorizan cultivos y plagas, y se identifican las variables del SPATS y los factores críticos en interrelaciones cultivo-plaga-clima. Como parte del proceso, existe la metodología estándar para el monitoreo de las plantaciones de café, aunque su aplicación y efectividad depende directamente del involucramiento activo y constante de los productores.

También existe información sobre los factores que inciden en la magnitud de la enfermedad; algunos de ellos son relativos al manejo agronómico del cultivo, otros son parámetros de influencia directa en la incidencia del hongo, como altitud, manejo de sombra y

acidez del suelo (Soto-Cárdenas 2017). OIRSA (Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria) es otra de las organizaciones que está apoyando los sistemas de alerta temprana (SAT) que existen en la región de PROMECAFE. Para esta entidad, los elementos que deben componer estos SAT para el cultivo de café son sistemas de información de variables climáticas, conocimiento de fenología del cultivo, procedimientos de monitoreo de plagas y enfermedades estandarizados, plataforma de integración y análisis de la información, comité técnico especializado en SAT, el sistema de comunicación considerando las condiciones sociales y culturales propias de cada región y la unidad de supervisión, evaluación y seguimiento (Urías 2017).

La subregional de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), también está cooperando con esta región con un módulo WEB para SATCAFE. Esta herramienta reporta el promedio mensual de incidencia de la roya a nivel de país y departamental, mapa de incidencia de la roya, promedio mensual de incidencia de la roya por etapas fenológicas, por variedades y por estratos de altura y mapa de fincas muestreadas a nivel de país; la información se puede generar a nivel de un país, pero también a nivel de finca como incidencia mensual de café. Los mapas generados reflejan las variables climáticas y condiciones favorables para la roya (Carrasco 2017).

2.4 Ciclo patológico de la roya del cafeto

En el ciclo patológico de la roya, la infección depende siempre de una sola entidad infecciosa, la uredospora; por esta razón, aunque se haya reportado presencia de reproducción sexual dentro de esta entidad, el ciclo patológico usualmente aceptado no se altera. El ciclo puede iniciar, arbitrariamente, a partir de la diseminación y cuenta con diferentes fases; cada una de ellas es afectada por distintos factores (Figura 1). La diseminación se divide en tres sub-fases: liberación, en la que la uredospora se despega del esporóforo; dispersión, donde la espora abandona la lesión; y finalmente la deposición sobre la hoja (Avelino y Rivas 2013).

La siguiente etapa en este ciclo es la germinación. Se puede afirmar que aquí inicia el proceso infeccioso en un sentido generalizado, ya que la infección no está totalmente establecida porque el hongo se desarrolla partiendo de sus propias reservas. Cuando el hongo se interna en la hoja a través de los estomas, se marca el inicio de la tercera etapa. Durante esta penetración se desarrollan relaciones tróficas entre el hongo y el hospedero, generando la infección en un sentido estricto. La colonización de la hoja por las hifas permite la aparición de los primeros síntomas de manera visible.

La incubación es el periodo comprendido entre el inicio de la germinación y la expresión de los primeros síntomas (lesiones amarillentas); epidemiológicamente no es muy relevante debido a que en esta etapa todavía no se ha producido ninguna entidad infecciosa nueva (Avelino y Rivas 2013; Avelino *et al.* 2015). Después de la incubación, se desarrolla la esporulación, en esta etapa se da la emergencia posterior del esporóforo y la producción de nuevas uredosporas infecciosas. El periodo de latencia es el tiempo transcurrido entre el inicio

de la germinación y la esporulación, por esta razón se convierte en la variable de mayor importancia: cuánto más corto sea, más rápido podrá repetirse el ciclo, y más agresiva y devastadora será la epidemia (Avelino y Rivas 2013).

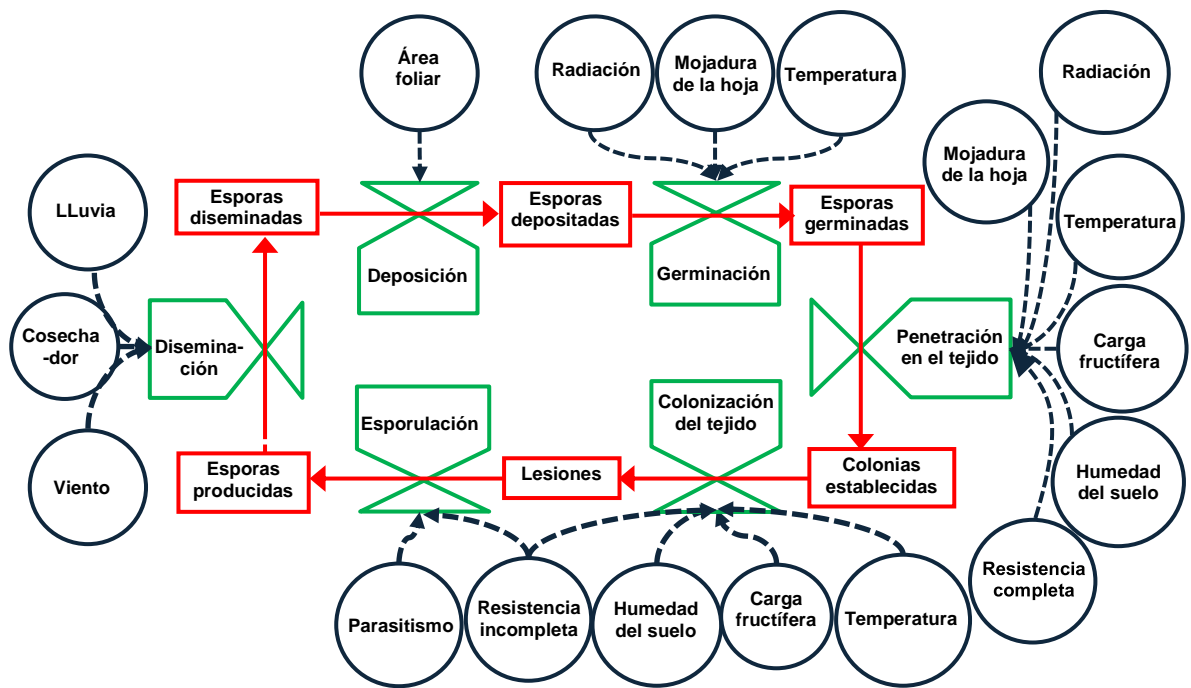


Figura 1. Diagrama de flujos del ciclo patológico de *Hemileia vastatrix* (líneas continuas) y factores que lo afectan (líneas discontinuas). Adaptado y modificado por Avelino *et al.* (2004)

La roya anaranjada como epidemia tiene dos fases principales. La primera es la formación del inóculo primario (inóculo inicial), responsable del desarrollo inicial de la epidemia. La segunda es la repetición del ciclo patológico (policiclo), y por consiguiente, la formación y desarrollo del inóculo secundario (Avelino y Rivas 2013). La severidad de la epidemia depende más del número de ciclos que se den al año, que de la cantidad de inóculo primario. En efecto, en el desarrollo de la roya, una sola lesión es capaz de producir gran cantidad de esporas, aun teniendo muy poco inóculo primario. Por esta razón es posible que se desarrolle una epidemia intensa y devastadora con poco inóculo primario pero con las condiciones adecuadas para la repetición del ciclo (Kushalappa *et al.* 1984). En las epidemias policíclicas es muy común lo anterior, pero en las monocíclicas, donde el patógeno sólo tiene una generación en el ciclo de producción del hospedero, la severidad de la epidemia dependerá fuertemente de la cantidad de inóculo primario (van der Plank 1963). El inóculo residual es el que provee mayor cantidad de inóculo primario (Mayne 1930) y está compuesto por las lesiones necrosadas y/o latentes en hojas de café que permanecen en la planta después de la época seca (Muthappa 1980; Avelino *et al.* 1991). El grado de defoliación después de la cosecha definirá la cantidad de inóculo residual que dará origen a la permanencia y expansión de la enfermedad. La defoliación es efecto de factores como la fuerte producción, desequilibrio nutricional, fuerte exposición al sol, bajo potencial hídrico del suelo y periodos de sequías muy largos.

Las podas sanitarias también disminuyen la cantidad de inóculo porque se eliminan las hojas enfermas. Sin embargo, las aplicaciones de fungicidas generan un efecto contrario, aumentando la cantidad de inóculo residual porque prolongan la vida de las hojas, incluyendo aquellas afectadas por roya (Avelino *et al.* 1995). En la mayoría de los casos, los factores que acentúan la defoliación del cafeto durante la época seca tienen intensidad variable en una misma plantación, es decir, sombra irregular, fertilidad del suelo heterogénea y diversificada, y una producción que varía en dependencia del manejo o edad del cafeto. Por esos factores tan diversificados, existe la posibilidad de encontrar focos de inóculo residual más o menos numerosos y dispersos en la plantación (Mayne 1939). La permanencia de hojas con roya en la plantación provoca que las lluvias de inicio de invierno reactiven la producción de esporas en lesiones necrosadas y/o latentes, formando el inóculo primario (Muller 1980; Muthappa 1980). La precocidad de la epidemia es influenciada por la alta cantidad de inóculo inicial, lo que ayuda a encontrar el momento oportuno para la aplicación de fungicidas preventivos (Avelino y Rivas 2013).

2.5 Incidencia y severidad de la roya anaranjada

La incidencia de roya es un porcentaje de hojas afectadas. En cambio, la severidad es el porcentaje promedio del área foliar afectada (Balmelli *et al.* 2009; Barquero 2013). En ciclos de alta producción, la incidencia puede alcanzar el 90% en variedades susceptibles bajo condiciones climáticas favorables. La tasa de defoliación en la cosecha depende del nivel de incidencia, de la senescencia foliar natural y de la operación de cosecha manual o mecánica. Después de un año de epidemia, con una producción baja, la incidencia de roya puede ser menor al 25%, incluso en condiciones climáticas favorables (Zambolim 2016). El muestreo de la severidad de roya en una plantación afectada, en la mayoría de los casos, se vuelve muy complicado; además consume tiempo y está sujeto a sesgos y grandes errores muestrales. Sin embargo, existe la posibilidad de evaluarla mediante la relación cuantificable con la incidencia; esto permite ventajas importantes para evaluar la intensidad de la enfermedad y la estimación de pérdidas de cosecha generadas por este patógeno (Seem 1984; Campbell y Madden 1990). Dichas bondades surgen porque la incidencia es un indicador de fácil medición, es decir, puede determinarse con mayor exactitud y precisión que la severidad, sin incurrir en grandes costos por ahorro de tiempo.

La relación incidencia-severidad ha sido publicada para diferentes patosistemas, ejemplo de algunos casos son los siguientes: *Erysiphe graminis* f. sp. *tritici* y *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* - *triticum aestivum* (James y Shih 1973), *Podosphaera leucotricha* - *Malus pumila* (Seem y Gilpatrick 1980), *Uromyces phaseoli* var. *typica* - *Phaseolus vulgaris* cv. Bountiful (Imhoff *et al.* 1982), *Mycosphaerella fijiensis* var. *Difformis* - banana (Chuang y Jeger 1987) y *Puccinia sorghi* - *Zea mays* (Dillard y Seem 1990). Según Rayner (1961) se identificó una relación lineal entre la incidencia de hojas de café con roya y el log₁₀ (número de lesiones por 100 hojas); sin embargo, este autor no facilitó la ecuación de regresión ni detalles del ajuste del modelo. Eskes y Toma-Braghini (1981) descubrieron una relación aceptable ($R^2 = 0,87$) para el log₁₀ (lesiones de roya por hoja de café), con logit (proporción de ramas con lesiones), la cual

fue estimada con diagramas pictóricos. Sin embargo, utilizar estas escalas diagramáticas estaría sujeto a un sesgo en el estimador con la posibilidad de un gran error. Cuando la severidad está altamente relacionada con la incidencia, esta se puede utilizar para estimar el grado de severidad (Seem 1984). Según Kranz (1968) y Rivillas *et al.* (2011) existe la posibilidad de encontrar correlación altamente significativa entre incidencia y severidad. Si una ecuación de regresión que considera la relación entre incidencia y severidad de la roya del café es verdadera en sitios y años diferentes, entonces se facilitará el programa de resistencia y control químico.

La relación incidencia-severidad en la roya anaranjada del café fue evaluada por Silva-Acuña *et al.* (1999) usando modelos estadísticos predictivos generales. Estos modelos pueden ser utilizados para estimar el área enferma y el promedio de lesiones esporulantes en las hojas. Estos datos ayudarían para definir un programa eficiente de la roya principalmente por control químico. La mayor ventaja de determinar esta relación es que disminuye el tiempo para estimar la severidad, porque la incidencia está altamente correlacionada con el número de lesiones esporuladas y con el área foliar con esporulación. Cualquiera de las dos variables se puede estimar considerando el objetivo definido.

2.6 Principales factores que afectan la epidemia de la roya

La roya anaranjada es una enfermedad muy común en cultivares de café; la intensidad de su ataque está vinculada a múltiples factores y depende de las interacciones que se desarrollen en el tetraedro de la enfermedad: hospedero, patógeno, ambiente y manejo (Zadoks y Schein 1979). Además, en esta enfermedad, factores biofísicos, características productivas del hospedero y características de manejo (Figura 2) afectan directamente la epidemia (Avelino y Rivas 2013).

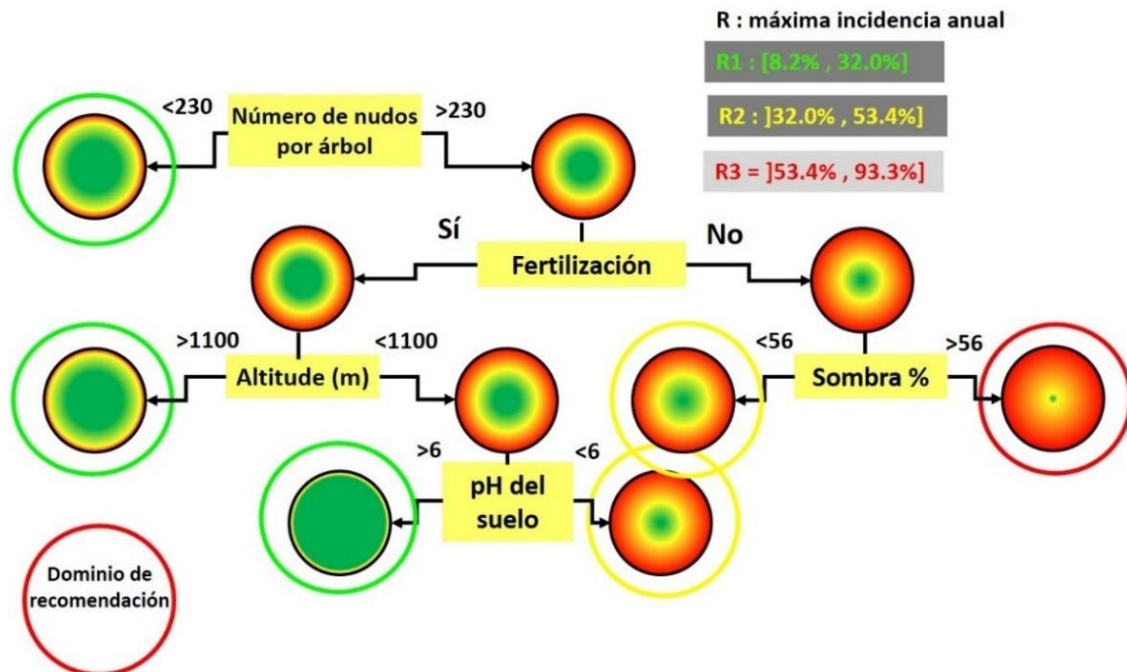


Figura 2. Factores que influyen en el desarrollo de la roya anaranjada (*Hemileia vastatrix*). Adaptado y modificado por Avelino *et al.* (2006)

Ambiente

La lluvia y el rocío

La lluvia facilita el transporte de las uredosporas a corta distancia, y la disponibilidad de agua líquida favorece su germinación hasta la penetración de la hoja. Esto explica por qué la epidemia tiene altas afectaciones durante la época lluviosa, no así en época seca (Gálvez *et al.* 1980; Santacreo *et al.* 1983b; Holguín 1985; Avelino *et al.* 1991). Es importante señalar que la época seca no necesariamente es un factor clave para evitar el desarrollo de la enfermedad, ya que el rocío puede fácilmente favorecer la germinación de las esporas en ausencia de lluvia (Muller 1975). El viento permite la dispersión en seco de las esporas, lo cual permite entender por qué los niveles de *Hemileia vastatrix* no se relacionan directamente con la cantidad de lluvia (Phiri *et al.* 2001; Avelino *et al.* 2006).

La temperatura y la altitud

El desarrollo de la roya anaranjada está muy vinculado a factores ambientales como la temperatura. En este caso, la germinación, la formación del apresorio y la progresión del hongo en la hoja dependen de esta variable. Esta dependencia genera que el periodo de incubación se acorte drásticamente en meses en que las temperaturas no son extremadamente altas ni demasiado bajas. Por ejemplo, en Honduras a 750 m de altitud, de febrero de 1982 a enero de 1983, los periodos de latencia oscilaron entre 29 y 62 días (Santacreo *et al.* 1983a). En agosto y septiembre fue cuando se identificaron periodos más cortos; en estos meses las temperaturas se mantuvieron entre 18°C y 27°C. En sitios con altitud de 1200 m, los periodos de latencia se extendieron debido a las temperaturas más bajas; estos fluctuaron entre 40 y 80 días. Así mismo, en El Salvador, a una altitud de 465 m, en un periodo de mayo de 1984 a septiembre de 1985, se determinaron periodos de latencia de 27 a 45 días (Moreno de Alas 1985). Los periodos de latencia más cortos se observaron en julio, agosto y septiembre, cuando las condiciones climáticas, específicamente la temperatura (entre 18,8 y 27,7°C) fueron más favorables a la epidemia.

Los aspectos anteriores detallan que los máximos de infección y la forma de la curva de progreso de la epidemia varían en función de la altitud. En algunos sitios de México, en el periodo de marzo de 1988 a abril de 1989, se observó que a mayor altitud los niveles de infección alcanzados eran menores (Avelino *et al.* 1991). Específicamente a 1100 m de altitud se determinó una infección máxima de 16% de hojas jóvenes enfermas; en altitudes menores, por ejemplo a 730 m, el porcentaje ascendió a 24%, y a 460 m fue de 32%. Así mismo, la precocidad de los ataques siguió la misma tendencia y secuencia. A 460 m de altitud se requirieron 206 días, partiendo del inicio del estudio, para poder alcanzar el 50% del desarrollo de la epidemia (mes de octubre), a 730 m se ocuparon 223 días (noviembre), mientras que a 1100 m se requirieron 305 días (enero). La altitud ha generado un efecto negativo sobre la roya anaranjada que ha sido descrito en todos los continentes (Bock 1962; Brown *et al.* 1995; Garçon *et al.* 2000; Bigirimana *et al.* 2012).

Hospedero (carga fructífera)

La resistencia fisiológica de la planta disminuye cuando la carga fructífera es alta, factor por el cual la roya fácilmente logra desarrollarse (Avelino *et al.* 1991; Zambolim *et al.* 1992; de Carvalho *et al.* 1993; Silva-Acuña 1994; de Carvalho *et al.* 1996; de Carvalho *et al.* 2001; Avelino *et al.* 2004; Avelino *et al.* 2006; Costa *et al.* 2006; Lopez-Bravo *et al.* 2012), por esta razón se ha convertido en uno de los factores más relevantes en el desarrollo de la epidemia (Kushalappa *et al.* 1984; Avelino *et al.* 2006; Meira *et al.* 2008).

La carga fructífera explica aproximadamente el 50% de la variabilidad de infección a escala de parcela (Avelino *et al.* 1993). En México (Holguín 1987), El Salvador (Moreno de Alas 1990) y Guatemala (Avelino *et al.* 1993), la epidemia tenía un comportamiento bienal paralelo al ritmo bienal de la producción de café (DaMatta 2004). Este aspecto tiende a subestimar el efecto de la enfermedad, ya que después de un año de mucha cosecha, siempre se espera un año de baja producción, con o sin roya (Avelino *et al.* 1993). Es importante mencionar que la epidemia de 2012 en Centroamérica fue tan intensa, que las afectaciones fueron muy elevadas aún en plantas con poca producción, rompiendo así, inusualmente, el ritmo bienal de la enfermedad (Avelino y Rivas 2013).

Manejo

Periodo de cosecha

La vulnerabilidad del cafeto a la roya al parecer se incrementa no sólo en plantas con una carga fructífera alta, sino también en una misma planta a medida que se desarrolla el fruto (Kushalappa *et al.* 1984). Este comportamiento se efectúa por la asociación entre el avance de la cosecha y el avance de la epidemia. En México se observó que el principio de la epidemia coincidió con el inicio de la cosecha. Así mismo, el rápido crecimiento de la epidemia ocurrió cuando la cosecha estaba bien establecida, observando la máxima infección al final de la cosecha. A partir de entonces la epidemia empezó a declinar (Avelino *et al.* 1991). A este comportamiento habría que sumarle el resultado del gran movimiento de los cosechadores durante la fase de recolección, lo que favorece la diseminación de las uredosporas (Becker y Kranz 1977). Lo descrito podría explicar que en condiciones normales no existan pérdidas de producción en el año de la epidemia, sino al año siguiente solamente, aunque no necesariamente es algo que va a suceder. La epidemia del 2012 en Centroamérica fue precoz, y causó defoliaciones y muertes de ramas prematuras, el secamiento del café antes de la cosecha, y pérdidas de producción en el mismo año de la epidemia (Avelino y Rivas 2013).

Sombra

El tema de la sombra como factor importante en el desarrollo de la roya anaranjada ha sido y sigue siendo muy debatido. Algunos autores consideran que la sombra incrementa la enfermedad (Staver *et al.* 2001), pero otros afirman que la reduce (Soto-Pinto *et al.* 2002), otros que la incrementa o que no hay efecto dependiendo del tipo de sombra (Salgado *et al.* 2007), o que la incrementa o que la reduce dependiendo de la carga fructífera (Avelino *et al.* 2004; Avelino *et al.* 2006). Desde luego, son múltiples las vías de acción que pueden estimularse por

la inclusión de plantas en el sistema agroforestal, y el balance de los efectos, por lo general opuestos, siempre son difíciles de establecer (Schroth *et al.* 2000; Avelino *et al.* 2011).

La sombra es un factor que puede afectar distintos procesos a través de una misma vía de acción, favorecer uno de estos procesos y simultáneamente desfavorecer otro. Por ejemplo, la sombra intercepta la radiación (una vía de acción) favoreciendo la germinación de la uredospora (un proceso), pero a la vez desfavorece la receptividad de la hoja en la penetración (otro proceso). La sombra es una variable que puede afectar un mismo proceso por medio de distintas vías de acción y también tener efectos opuestos. Por ejemplo, evita temperaturas extremas (una vía de acción), lo cual favorece la penetración (un proceso), que es desfavorecida a través del efecto regulador de la sombra sobre la carga fructífera (otra vía de acción). En parcelas con cobertura arbórea, la sombra suele favorecer un proceso a través de una vía de acción considerando ciertas condiciones, así mismo puede desfavorecerla bajo otras, o en otro momento. Por ejemplo, ayuda a conservar el agua libre procedente de las lluvias en la plantación (una vía de acción), favoreciendo la germinación y penetración. Sin embargo, bajo sombra, no hay rocío (otra vía de acción), única fuente de agua libre en días sin lluvia, desfavoreciendo estos procesos cuando no llueve (Avelino y Rivas 2013).

Así mismo, según Boudrot *et al.* (2016), la sombra es un factor relevante en la dispersión de las uredosporas en el aire. Existen interacciones entre parcelas bajo sombra/pleno sol y las condiciones meteorológicas. La lluvia, posiblemente interceptada por la cubierta arbórea y redistribuida por gotas de agua de mayor energía cinética, se convierte en el principal agente dispersor de uredosporas en parcelas bajo sombra. Sin embargo, las ráfagas de viento revirtieron este efecto, probablemente al inhibir la acumulación de rocío en las hojas; pero promovieron la dispersión en condiciones de sequía en parcelas a pleno sol, aunque no tuvieron efecto bajo condiciones de sombra, quizás porque el dosel bloqueó el efecto del viento. Por esta razón es necesario administrar la cobertura de sombra de manera diferencial en periodos lluviosos versus periodos secos con el fin de controlar la dispersión de uredosporas de roya en el aire. También la sombra disminuye los ataques de roya anaranjada porque reduce la carga fructífera, aunque las condiciones de microclima son mejores para el hongo en cafetales bajo sombra. Por esta razón la incidencia de roya será mayor en cafetales a pleno sol que bajo sombra si la carga fructífera es elevada en condiciones a pleno sol. Pero si las cargas fructíferas son equivalentes, se tendrá mayor porcentaje de incidencia bajo sombra (Lopez-Bravo *et al.* 2012).

Aunque los efectos de la sombra sobre el ciclo patológico de la enfermedad son relevantes, se debe considerar otros factores que afectan la epidemia en sí. El crecimiento del hospedero es uno de ellos, pues cuando es bueno (se incorpora gran cantidad de hojas sanas al sistema), tanto la incidencia como la severidad de la roya pueden disminuir, por un efecto de dilución de la enfermedad (Ferrandino 2008). La epidemia del 2012 en Centroamérica fue muy letal. Las mayores afectaciones fueron en parcelas a pleno sol. En este año durante la época lluviosa cayeron pocas lluvias, y con varios periodos secos cortos e intercalados. Considerando lo descrito, la sombra pudo haber ayudado a disminuir el impacto de la roya: interceptando el

rocío y eliminando la única fuente de agua libre durante los periodos secos inusuales, y mejorando el crecimiento de la planta de café al conservar más humedad en el suelo (Avelino y Rivas 2013).

Fertilización y calidad del suelo

La buena nutrición del hospedero no garantiza una alta resistencia fisiológica. Considerando este factor, la estrategia de infección del parásito es determinante. Existen patógenos necrotróficos que prefieren los tejidos senescentes y necesitan romper las células del hospedero para adquirir sus nutrientes, en tal caso una buena nutrición mineral puede ayudar a la resistencia de la planta. Sin embargo, también existen patógenos biotróficos, como *Hemileia vastatrix*, que necesitan células vivas del hospedero para su propio desarrollo, en tal caso el efecto de la nutrición es menos claro. También es importante considerar los efectos de la nutrición sobre la epidemia a través del crecimiento y desarrollo del hospedero (Avelino y Rivas 2013). En Honduras, la incidencia de roya era menor en parcelas fertilizadas comparadas con parcelas no fertilizadas (Avelino *et al.* 2006). La razón sería el mejor crecimiento del hospedero y el efecto de dilución de la enfermedad (Ferrandino 2008). Algunos de los fuertes impactos de la roya, como el del 2008-2011 en Colombia, se atribuyeron en parte al poco uso de fertilizantes, lo que favoreció el deficiente crecimiento y recuperación de las plantas (Cristancho *et al.* 2012).

La incidencia y severidad de la roya han sido vinculadas con características y aspectos del suelo. En algunos sitios como en Nueva Caledonia, suelos con pH entre 4,7 y 6,5 con contenidos de materia orgánica menores a 3%, resultaron ser óptimos para el desarrollo de la roya (Lamouroux *et al.* 1995). En Honduras, también se observó un comportamiento similar, con una relación positiva entre el pH del suelo y la incidencia de la enfermedad (Avelino *et al.* 2006). Considerando lo indicado, se ha definido como hipótesis que la acidez del suelo puede afectar la absorción de algunos elementos importantes para la rigidez de las paredes celulares, como el calcio, lo que podría facilitar el avance intercelular de la roya. Aunque la fertilización y calidad del suelo al parecer están asociados con el ataque de la roya, las investigaciones actuales no dejan claro cómo mejorar la nutrición del café para aumentar su resistencia fisiológica. Sin embargo, está confirmado que una planta bien nutrida tendrá el crecimiento óptimo para reponer hojas perdidas por hojas nuevas y mantener las ramas vivas (Avelino y Rivas 2013).

III. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación del área de estudio

El estudio se desarrolló con información relevante de Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana (Figura 3). Para efecto de la investigación, se consideraron datos técnicos y económicos de los sistemas de monitoreo que emplean los ministerios e institutos nacionales del café (públicos y privados). Los sistemas son ejecutados con apoyo de la FAO y OIRSA, los cuales han creado métodos y aplicaciones para mejorar los muestreos de la roya. También se consultaron técnicos, productores, organismos y entes regionales que analizan, consolidan y fomentan la posición del sector cafetalero de la región. En Honduras la información se obtuvo a través del Instituto Hondureño del Café (IHCAFE), en El Salvador con el Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA), en Panamá con el Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá (MIDA) y en República Dominicana con el Instituto Dominicano del Café (INDOCAFÉ). IICA y CIRAD actuaron como instituciones intermediarias para la obtención de los datos.

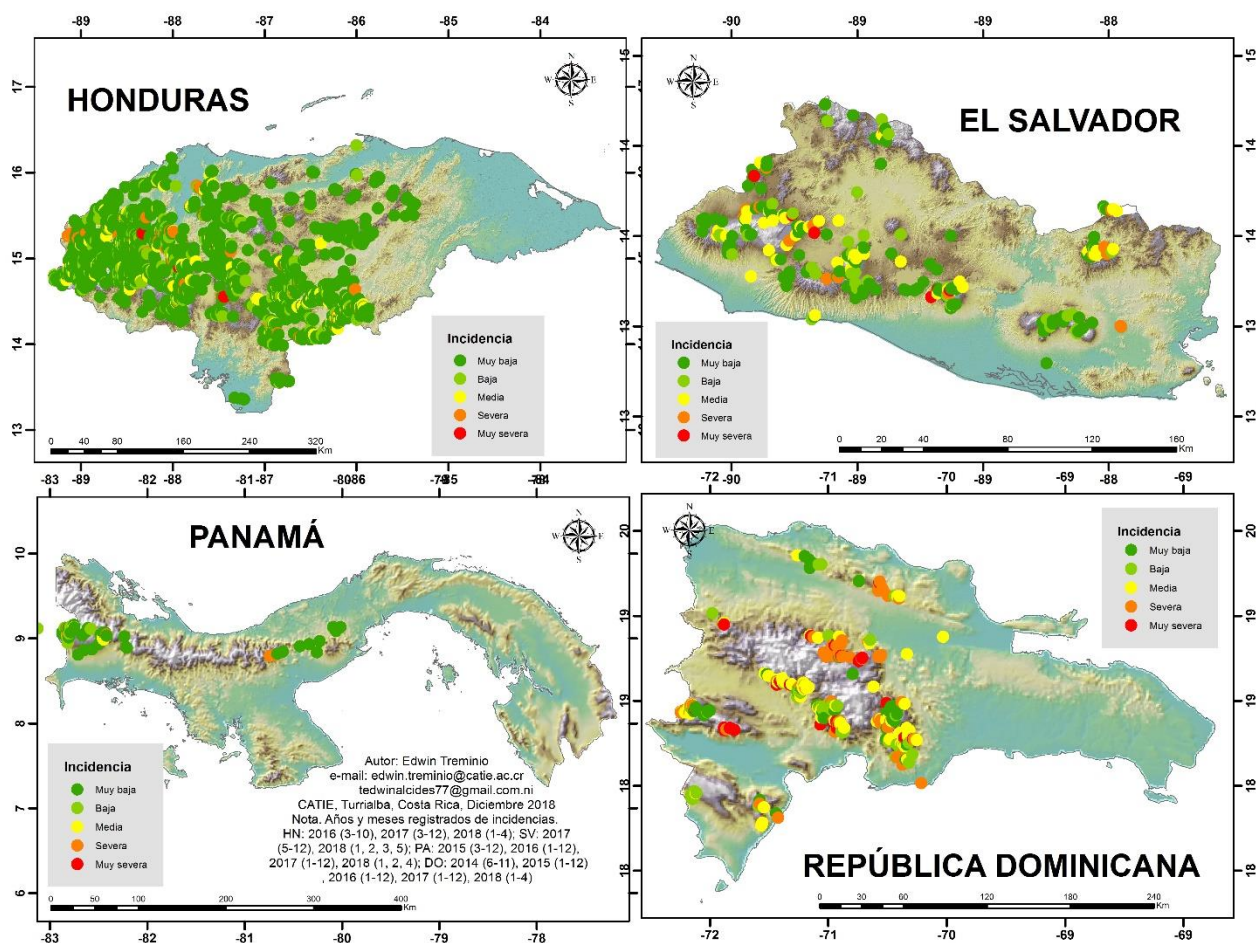


Figura 3. Ubicación del área de estudio

3.2 Depuración y estandarización de las bases de datos de los sistemas de monitoreo

Ante las afectaciones de la roya en los últimos años, la preocupación por desarrollar y aplicar métodos de muestreo como parte de sistemas de alerta temprana se ha convertido en un tema de alta prioridad para caficultores, instituciones e investigadores. Sin embargo, la diversidad de condiciones entre y dentro de los países genera mayor incertidumbre en la eficiencia y confiabilidad de dichos métodos; esto ha generado que las acciones de control y monitoreo se aborden de acuerdo a las condiciones de cada país en particular (Soto 2017).

Los institutos socios de PROMECAFE están empleando sistemas de alerta temprana y avisos de alerta utilizando dispositivos informáticos (móviles, radio, televisión y prensa). Además, han determinado las condiciones climáticas que favorecen la roya. La multiplicidad de variables que influyen en el desarrollo del hongo constituye un área de investigación permanente de PROMECAFE, actor clave en el proceso. Ante brotes de epidemias como la del 2012, ya existen métodos estandarizados e instrumentos para efectuar monitoreos de las plantaciones (Método 3021 OIRSA), así como herramientas informáticas (Aplicación móvil SAT de FAO, Coffee Cloud de DAI/USAID, Aplicación móvil SAT de OIRSA, SPATS del IICA). Las actividades de monitoreo juegan roles importantes para medir los niveles de incidencia de roya en los cafetales. Las plantaciones se encuentran en condiciones ambientales y de manejo muy particulares. Identificar y predecir las condiciones que favorecen el desarrollo de la enfermedad, sirve parcialmente para emitir alertas individualizadas, donde la información asertiva depende directamente de la ejecución de los métodos.

Las bases de datos generadas por el SAT-OIRSA y SAT-FAO se originan de muestreos a nivel nacional. Se consideran lotes (parcelas) de café iguales o menores a una hectárea, seleccionados al azar de una lista de fincas en una región o país. En cada lote, el técnico se ubica en el primer surco y escoge una planta de la cual toma dos bandolas opuestas del tercio medio-superior con mayor follaje; de estas bandolas registra el total de hojas evaluadas y hojas con roya. El encargado del muestreo recorre la parcela entre surcos; en cada uno selecciona un árbol hasta completar 30. Cuando la parcela tiene menos de 30 surcos, se consideran dos árboles/surco hasta completar 30. Si tiene más de 30 surcos, se muestrea un árbol cada dos surcos. La edad de la plantación o de la última recepa debe tener entre 1 y 20 años (Gamboa y Urías 2014).

En el 2016 (de marzo a octubre), bajo el método diseñado por OIRSA, Honduras monitoreó 600 parcelas por mes (50% permanentes y 50% móviles). Al iniciar el 2017 se optó por emplear el SAT-FAO; en ese año realizaron muestreos desde marzo hasta diciembre, con un promedio de 690 parcelas por mes. En el 2018, el estudio consideró los muestreos de los primeros cuatro meses con una media de 680 parcelas. Desde marzo a agosto del 2017, el 100% de las parcelas eran permanentes; de septiembre del 2017 a marzo del 2018, 42 parcelas eran móviles y 48 permanentes en Olancho (sitio con brote agresivo de roya); en el resto del país todas siguen siendo permanentes (Cuadro 1).

En El Salvador se monitorearon 500 parcelas fijas/mes de enero a diciembre del 2016 con un método convencional de CENTA. En mayo de 2017 utilizaron el SAT-FAO, y desde entonces hasta diciembre del mismo año muestrearon en promedio 170 parcelas/mes. En este país, la investigación consideró el registro de los primeros cinco meses de monitoreo en 2018, sin embargo, abril no contiene información porque en ese mes finalizó la primera consultoría (de mayo 2017 a marzo 2018); a partir de mayo al presente se contrató nuevamente el grupo de consultores de CENTA para volver aplicar el sistema de monitoreo y otras actividades. En esos primeros meses se muestreó un promedio de 180 parcelas (Cuadro 1). Todas las parcelas monitoreadas bajo el SAT-FAO son fijas; además es menor la cantidad con respecto al 2016, por razones económicas (poco presupuesto).

En Panamá, desde el 2015 al 2018 han empleado el SAT-FAO con parcelas fijas. En el 2015 monitorearon mensualmente un promedio de 17 parcelas, desde marzo a diciembre. El siguiente año monitorearon 35 lotes/mes (de enero a diciembre). En el 2017 el tamaño de muestra promedió 22 lotes/mes (de enero a diciembre). Al igual que los demás países, en Panamá se consideró la información de los primeros meses de monitoreo en el 2018 (enero, febrero y abril), con una media de 4 parcelas/mes (Cuadro 1).

República Dominicana es un caso particular, porque tiene información desde el 2014, y además realiza dos monitoreos al mes. Al igual que los demás países, utiliza el SAT-FAO para sus muestreos de roya. En el 2014 monitorearon un promedio de 10 parcelas/mes (de junio a noviembre); al iniciar 2015 realizaron muestreos mensuales en 60 parcelas (de enero a diciembre). En el 2016 y 2017 también monitorearon los 12 meses del año con una media de 90 y 40 lotes, respectivamente. En el 2018, el estudio tomó en cuenta la información de los primeros cuatro meses (enero a abril), registrándose una media de 15 parcelas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Cantidad promedio de parcelas monitoreadas por año en los países del estudio

País	Año				
	2014	2015	2016	2017	2018
Honduras	-	-	600	690	680
El Salvador	-	-	500	170	180
Panamá	-	17	35	22	4
República Dominicana	10	60	90	40	15

Las bases de datos se depuraron y estandarizaron en su totalidad. Como parte de la depuración se utilizó el protocolo desarrollado por Casanoves *et al.* (2017) que considera la unificación de criterios para bases de datos, codificación de variables de clasificación y detección de errores. Con este protocolo se detectaron valores fuera de rango, considerando valores máximos y mínimos y se identificaron valores atípicos a través de revisiones lógicas con fórmulas y funciones matemáticas, como logaritmos, raíces, potencias, etc. Para la detección de posibles valores extremos se usaron datos estandarizados considerando la curva normal, donde aproximadamente el 99,9% de los datos debería estar entre -3,5 y 3,5 desvíos

estándar. Las variables cualitativas (categóricas) se depuraron al corregir nombres repetidos o errores ortográficos. Los valores atípicos para una relación se detectaron a través de diagramas de dispersión.

3.3 Información disponible en cada país y descripción de las variables respuesta y de clasificación

La aplicación de los sistemas de monitoreo a nivel nacional genera bases de datos con variables cualitativas (nominales y ordinales) y cuantitativas (continuas y discretas) vinculadas a la incidencia de roya. Existen datos en común en los cuatro países, y otros particulares a cada uno de ellos o específicos de un año y/o método de monitoreo. A continuación, se describen las principales variables evaluadas (Cuadro 2):

Fecha: Días y meses de monitoreo, generalmente desde enero a diciembre de un año determinado. Los países registran un muestreo al mes, excepto República Dominicana que monitorea quincenalmente. En promedio el muestreo de la parcela tarda entre 30 y 40 minutos, pero puede extenderse si el técnico acompaña la actividad con asistencia técnica al productor.

Productor categoría: Esta variable solo se registró en Honduras en el 2016. Hace referencias a categorías de manejo en la finca: 1- Solo realiza control de malezas en su finca, 2- Controla malezas y realiza una fertilización, 3- Controla malezas, dos fertilizaciones y podas, 4- Controla malezas, dos o tres fertilizaciones, aplica fungicidas y/o foliares.

Latitud/longitud: Coordenadas geográficas de cada parcela dentro de los países. Este dato es muy importante porque genera la ubicación exacta del lote monitoreado.

Altura: Esta variable registra la altitud de las parcelas; está dada en metros sobre el nivel del mar. La altura es uno de los factores más influyentes en el desarrollo de la roya.

Variedad: Es una variable de clasificación y al igual que la altura, es relevante para considerar la evolución de la enfermedad a lo largo del año. En cada país se registra la variedad sembrada en la parcela que se ha monitoreado, muchas de ellas pueden ser usadas en los cuatro países, y otras son particulares a cada uno de ellos.

Distancia entre planta y entre calle: Estas variables permiten calcular la densidad de siembra de la parcela. Generalmente se mide en metros; la densidad de siembra se da en plantas por hectárea.

Sombra: Aunque es una variable muy importante si se considera un ataque de roya, solo se registró en algunas parcelas en El Salvador; en Honduras solamente existen datos en el año 2016.

Fenología: Son las etapas fenológicas de las plantas en el momento que fueron monitoreadas. Generalmente se registra floración, floración principal (primera floración), floración loca (plantas que florecen en fechas no óptimas para esta fase), desarrollo, formación del fruto, fruto acuoso, fruto consistente, madurez fisiológica, inicio de cosecha, fin de cosecha, hojas nuevas de 15,1 a 30% y hojas nuevas mayor al 30%. Esta variable tiene estrecha relación con los meses de monitoreo.

Año de siembra: Hace referencia al año en que se estableció la plantación del lote muestreado. Esta variable permite calcular la edad del cafetal en la actualidad y podría dar una idea del número de podas.

Fungicidas aplica: Esta variable registra si en el momento del monitoreo se ha aplicado fungicida o no.

Fungicidas frecuencias: Es una variable que depende de la anterior, registrando el número de aplicaciones en la fecha del muestreo.

Puntos: Número de plantas de café que se monitorea en cada parcela. En la mayoría de los casos deben ser 30.

Bandolas: Número de ramas de cafeto a las cuales se les muestrea hojas totales y hojas con roya; generalmente se consideran dos bandolas por planta.

Hojas evaluadas: Cantidad de hojas muestreadas en la parcela (30 plantas, y dos bandolas por planta).

Hojas con roya: Número de hojas con pústulas esporuladas de roya en la parcela (30 plantas muestreadas y dos bandolas por planta).

Incidencia: Porcentaje de hojas con roya. Esta variable se estima dividiendo la cantidad de hojas con roya entre la cantidad de hojas evaluadas, por 100.

Hojas con flex: Cantidad de hojas con pústulas cloróticas sin esporulación en la parcela.

Broca promedio: Porcentaje de frutos brocados en la parcela. Esta variable se estima dividiendo el número de frutos con broca entre el número de frutos evaluados, por 100.

Superficie: Área de la finca de café donde se seleccionó la parcela para desarrollar el muestreo. Esta variable se registra en hectáreas.

Cuadro 2. Información disponible según el método de monitoreo en los países considerados en el estudio

Información	Honduras		El Salvador		Panamá	R. Dominicana
	SAT-FAO	OIRSA	SAT-FAO	CENTA	FAO	FAO
Dato						
No.						
Clave_productor						
Nombre productor						
Lote						
País						
Departamento						
Municipio						
Aldea						
Caserío						
Regional						
Agencia						
Evaluador						
Institución						
Fecha						
Fecha meses						
Productor categoría						

Cuadro 2. Información disponible según el método de monitoreo en los países considerados en el estudio (...continuación)

Información	Honduras		El Salvador		Panamá	R. Dominicana
	SAT-FAO	OIRSA	SAT-FAO	CENTA	FAO	FAO
Año						
Latitud						
Longitud						
Altura						
Tipo café						
Variedad						
Distancia planta (m)						
Distancia calle (m)						
DensSiembraPtas/ha						
Sombra promedio						
SombraProm (%)						
Fenología						
Año siembra						
Edad plantación						
Fungicidas aplica						
Fungicidas frecuencia						
Puntos						
Bandolas						
Hojas evaluadas						
Hojas con roya						
Hojas con flex						
Incidencia						
Frutos evaluados						
Frutos con broca						
Broca promedio						
Tipo de parcela						
Método						
Id_productores						
Semana						
Superficie (ha)						
Id_País						
Nombre de la finca						
Cordillera						
% sombra						
Tipo de finca						

Nota: Sombra promedio (muchasombra, sombra media, poca sombra y pleno sol), número de hojas con flex (cuando en la hoja se observa pústula clorótica sin esporulación). Color: Disponibilidad de información

La información de los sistemas de monitoreo no está disponible en los mismos años y meses en los cuatro países (Cuadro 3). República Dominicana es el país donde se logró obtener más años de información (desde junio de 2014 hasta abril de 2018). De Panamá se consideraron datos del sistema de monitoreo desarrollado desde marzo del 2015 hasta abril del 2018, excepto marzo del último año. Al respecto de Honduras y El Salvador, se procesó información del 2016, 2017 y los primeros meses del 2018.

Cuadro 3. Información de las bases de datos por año y mes de los países considerados en los cinco años de estudio

Año	Meses	El Salvador	Honduras	Panamá	R. Dominicana
2014	Junio				
2014	Julio				
2014	Agosto				
2014	Septiembre				
2014	Octubre				
2014	Noviembre				
2014	Diciembre				
2015	Enero				
2015	Febrero				
2015	Marzo				
2015	Abril				
2015	Mayo				
2015	Junio				
2015	Julio				
2015	Agosto				
2015	Septiembre				
2015	Octubre				
2015	Noviembre				
2015	Diciembre				
2016	Enero				
2016	Febrero				
2016	Marzo				
2016	Abril				
2016	Mayo				
2016	Junio				
2016	Julio				
2016	Agosto				
2016	Septiembre				
2016	Octubre				
2016	Noviembre				
2016	Diciembre				
2017	Enero				
2017	Febrero				
2017	Marzo				
2017	Abril				
2017	Mayo				
2017	Junio				
2017	Julio				
2017	Agosto				
2017	Septiembre				
2017	Octubre				
2017	Noviembre				
2017	Diciembre				
2018	Enero				
2018	Febrero				
2018	Marzo				
2018	Abril				
2018	Mayo				

Nota. Color: disponibilidad de información

3.4 Definición de las variables más importantes en el desarrollo de la roya y formación de categorías

Los sistemas de monitoreo registran numerosas variables que pueden ser usadas en los avisos de alerta y vigilancia. La identificación de las variables más importantes para explicar la incidencia de roya permite la formación de categorías que aportan a la optimización del sistema. En Honduras se trabajó con las bases de datos de OIRSA (2016), que incluye las variables: porcentaje de sombra, densidad de siembra, fenología, hojas con flex, frecuencia de fungicidas, categoría de productores, mes de monitoreo, edad de la plantación, regiones cafetaleras, altura y variedad, y FAO (2017-2018) con las variables: fenología, año de monitoreo, mes de monitoreo, regiones cafetaleras, variedad y altura; en El Salvador se utilizó la base de datos de CENTA (2016) con las variables: mes de monitoreo, altura, regiones cafetaleras y superficie de las fincas, y los datos de FAO (2017-2018) con las variables: año de monitoreo, regiones cafetaleras, fenología, variedad, altura y mes de monitoreo. En Panamá se consideró la base de datos de FAO con las variables: fenología, variedad, año de monitoreo, departamento cafetalero, mes de monitoreo y altura; en República Dominicana con la base de datos de la FAO y las variables: altura, fenología, mes de monitoreo, regiones cafetaleras, variedad y año de monitoreo.

Para definir las variables más influyentes en la enfermedad se usó el método Random Forest (árboles de regresión). La implementación del método se realizó usando R (R-Development-Core-Team 2018), considerando el criterio *broken stick* (vara quebrada) para definir un punto de quiebre que indica cuales variables son las de mayor importancia. Esta técnica mejora la capacidad predictiva de un árbol de regresión y acepta la mezcla de variables cualitativas y cuantitativas dentro de un mismo análisis. Sin embargo, solo procesa matrices de datos completos y tiende a subestimar valores altos de incidencia.

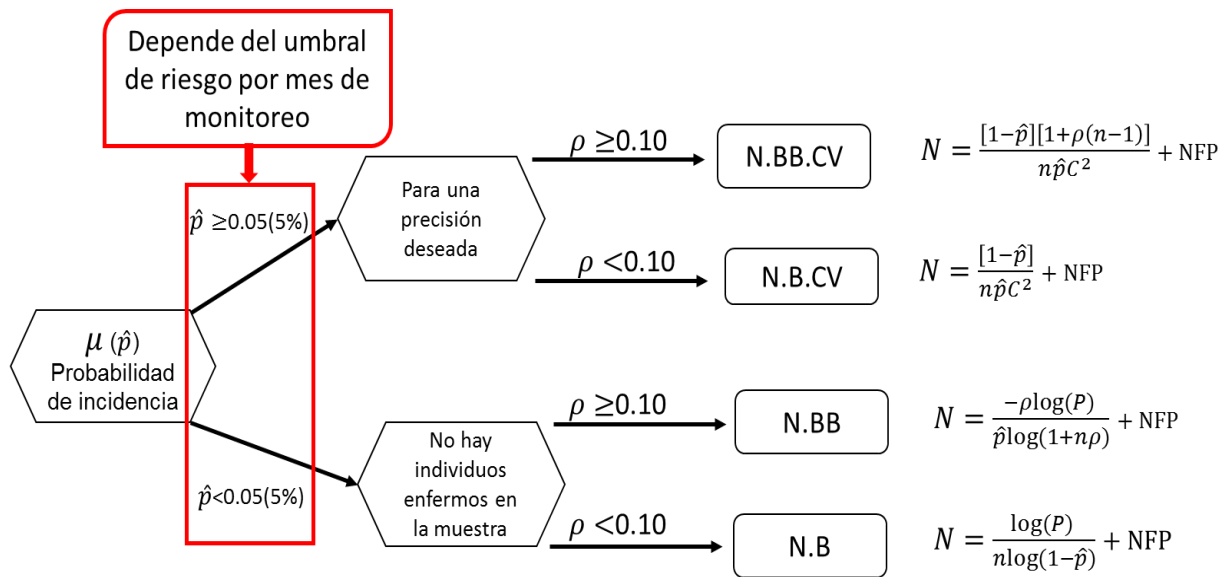
En la categorización se tomaron en cuenta las dos variables más relevantes para explicar la incidencia del hongo. El método Random Forest determinó que en los cuatro países hubo predominancia de altura y variedad como variables explicatorias. Con el análisis de varianza bajo la prueba de comparación de medias DGC con 0,05 de significancia, se identificaron las variedades con mayor y menor incidencia y a su vez se formaron subcategorías de variedades en susceptibles, medianamente resistentes y resistentes (Di Rienzo *et al.* 2011; Di Rienzo *et al.* 2018). En referencia a la altitud se definieron *a priori* cuatro estratos altitudinales: baja (0-700 msnm), media (700-1100 msnm), alta (1100-1500 msnm) y muy alta (más de 1500 msnm). Con los subgrupos de ambas variables se formaron doce categorías: variedades susceptibles-altura baja, v. susceptibles-a. media, v. susceptibles-a. alta, v. susceptibles-a. muy alta, v. medianamente resistentes-a. baja, v. medianamente resistentes-a. media, v. medianamente resistentes-a. alta, v. medianamente resistentes-a. muy alta, v. resistentes-a. baja, v. resistentes-a. media, v. resistentes-a. alta y v. resistentes-a. muy alta. Todas las categorías se tomaron en cuenta para la estimación del tamaño de muestra en el sistema de monitoreo que se propone.

3.5 Estimación del tamaño de muestra con datos de incidencia de los últimos años

El sistema de monitoreo propuesto pretende mejorar la eficiencia de los muestreos de roya calculando un tamaño de muestra adecuado en función de la incidencia observada en un mes y categoría definidos del año anterior. Con los datos de incidencia de los últimos años se desarrolló un modelo para estimar la incidencia media utilizando una distribución beta-binomial. Este proceso es necesario para definir los tres parámetros (p : proporción de la enfermedad, de 0 a 1; ee : error estándar asociado a la media y ρ : llamado rho o coeficiente de correlación intraclase. Este coeficiente asume el nivel de agregación de la enfermedad en el espacio, es decir, considera el nivel de variabilidad espacial de los datos que permitieron estimar el tamaño de muestra del sistema propuesto. Para afirmar que el modelo explica bien los datos se comparan las curvas de las medias de los datos sin procesar con las curvas de las medias estimadas del modelo; ambas deben tener tendencias similares a lo largo del año.

El plan de muestreo se define con una pregunta clave: ¿Cuál es el tamaño de muestra para estimar la incidencia de roya si esta (incidencia) fuera similar a la incidencia observada en el año anterior? Para responder y estimar el número de parcelas óptimo se considera lo propuesto por Madden *et al.* (1996) y Madden y Hughes (1999) en la Figura 4. La estimación del tamaño de la muestra parte de una proporción de la enfermedad (probabilidad de incidencia). La primera decisión es: si la proporción es mayor o igual a 0,05 (5% de incidencia), se sugiere estimar el tamaño de muestra para una precisión deseada (se considera el coeficiente de variación del error), y si la proporción es menor a 0,05 (5% de incidencia), se sugiere estimar el tamaño de muestra tomando en cuenta que no hay individuos enfermos en la muestra (se considera el nivel de significancia, en tal caso de 0,01).

En la segunda opción, cuando se tienen incidencias muy bajas o poco probables, cuando se construye el intervalo de confianza de ese valor por lo general va a contener el cero (el límite inferior va a ser cero para asegurar que el estimador de la incidencia sea cerrado: de cero al infinito); un número mayor se esperaría que no lo contenga porque es más distante de 0. Existe la probabilidad de tener 0 incidencia, la pregunta es: ¿cuánto se necesita de muestra para asegurar que ese valor pequeño de incidencia va a ser distinto de 0? Entre menos incidencia, mayor tamaño de muestra se requiere para poder confirmar esa diferencia (problema de detectabilidad). El punto de quiebre del valor de incidencia para escoger una de las dos decisiones en el diagrama, dependerá del umbral de riesgo por categoría y mes de monitoreo particulares a cada país. Con pruebas de hipótesis se ha comprobado que un rho mayor o igual a 0,10 es significativo. A mayor variabilidad de los datos más grande es rho. Cuando existe mucha variabilidad no se puede usar una Binomial (que asume que la varianza es igual a la media $[np]$ multiplicada por $1-p$), entonces se emplea una beta binomial. La segunda decisión consiste en lo siguiente: si el rho es mayor o igual a 0,10, se estima el tamaño de muestra con una beta binomial, si el rho es menor a 0,10, se estima el tamaño de muestra con una binomial. Esta segunda decisión se somete a consideración independientemente de la primera.



Nota \hat{p} : probabilidad de incidencia, ρ : coeficiente de correlación intraclase, N.BB.CV: tamaño de muestra con beta binomial considerando el coeficiente de variación, N.B.CV: tamaño de muestra con binomial considerando el coeficiente de variación, N.BB: tamaño de muestra con beta binomial, N.B: tamaño de muestra con binomial
FÓRMULAS N : tamaño de muestra, \hat{p} : probabilidad de incidencia, ρ : coeficiente de correlación intraclase, n : número de plantas monitoreadas, C : coeficiente de variación del error, P : nivel de significancia (0,01), NFP: número fijo de parcelas (en el procesamiento de los resultados a cada categoría/mes se le agregaron 10 parcelas por defecto, porque es el número mínimo que el modelo necesita para estimar un tamaño de muestra)

Figura 4. Condicionales para establecer el sistema de monitoreo de la roya anaranjada en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana según lo propuesto por Madden *et al.* (1996) y Madden y Hughes (1999)

3.6 Estimación del tamaño de muestra según incidencia observada y número de fincas por categoría

La incidencia esperada puede variar con la observada en los meses y categorías de monitoreo debido a las condiciones de ambiente, manejo de los cafetales y evolución de la enfermedad. Así se deduce que el tamaño de muestra estimado debe mantenerse si la incidencia esperada es igual o menor que la observada; pero si esta última es mayor, el tamaño de muestra será diferente. A continuación, se muestra un ejemplo de cuando la incidencia observada es igual, mayor o menor que la esperada partiendo de un año histórico (Figura 5).

En el año 2017, con incidencia de 8%, se necesitaba muestrear 30 parcelas; si en 2018, la incidencia observada es menor o igual, el tamaño de muestra se mantiene, pero si es mayor (por ejemplo 10%), se somete a consideración ¿cuántas parcelas se necesitan para confirmar ese nuevo valor? Para esto se estima el tamaño de muestra con el nuevo dato de incidencia y el procedimiento de la Figura 4. Si los resultados asumen que se deben aumentar 10 parcelas a la estimación anterior, entonces se monitorean en total 40 parcelas. Si con este otro plan de muestreo se iguala el último valor de incidencia (10%) o es menor, entonces el muestreo se mantiene en 40 parcelas; si resulta que la incidencia es mayor (por ejemplo 12%), se repite el proceso. El tamaño de muestra se debe aumentar, sin omitir el presupuesto disponible para esta actividad en ese mes de monitoreo.

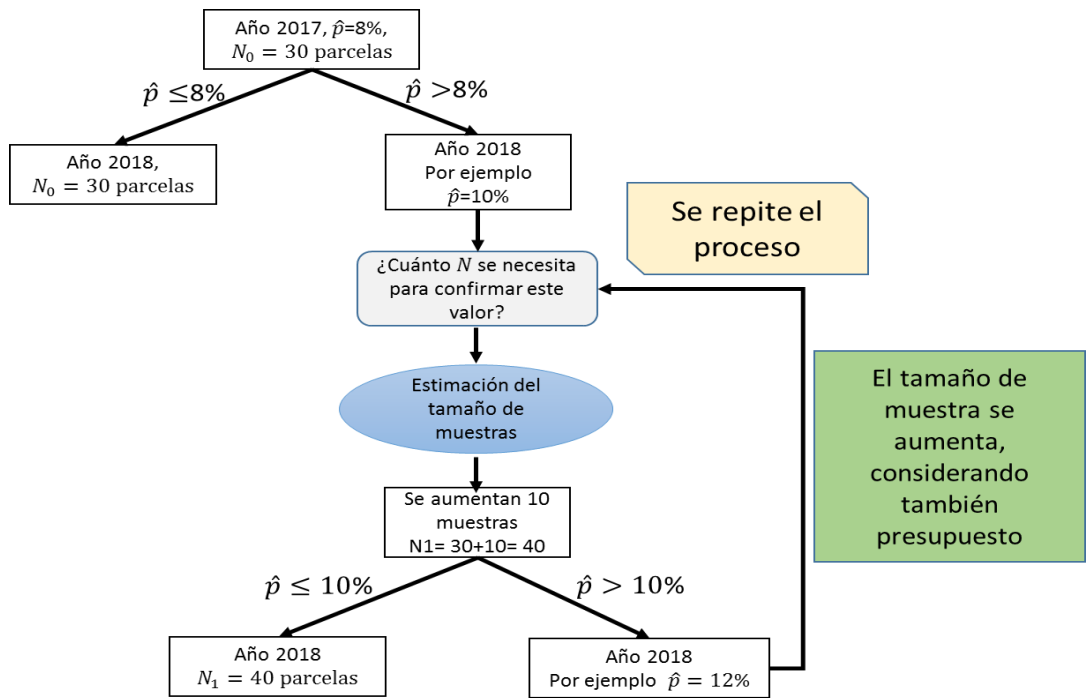


Figura 5. Tamaño de muestra considerando la incidencia esperada y observada de la roya anaranjada en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana

Por ejemplo, en Honduras en el año 2017 la curva de incidencia de la roya a lo largo del año (Figura 6) indica que en el mes de julio (mes 7), la incidencia era del 3% (incidencia esperada, IE); sin embargo, en el siguiente año (2018) hipotéticamente, la incidencia observada (IO) fue de 5%. Con este aumento se deduce que el esfuerzo de monitoreo se debe incrementar 20%. Si el tamaño de muestra de julio se incrementó 20% por aumento de la incidencia, en el mes siguiente (agosto), y sin considerar su incidencia, también se debe incrementar 20% de acuerdo con el mes anterior.

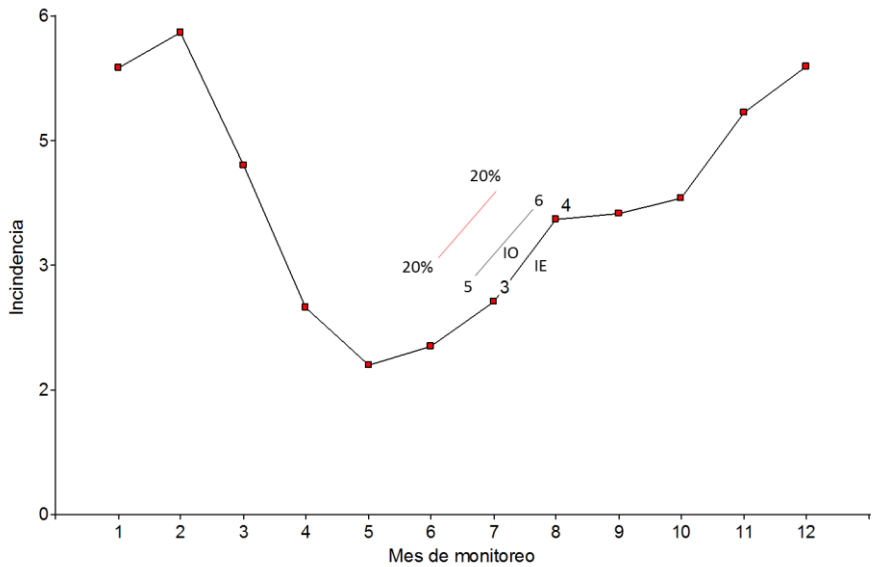


Figura 6. Aumento del tamaño de muestra considerando un incremento de la incidencia de la roya anaranjada en el mes anterior en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana

El tamaño de muestra no solo depende del valor de incidencia, coeficiente de correlación intraclase o el umbral de riesgo en un mes y categoría de monitoreo, sino del número de fincas por categoría. Considerando este aspecto se agrega a lo demás la siguiente fórmula:

$$N = \frac{\widehat{TM} * N_p}{(N_p - 1) + \widehat{TM}}$$

- N : tamaño de muestra según el número de fincas por categoría
- \widehat{TM} : tamaño de muestra estimado
- N_p : N poblacional (número de fincas por categoría)

3.7 Costo-eficiencia de los sistemas de monitoreo

Para determinar la costo-eficiencia del sistema se midió también su rentabilidad económica, comparando el costo del sistema de monitoreo actual con el costo del sistema de monitoreo propuesto. Para este análisis se recopiló información relevante sobre los costos fijos y variables de los sistemas en cada uno de los países.

Los datos obtenidos describen detalladamente la cantidad de dinero que las entidades gastan en ejecutar el muestreo mensual y anualmente. La información ayudó a calcular el costo de muestreo de una parcela al mes, insumo necesario para estimar el costo del número de parcelas que se proponen bajo el nuevo esfuerzo de monitoreo por mes y categoría.

IV. RESULTADOS

4.1 Hallazgos durante la depuración y estandarización de las bases de datos

Los errores encontrados provienen principalmente de la ubicación geográfica de las parcelas y descripción de las variables. La mayoría de la información tenía errores ortográficos. Algunos municipios no coincidían con su departamento. En Honduras las regiones cafetaleras no estaban definidas de forma clara y correspondían a las regiones promocionales del IHCAFE y no las de extensión que maneja el departamento de producción y estadística, razón por la cual se gestionó la obtención de datos que delimitan cada región considerando los municipios que las conforman.

En todas las bases de datos la altitud presentaba valores atípicos o en algunas parcelas no había registro, por tal razón se extrapolaron las coordenadas geográficas de cada parcela a un modelo de elevación con el cual se exportó la altitud estimada para cada una. Las variedades y el estado fenológico tenían descripción incorrecta o errores ortográficos que generaban variabilidad en la información. Al igual que la altitud, la variable incidencia presentaba valores atípicos que se corrigieron con diagramas de dispersión e histogramas. La información relacionada a hojas evaluadas en cada parcela tenía valores extremos (cantidades mayores y menores fuera de lo común); además, en muchos de los casos la cantidad de hojas con roya era mayor que las hojas evaluadas. En Panamá los datos de las coordenadas geográficas tenían un formato no reconocible por ArcGIS o cualquier otro programa de SIG por lo que fue necesario convertirlos a coordenadas geográficas.

4.2 Variables más influyentes en el desarrollo de la roya según la técnica de *Random Forest*

Los sistemas de monitoreo incluyen variables asociadas a la incidencia de la roya en un determinado lugar. Sin embargo, muchas de estas variables no son relevantes en la vigilancia o sistemas de alerta. El método *Random Forest* permitió identificar las variables que influyen más en el desarrollo del hongo *Hemileia vastatrix* en cada uno de los países, sin importar la diversidad de los factores considerados en cada uno. El análisis se desarrolló con bases de datos que tenían variables en común y sin datos faltantes.

En el año 2016, el sistema de Honduras incluyó once variables, donde variedad y altitud resultaron de mayor influencia en el desarrollo de la enfermedad. Este resultado se repitió para los muestreos del 2017 y los primeros meses del 2018 en este país. Pese a que en el 2016 el muestreo se ejecutó con un sistema diseñado por OIRSA y que después se utilizó el SAT-FAO, se unieron los muestreos de ambos sistemas para realizar el análisis, obteniendo las mismas variables de mayor importancia. Aunque los demás países no reflejaron exactamente lo mismo, no obstante, se mantiene la tendencia de que variedad y altura sobre el nivel del mar son las variables de más relevancia en la incidencia de la roya del café. Meses de monitoreo resultaron

ser también influyentes, considerando que las fechas de muestreo son importantes para medir las curvas de incidencia de la roya a lo largo del año. Las bases de datos de los cuatro países con diversos años se unieron para aplicar a la técnica de *Random Forest*, y los factores más influyentes fueron también variedad y altura (Cuadro 4).

Cuadro 4. Variables de mayor importancia en el desarrollo de la roya anaranjada del café según análisis de *Random Forest* en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana

País	R ²	Variables (1° mayor a 4° menor importancia)					Otras variables
		1°	2°	3°	4°	5°	
Honduras (2016)	0,90	variedad	altura	regiones cafetaleras	edad de la plantación	mes de monitoreo	categoría de productores, frecuencia de fungicidas, hojas con flex, fenología, densidad de siembra, sombra
Honduras (2017, 2018)	0,70	altura	variedad	regiones cafetaleras	mes de monitoreo	fenología	año de monitoreo
Honduras (2016-2018)	0,72	altura	variedad	regiones cafetaleras	mes de monitoreo	fenología	año de monitoreo
El Salvador (2016)	0,71	mes de monitoreo	altura	superficie	regiones cafetaleras		
El Salvador (2017, 2018)	0,74	mes de monitoreo	altura	variedad	fenología	regiones cafetaleras	año de monitoreo
El Salvador (2016-2018)	0,63	mes de monitoreo	altura	regiones cafetaleras	superficie	año de monitoreo	
Panamá	0,73	altura	mes de monitoreo	fenología	variedad	año de monitoreo	departamento cafetalero
República Dominicana	0,95	altura	fenología	mes de monitoreo	regiones cafetaleras	variedad	año de monitoreo
Todos los países	0,60	variedad	altura	fenología	mes de monitoreo	año de monitoreo	

4.3 Categorías considerando altitud y variedad en cada país

Usando las medias de incidencia de roya por variedad en Honduras, muestreos realizados durante el 2017 y los meses iniciales de 2018, y con las pruebas de comparación de medias DGC se evidencia que Caturra reportó el mayor índice de incidencia con 16,29%, y Parainema, por lo contrario, el menor con 0,39%. Es importante indicar que Catuaí y Lempira son variedades de gran representatividad en el país (n de 1595 y 5250 respectivamente), y a su vez son susceptibles y medianamente resistentes respectivamente (Cuadro 5). Bajo este análisis se agrupó Caturra, Icatú, Pacas y Catuaí dentro de las variedades susceptibles; Pacamara, Otras, Mezcla, Lempira y Catimor como variedades medianamente resistentes; e IHCAFE-90, H27 y Parainema como variedades resistentes.

Cuadro 5. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según variedades en Honduras (2017-2018) con pruebas de comparación de medias DGC (Alfa=0,05)

Variedad	Medias	E.E.	n	Letras	Categoría
Caturra	16,29	0,86	73	A	V. susceptibles
Icatú	9,63	0,85	74	B	
Pacas	7,79	0,45	270	C	
Catuaí	7,64	0,18	1595	C	
Pacamara	6,31	1,12	43	D	V. medianamente resistentes
Otras	5,03	0,81	82	D	
Mezcla	4,61	0,39	358	D	
Lempira	3,91	0,10	5250	D	
Catimor	3,13	0,59	155	D	
IHCAFE-90	2,21	0,27	717	E	V. resistentes
H27	1,45	1,19	38	E	
Parainema	0,39	0,31	550	F	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Nota. Otras son variedades con un n muy pequeño: Java (9), Obatá (20), Villa Sarchí (25) y Bourbon (28)

La altura sobre el nivel del mar ha sido una de las variables prioritarias en el sistema de monitoreo ejecutado en Honduras. En el año 2017 y primeros meses del 2018, la incidencia de la roya fue mayor en alturas medias (de 700 a 1100 msnm) (Cuadro 6), mientras que los menores índices se mostraron en alturas muy altas (mayor a 1500 msnm). Agrupar la altitud en cuatro categorías permite entender el comportamiento de la enfermedad en diferentes estratos. Los cuatro grupos de altura se combinaron con los tres de variedades para definir las doce categorías que se emplean en la propuesta del sistema de monitoreo para Honduras (variedades susceptibles-altura baja, v. susceptibles-a. media, v. susceptibles-a. alta, v. susceptibles-a. muy alta, v. medianamente resistentes-a. baja, v. medianamente resistentes-a. media, v. medianamente resistentes-a. alta, v. medianamente resistentes-a. muy alta, v. resistentes-a. baja, v. resistentes-a. media, v. resistentes-a. alta y v. resistentes-a. muy alta).

Cuadro 6. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según altitud en Honduras (2017-2018) con pruebas de comparación de medias LSD Fisher (Alfa=0,05)

Altura (msnm)	Medias	E.E.	Letras	Categoría
700 - 1100	5,12	0,13	A	Media altura
0 - 700	4,75	0,40	A B	Baja altura
1100 - 1500	4,51	0,11	B	Alta
>1500	2,09	0,25	C	Muy alta

En El Salvador se cultivan variedades similares a las de Honduras, la gran mayoría susceptibles a *Hemileia vastatrix*. Las parcelas con mezcla de variedades reflejaron las mayores incidencias (16,02%). Según las pruebas de comparación de medias DGC, Bourbon y Pacas (más representadas, n de 796 y 835 respectivamente), se agrupan como susceptibles con altos porcentajes de roya. La Lempira y Cuscatleco se identificaron como variedades resistentes con incidencias bajas, de 0,49% y 0,41% cada uno (Cuadro 7).

Cuadro 7. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según variedades en El Salvador (2017-2018) con pruebas de comparación de medias DGC (Alfa=0,05)

Variedad	Medias	E.E.	n	Categoría
Mezcla	16,02	3,58	19 A	Susceptibles
Bourbon	9,44	0,38	796 A	
Catuai	8,34	1,99	20 A	
Pacamara	8,28	2,95	18 A	
Pacas	8,22	0,37	835 A	
Icatú	6,44	2,53	12 A	Medianamente resistentes
Catimor	3,89	1,19	64 B	
CR-95	3,62	1,46	48 B	
Caturra	3,48	0,86	10 B	
Lempira	0,49	0,21	18 C	Resistentes
Cuscatleco	0,41	0,09	252 C	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En El Salvador, la altitud es una de las variables con gran influencia en el desarrollo de la roya. Si se toma en cuenta la categorización *a priori* con los sistemas de monitoreo del 2017 e inicios de 2018, se forman tres categorías: baja, media y alta. Se evidencia que, de los tres estratos, se reporta mayor incidencia para alturas de 1100 a 1500 msnm (medias de 9,81% roya) y valores relativamente bajos para altitudes de 700 a 1100 msnm (6,70 % de roya) (Cuadro 8). En este país se definieron nueve categorías (combinaciones de tres grupos de variedades y tres de altura sobre el nivel del mar) para la estimación del tamaño de muestra del sistema a proponer.

Cuadro 8. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según altitud en El Salvador (2017-2018) con pruebas de comparación de medias LSD Fisher (Alfa=0,05)

Altura (msnm)	Medias	E.E	Letras	Categoría
1100 - 1500	9,81	0,47	A	Alta
0 - 700	6,96	0,53	B	Baja
700 - 1100	6,70	0,30	B	Media

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

La caficultura en Panamá no es una actividad intensa como en Honduras, Guatemala y Nicaragua; sin embargo, es un rubro con aportes significativos al producto interno bruto del país. En las bases de datos de los muestreos de roya, el MIDA reporta cinco variedades principales en las parcelas que se están monitoreando. Catimor, un híbrido que ha sido resistente, en los últimos años se ha vuelto susceptible reportando una media de 9,64% de incidencia de roya (Cuadro 9). Las variedades con mayor representatividad (Caturra y Catuái) tienen promedios de incidencia de 6,59 y 6,35% respectivamente, agrupándose como variedades medianamente resistentes. Las fincas que tienen mezcla de variedades presentaron las incidencias más bajas en el país con 1,35%.

Cuadro 9. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según variedades en Panamá con pruebas de comparación de medias DGC (Alfa=0,05)

Variedad	Medias	E.E.	n	Letras	Categoría
Catimor	9,64	1,35	46	A	V. Susceptibles
Caturra	6,59	0,46	402	B	V. Medianamente
Catuaí	6,35	0,50	329	B	resistentes
Otras	3,04	1,57	34	C	
Robusta Tropical	1,57	1,50	37	C	V. Resistentes
Mezcla	1,35	1,99	24	C	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Nota. Otras son variedades con un n muy pequeño: Obatá (5), Bourbon (12) y Pacamará (17)

Los muestreos de *Hemileia vastatrix* en Panamá corresponden a registros mensuales desde el 2015 hasta los primeros meses del 2018. En este país, la roya del café afecta mayormente fincas con alturas entre 0 y 700 msnm con media de incidencia de 7,60%. Aquellas parcelas ubicadas en altitudes por encima de los 1500 msnm reflejan menor afectación de la enfermedad (4,69%). Estos resultados podrían afirmar la idea que en alturas bajas la incidencia es mayor, y menor en alturas muy elevadas (mayor a los 1500 msnm). En Panamá también se formaron doce categorías con las combinaciones entre los tres subgrupos de variedades y los cuatro estratos altitudinales (Cuadro 10).

Cuadro 10. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según altitud en Panamá con pruebas de comparación de medias LSD Fisher (Alfa=0,05)

Altura (msnm)	Medias	E.E.	Letras	Categoría
0 - 700	7,60	0,88	A	Baja
1100 - 1500	6,81	0,64	A B	Alta
700 - 1100	5,65	0,44	B C	Media
>1500	4,69	0,75	C	Muy alta

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Las plantaciones de café en República Dominicana han sido afectadas seriamente por la roya en los últimos años; por tal razón se puede indicar que la incidencia es mayor en comparación con los otros tres países (Cuadro 11). La variedad Lempira, que en Honduras ha sido relativamente resistente, en este país es la que reporta mayor incidencia del hongo con 32,11%, compartiendo el mismo grupo según la prueba DGC en fincas que tienen mezcla de variedades. Aunque en términos numéricos, la diferencia no es muy marcada, la variedad Típica es la que refleja los valores más bajos de roya con media de 20,43%. Tomando en cuenta la estructura, información disponible e intensidad del sistema de monitoreo ejecutado por INDOCAFÉ, se formaron solamente dos categorías con esta variable.

Cuadro 11. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según variedades en República Dominicana con pruebas de comparación de medias DGC (Alfa=0,05)

Variedad	Medias	E.E.	n	Letras	Categoría
Lempira	32,11	2,68	65	A	Susceptibles
Mezcla	28,47	0,88	603	A	
Caturra	22,93	0,67	1034	B	
Catimor	21,05	2,25	92	B	Resistentes
Típica	20,43	1,80	144	B	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Con la información obtenida de los muestreos en República Dominicana se confirmó que la variable altitud es de gran peso en la incidencia de roya en las fincas cafetaleras. Según el Cuadro 12, las parcelas o fincas monitoreadas en altitudes altas (1100 a 1500 msnm) son las que muestran las mayores tasas de incidencia (35,68%), lo contrario se refleja en sitios ubicados a alturas bajas (de 0 a 700 msnm) donde la media es de 19,69%. Considerando los dos grupos de variedades con las tres tipologías de altitud, en este país se formaron seis categorías para el método de muestreo a proponer.

Cuadro 12. Análisis de varianza de la incidencia de la roya anaranjada del café según altitud en República Dominicana con pruebas de comparación de medias LSD Fisher (Alfa=0,05)

Altura (msnm)	Medias	E.E.	Letras	Categoría
1100 - 1500	35,68	1,58	A	Alta
700 - 1100	24,58	0,58	B	Media
0 - 700	19,69	1,10	C	Baja

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.4 Medias de la incidencia de la roya por categoría y mes de monitoreo

La presencia de la roya del café varía a lo largo del año en diferentes variedades y a distintos estratos altitudinales. Se realizaron las estimaciones de las medias de incidencia con distribución beta binomial para Honduras y se observó que la roya aumenta desde los meses de julio y agosto hasta lograr valores altos en noviembre, diciembre y enero, y disminuye en los meses de marzo, abril, mayo y junio (Figura 7). Las fincas que se encuentran en altitudes bajas y con variedades medianamente resistentes, y en alturas medias con variedades susceptibles son las que evidentemente presentan mayor incidencia durante los doce meses del año. Los lotes plantados en altitudes muy altas con variedades resistentes registran las incidencias más bajas; un comportamiento similar se da en fincas a estas mismas altitudes pero con variedades medianamente resistentes o parcelas en alturas altas con variedades resistentes.

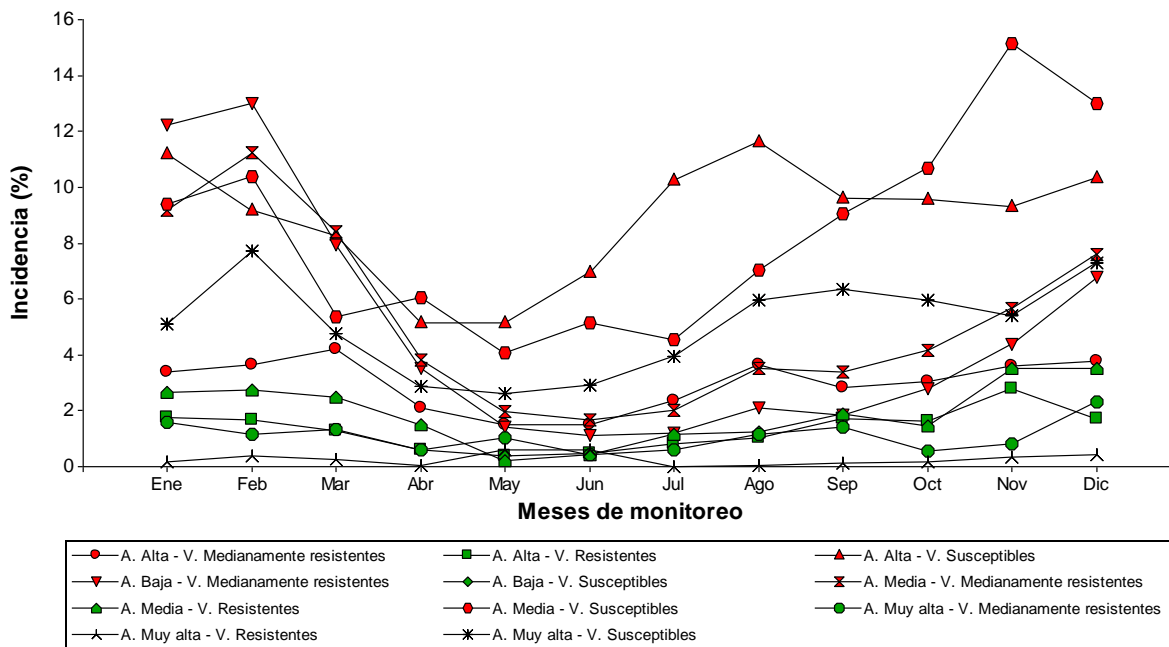


Figura 7. Curvas de incidencia de la roya anaranjada del café en Honduras por categoría y meses de monitoreo

En El Salvador la tendencia de aumento y disminución de la enfermedad a lo largo del año es más notable en variedades susceptibles sin importar el estrato altitudinal. Considerando este aspecto, la incidencia aumenta a partir de julio y agosto con valores máximos en diciembre y enero, y disminuye desde febrero y marzo, con valores mínimos en mayo y junio. Para este país, las fincas cafetaleras que se encuentran en alturas altas con variedades susceptibles presentan las mayores incidencias durante el año, aunque parcelas en alturas bajas y medias con variedades susceptibles mostraron tendencias similares. Las fincas ubicadas en alturas medias y bajas, pero con variedades resistentes son las que evidenciaron las tasas más bajas de roya en los meses de monitoreo (Figura 8).

En Panamá los datos son más escasos lo cual generó pocas categorías o que aparezcan solamente en algunos meses de monitoreo. El desarrollo de la roya presenta picos altos en los últimos y primeros meses y valores bajos a mediados del año. Las fincas que se encuentran a altitudes muy altas con variedades medianamente resistentes evidencian la mayor incidencia en enero, pero disminuye a lo largo de los once meses registrados, excepto en septiembre (Figura 9). Las parcelas que se encuentran en altitudes altas, bajas y medias con variedades medianamente resistentes presentaron curvas con mayor incidencia desde julio a diciembre. La menor incidencia, de junio a noviembre, se presentó en lotes plantados en alturas muy altas con variedades medianamente resistentes.

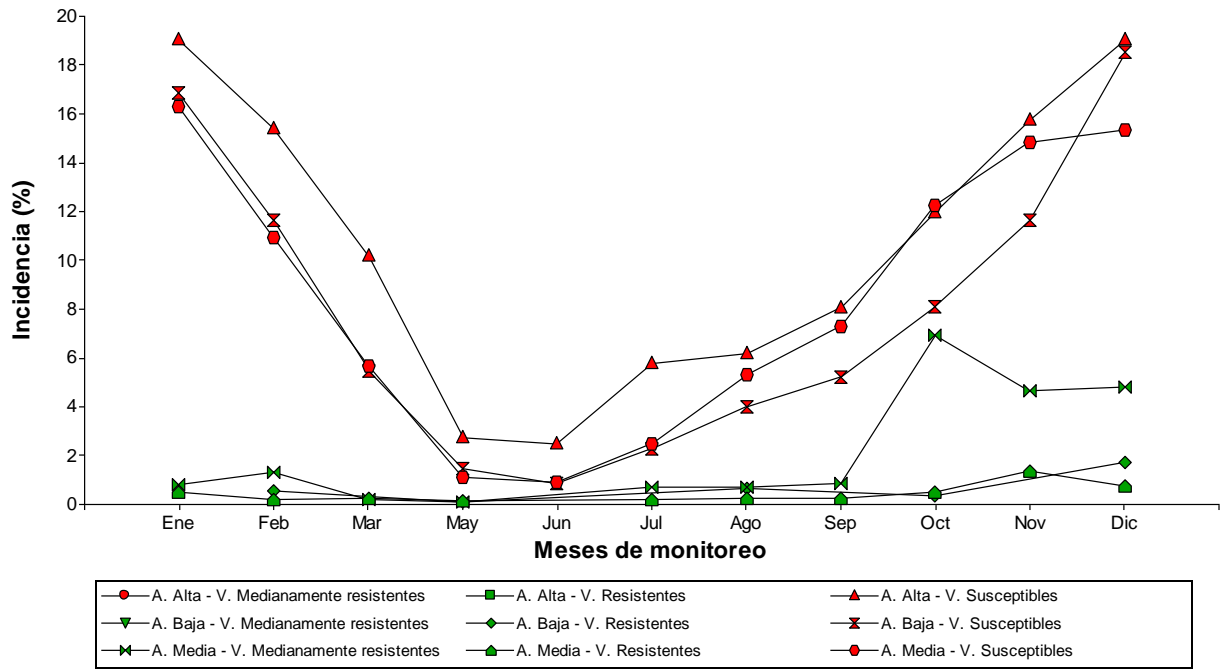


Figura 8. Curvas de incidencia de la roya anaranjada del café en El Salvador por categoría y meses de monitoreo

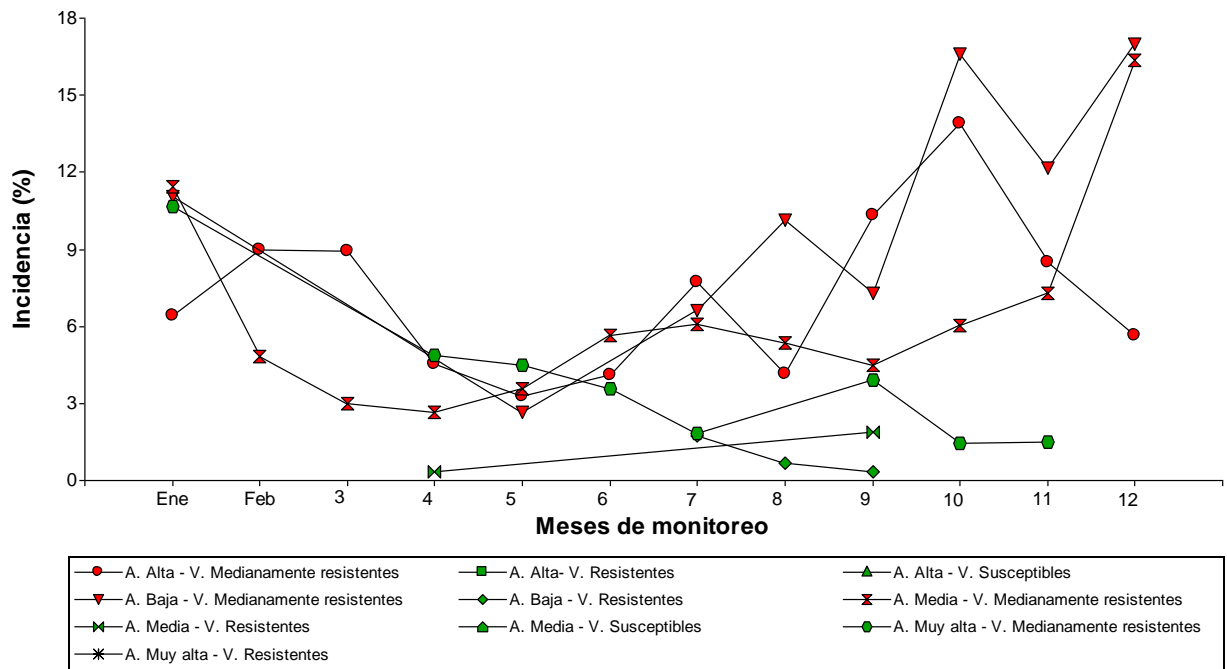


Figura 9. Curvas de incidencia de la roya anaranjada del café en Panamá por categoría y meses de monitoreo

Como ya se indicó, República Dominicana tiene la particularidad de presentar los mayores valores de incidencia entre los cuatro países del estudio. Si se consideran los valores máximos de roya, existen sitios que en determinada fecha de monitoreo han presentado el 100%

de incidencia. Las fincas que se encuentran en alturas altas con variedades susceptibles son las más afectadas en el año, excepto en febrero, abril, mayo y junio. En la mayoría de los meses de monitoreo, las parcelas ubicadas en altitudes bajas con variedades susceptibles son las que tienen menor incidencia. Los lotes de café en alturas bajas y medias con variedades resistentes tienen tendencia semejante a lo largo del año (Figura 10).

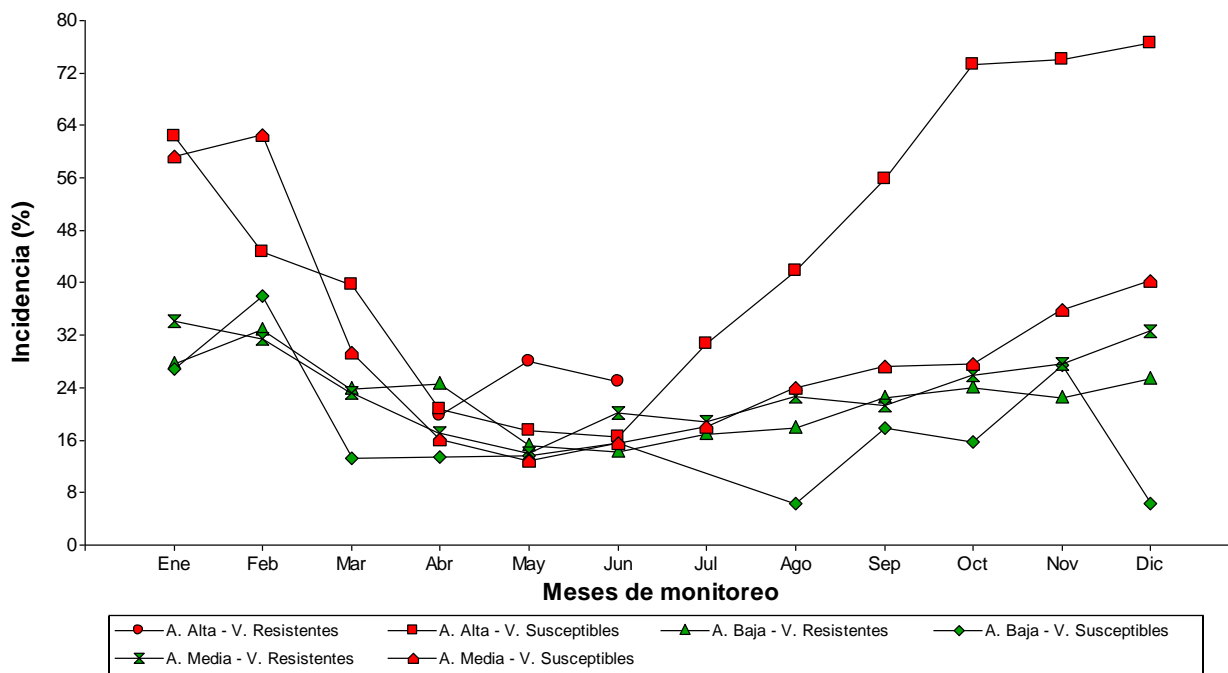


Figura 10. Curvas de incidencia de la roya anaranjada del café en República Dominicana por categoría y meses de monitoreo

4.5 Sistema de monitoreo actual y propuesto en cada país

En Honduras el sistema de monitoreo es intenso porque están muestreando aproximadamente 700 parcelas cada mes a nivel nacional. Esta metodología no tiene ningún fundamento sólido más que la idea de evitar problemas de detección de la roya en la vigilancia y alerta con un tamaño pequeño de muestras.

Por otro lado, este método de muestreo no considera la influencia de las variables ambientales y de producción, ni las categorías definidas en esta investigación. Pese a esta realidad, las categorías que más se monitorean actualmente corresponden a altitudes medias con variedades medianamente resistentes, altitudes altas con variedades medianamente resistentes y altitudes altas con variedades susceptibles. Las menos muestreadas a lo largo del año son las combinaciones de altitudes muy altas con variedades resistentes y medias con variedades susceptibles. Levemente, los meses con mayor intensidad de monitoreo son marzo, julio y agosto (Figura 11).

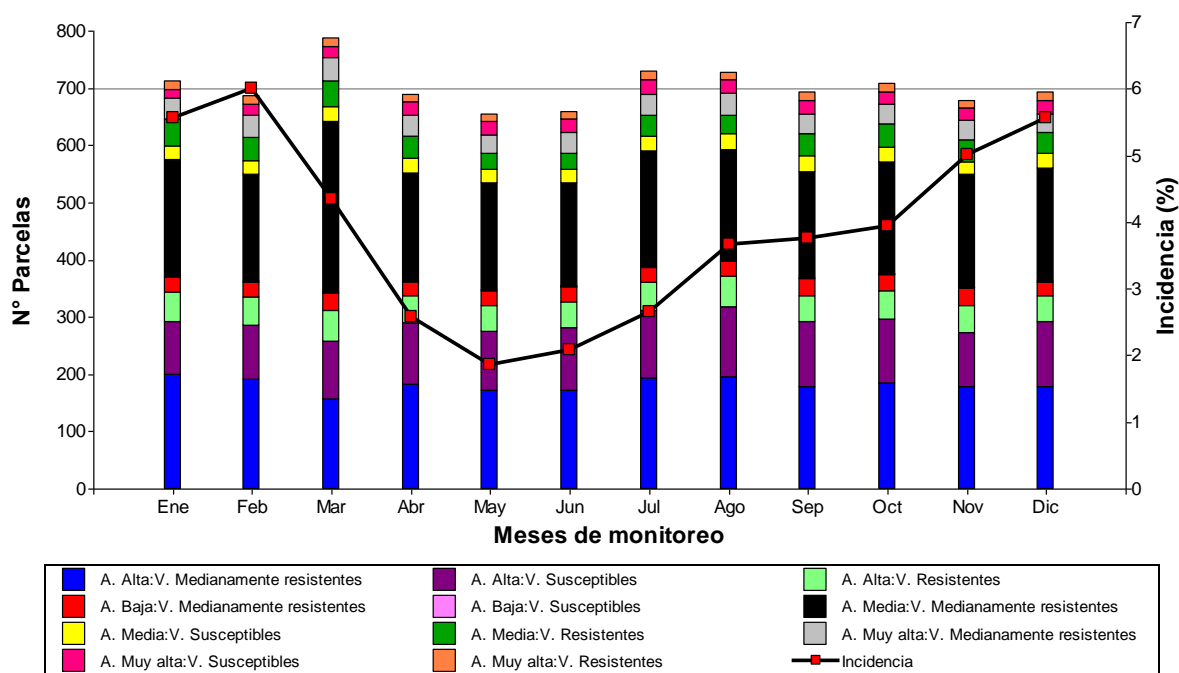


Figura 11. Sistema de monitoreo actual en Honduras

Los datos de los sistemas de monitoreo del 2017 y parte del 2018 fueron evaluados usando la metodología de la estimación del tamaño de muestra propuesta. Los resultados muestran que la intensidad de monitoreo se redujo aproximadamente un 60%, a pesar de que a cada categoría se le agregaron *a priori* diez parcelas. Los meses de marzo y octubre, con similar incidencia, fueron los que reflejan la mayor reducción; en estas fechas se sugiere muestrear aproximadamente 160 parcelas. Julio es el mes con el tamaño de muestra más grande (420 parcelas).

Además de determinar el número de parcelas para cada mes en particular, es relevante mencionar que esta propuesta hace una ponderación por categoría, dándoles mayor o menor peso en función de la incidencia encontrada en el pasado en las mismas parcelas. En enero se sugiere intensificar el monitoreo en la categoría altitud alta con variedades susceptibles, en febrero en altitud media con variedades medianamente resistentes, en abril en altitud muy alta con variedades resistentes, en junio en altitud alta con variedades susceptibles, en julio, agosto y septiembre en altitud muy alta con variedades resistentes y en altitud alta con variedades susceptibles, finalmente en diciembre en altitud alta con variedades susceptibles. La media de la curva de la incidencia de todas las categorías indica que las mayores incidencias se presentan en enero, febrero, noviembre y diciembre, y las más bajas en mayo y junio (Figura 12).

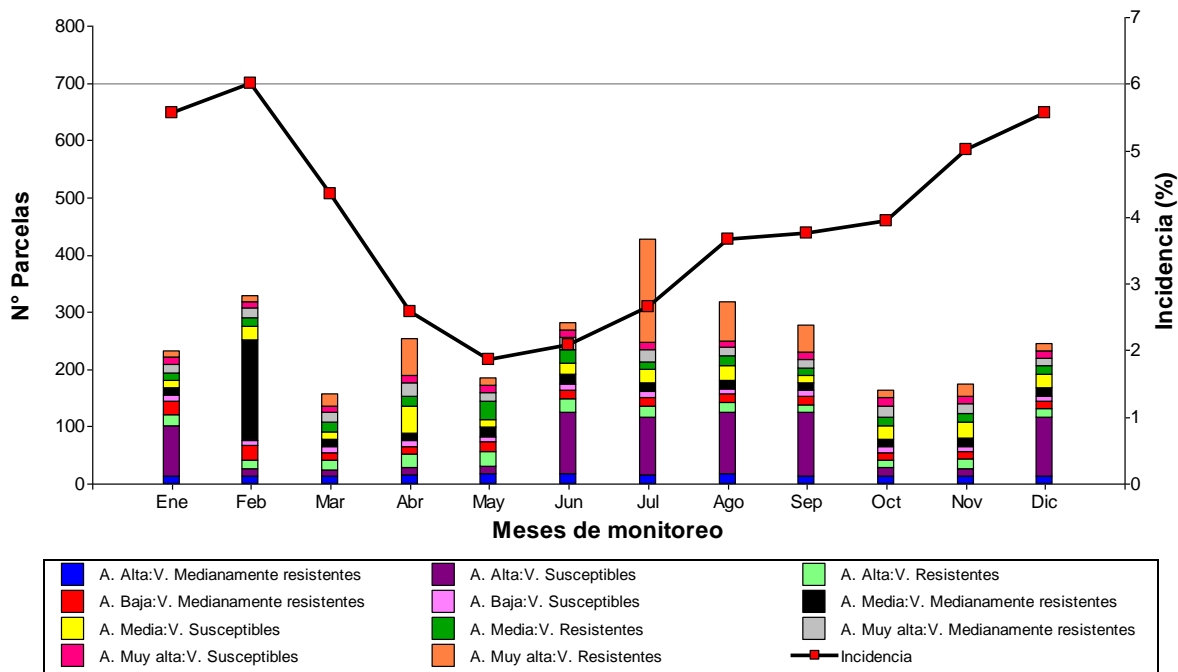


Figura 12. Sistema de monitoreo propuesto en Honduras, agregando *a priori* 10 parcelas a cada categoría por mes de monitoreo

En El Salvador el sistema de monitoreo no es intenso como en Honduras; sin embargo, tampoco se están considerando argumentos creíbles para fundamentar el tamaño de muestra actual. La cantidad de parcelas que se monitorean depende del presupuesto disponible para el año. Los meses que más se monitorean en la actualidad son enero, febrero, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre; contrariamente, los meses con menor tamaño de muestra son mayo y junio. Aunque las categorías no son relevantes en el sistema de monitoreo actual, las fincas en altitudes medias con variedades susceptibles y en altitudes altas con variedades susceptibles son las que presentan mayor esfuerzo de monitoreo a lo largo del año. Considerando la curva de la roya durante el año, la incidencia es mayor en enero, noviembre y diciembre y menor en mayo y junio, lo que indica una tendencia similar a la de Honduras (Figura 13).

A pesar de que el número de parcelas en El Salvador no es alto si se compara con el sistema de monitoreo de Honduras, con la metodología de estimación del tamaño de muestra propuesta, la cantidad de parcelas a monitorear se redujo aproximadamente un 70% (Figura 14). Los meses con el tamaño de muestra más alto en este sistema son enero, octubre, noviembre y diciembre. Marzo, junio, julio y septiembre son los que evidentemente reflejan el número de parcelas más pequeño en el año. La altitud media con variedades susceptibles es la categoría que se debe monitorear con mayor intensidad en enero, febrero, agosto, octubre, noviembre y diciembre; en mayo es la altitud media con variedades medianamente resistentes y en marzo la altitud alta con variedades susceptibles.

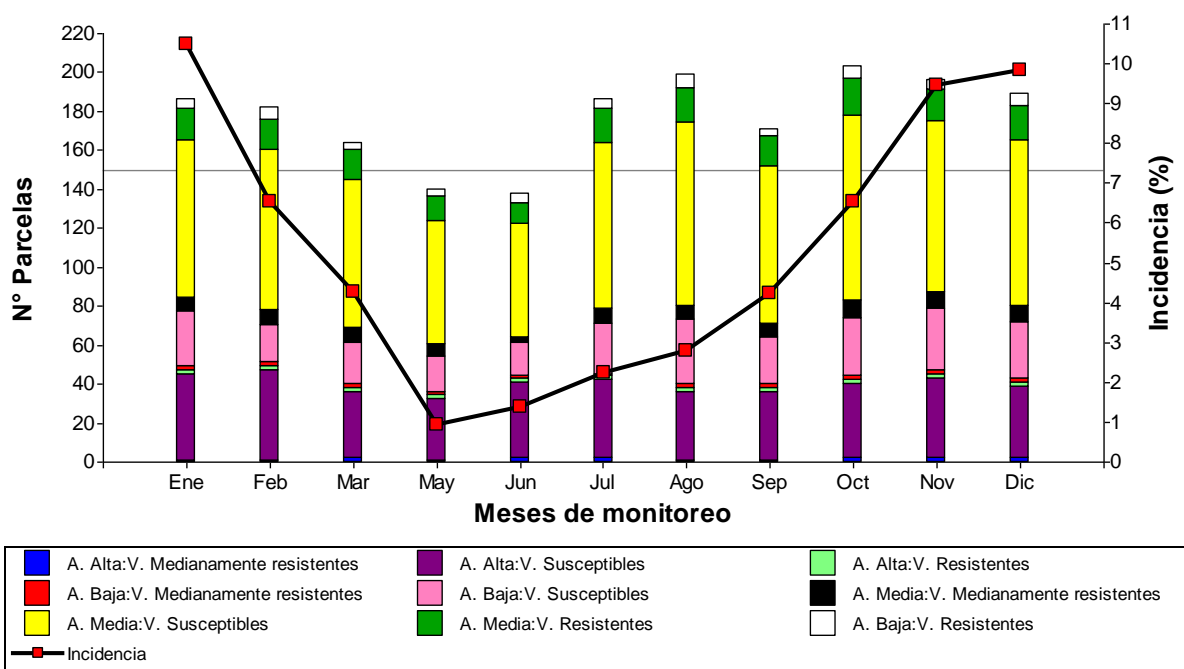


Figura 13. Sistema de monitoreo actual en El Salvador

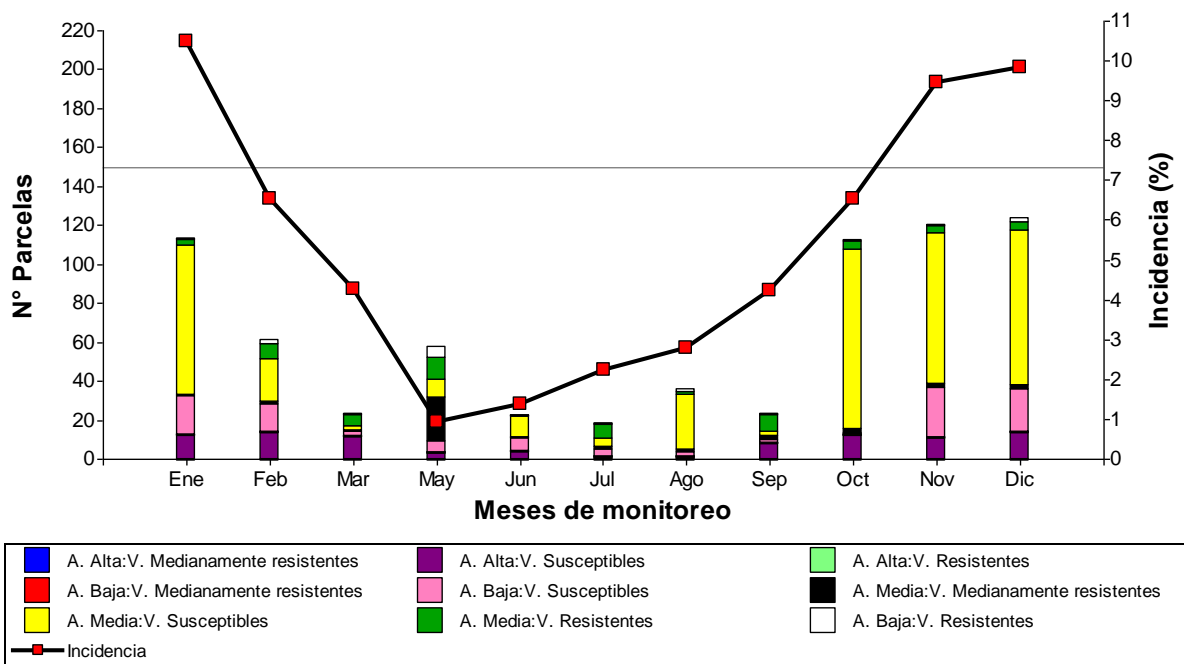


Figura 14. Sistema de monitoreo propuesto en El Salvador

El número de parcelas del sistema de monitoreo en Panamá no es tan uniforme durante el año; existen meses donde el esfuerzo de monitoreo es mayor y otros donde la intensidad disminuye. Según la Figura 15, abril y mayo muestran el mayor número de parcelas, lo contrario sucede con noviembre, diciembre y marzo. Aunque el tamaño de muestra en algunas categorías no tiene una base científica, la altitud media con variedades medianamente resistentes y la alta con variedades medianamente resistentes son las que presentan la mayor intensidad de

monitoreo durante el año. Así mismo, pese a que la curva de la roya disminuye en septiembre y noviembre, tiene una tendencia similar a Honduras y El Salvador.

La escasa disponibilidad de datos generó que el modelo no estimara el tamaño de muestras para algunas categorías. Sin embargo, si se consideran las combinaciones existentes en los doce meses del año, la categoría altitud media con variedades medianamente resistentes se debe priorizar en enero por encima de la altitud baja con variedades medianamente resistentes, la muy alta con variedades medianamente resistentes y la alta con variedades medianamente resistentes. En abril se debe aumentar el esfuerzo de monitoreo en la categoría altitud media con variedades resistentes; en julio, septiembre y octubre en la alta con variedades medianamente resistentes; en julio, septiembre y octubre en la alta con variedades medianamente resistentes (Figura 16).

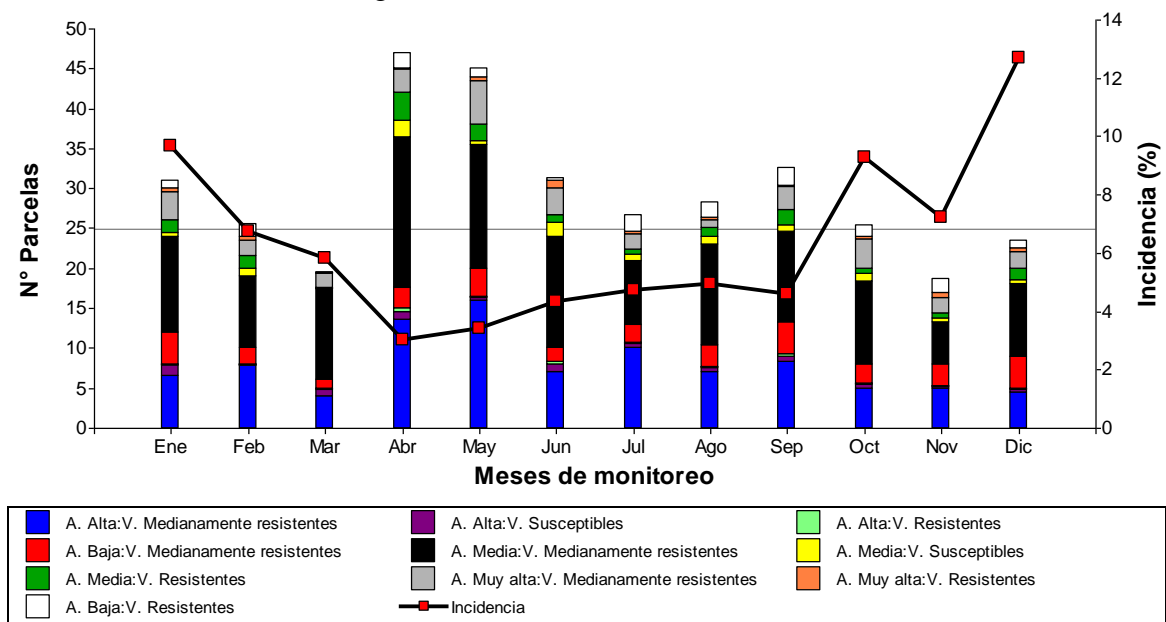


Figura 15. Sistema de monitoreo actual en Panamá

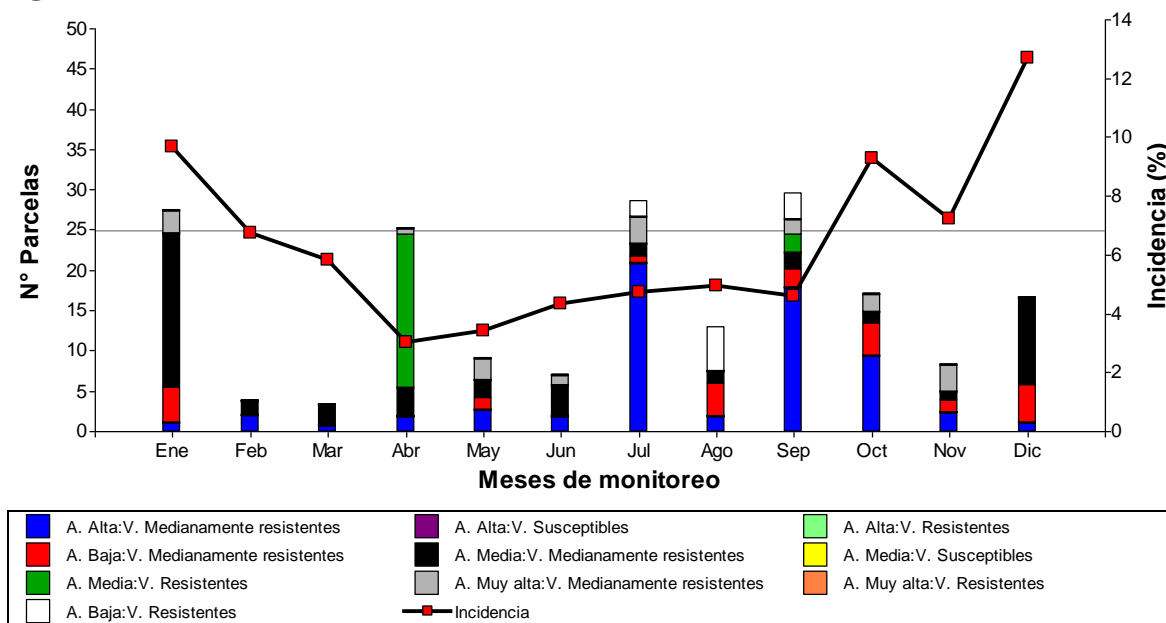


Figura 16. Sistema de monitoreo propuesto en Panamá

En República Dominicana la incidencia de roya es alta si se compara con los otros países, y a pesar de ello, el sistema de monitoreo no es intenso. Los meses en los que se monitorean más parcelas son mayo, abril y junio; los demás tienen un tamaño muestral similar. Según la curva, la roya afecta mayormente los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre con picos más bajos en abril, mayo y junio. Las fincas ubicadas en altitudes medias con variedades resistentes son las que se están muestreando con mayor intensidad en los últimos años. Aunque los muestreos son quincenales, el número de parcelas no supera las 50 al mes, excepto en abril, mayo, junio y julio (Figura 17).

El sistema propuesto para República Dominicana es diferente a los otros tres países, porque se sugiere incrementar el esfuerzo de monitoreo en todas las categorías todos los meses del año. Esto se debe a que a mayor proporción se obtiene una mayor varianza de la proporción, y con ello un mayor tamaño de muestra. Considerando dicho escenario, el número de parcelas debe ser mayor en fincas situadas en altitudes medias con variedades resistentes en el transcurso del año. Los meses con una mayor intensidad de monitoreo deben ser mayo y junio y con una intensidad relativamente menor enero, abril, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre (Figura 18). El sistema de monitoreo sugiere aumentar la intensidad de muestreo aproximadamente en un 60% con respecto al sistema actual.

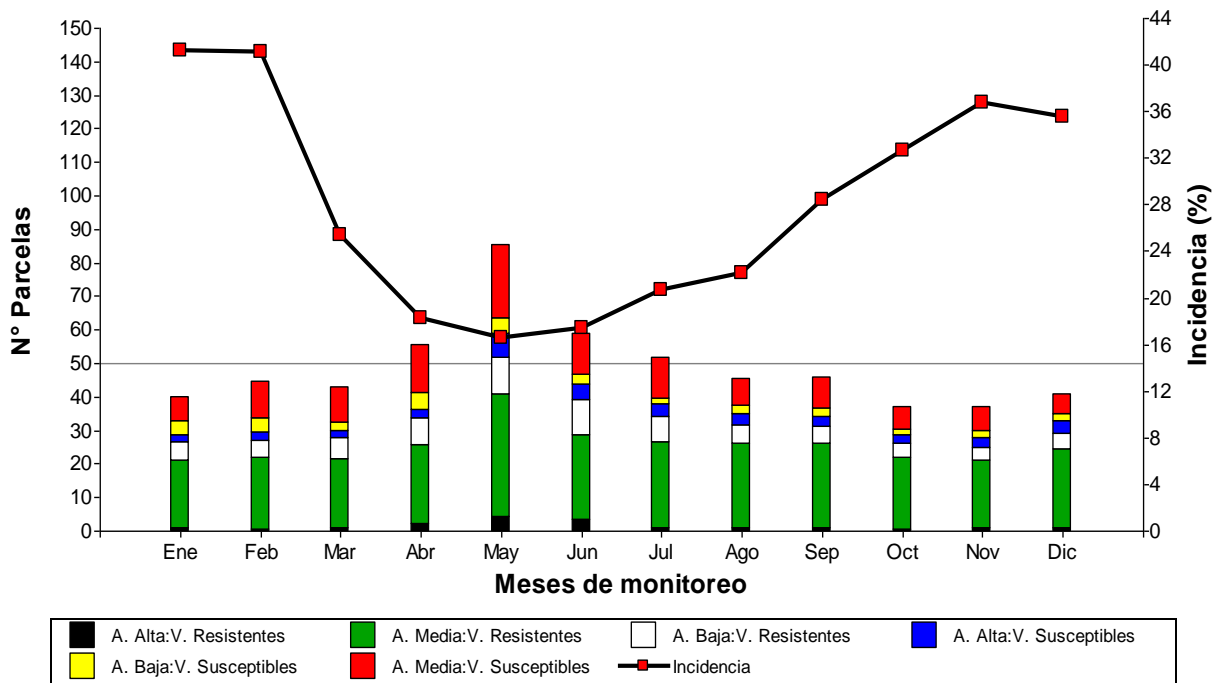


Figura 17. Sistema de monitoreo actual en República Dominicana

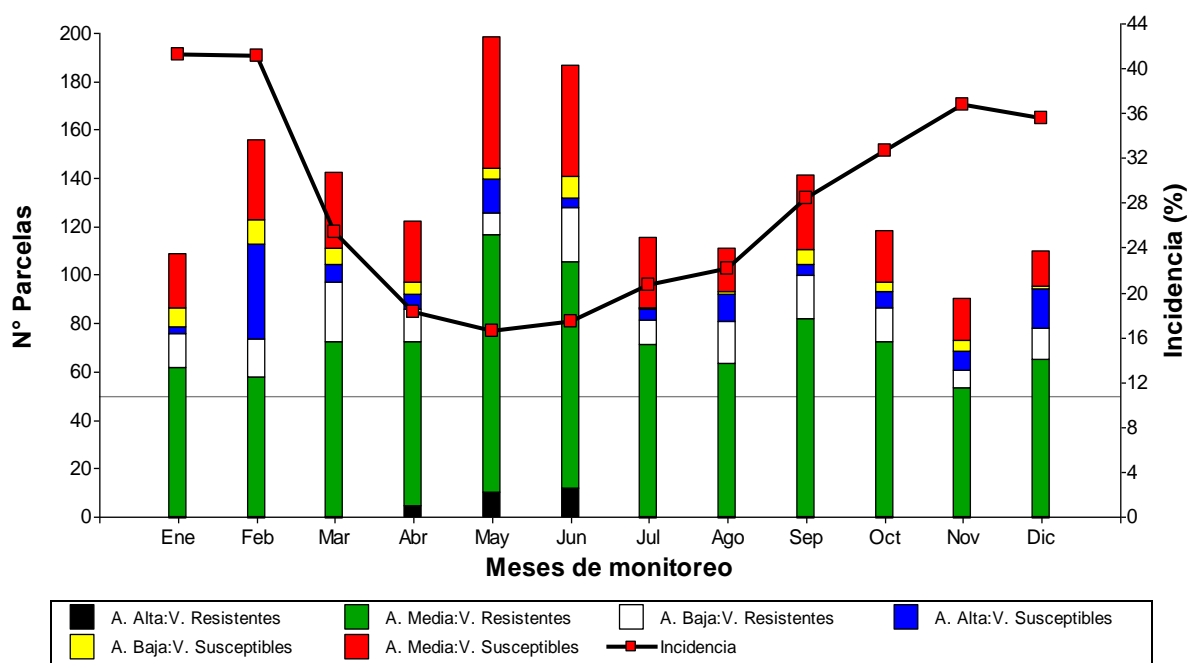


Figura 18. Sistema de monitoreo propuesto en República Dominicana

4.6 Costo del sistema de monitoreo actual y propuesto en cada país

El costo es uno de los elementos importantes al proponer un sistema de monitoreo. En Honduras se propone disminuir el esfuerzo de monitoreo y, por consiguiente, reducir los costos de los muestreos y ganar tiempo para otras actividades.

En los muestreos de los últimos años, las categorías donde se costea más dinero (Figura 19) son altitud media con variedades medianamente resistentes (US\$126 244/año) y altitud alta con variedades medianamente resistentes (US\$113 877/año). Con el ajuste al número de parcelas propuesto, estas mismas categorías demandan un costo de US\$17 555,90 y US\$9164,65 al año respectivamente (Figura 20). El sistema de monitoreo actual en Honduras cuesta aproximadamente US\$439 742 anuales (36 000,00 cada mes), y el propuesto tiene un costo al año de US\$158 274.

En el nuevo método de muestreo, el mes con mayor costo es julio (US\$21 242,70), y los que alcanzan menos gastos son marzo y octubre (US\$8186,05 y US\$8379,59 respectivamente). En enero, junio, agosto, septiembre y diciembre, altitud alta y variedades susceptibles representa la categoría con mayor costo; en febrero es altura media con variedades medianamente resistentes y en julio altitud muy alta con variedades resistentes (Figura 20).

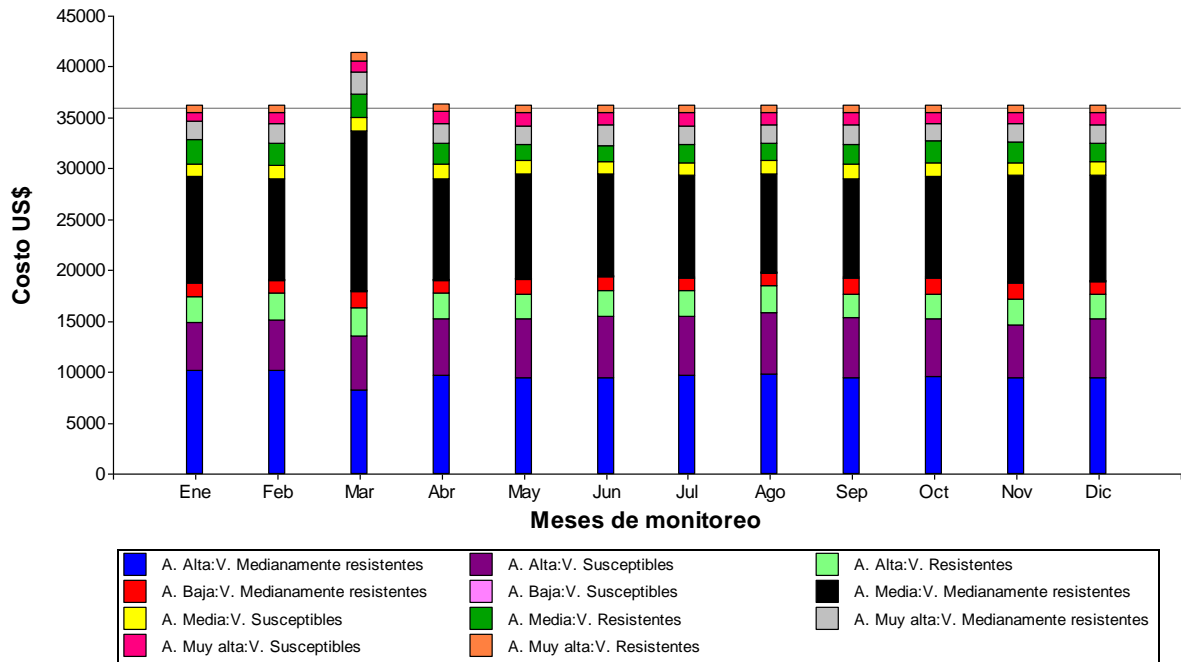


Figura 19. Costo del sistema de monitoreo actual en Honduras

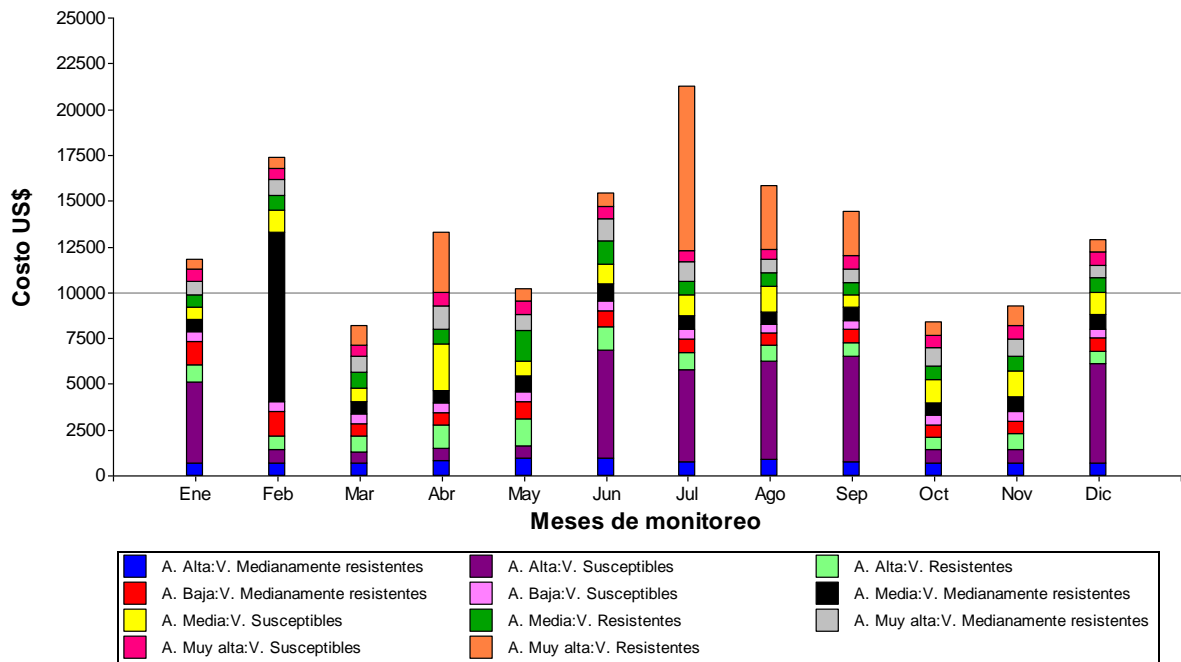


Figura 20. Costo del sistema de monitoreo propuesto en Honduras

En El Salvador el sistema de monitoreo actual cuesta alrededor de US\$5500 mensuales, exceptuando el mes de mayo. En la categoría que se gasta más dinero cada mes (no incluyendo mayo) es altitud media con variedades susceptibles (US\$2500 aproximadamente). En mayo se invierten US\$4 884,43, y por consiguiente corresponde levemente al mes con menor costo de los doce meses que se muestrean al año (Figura 21).

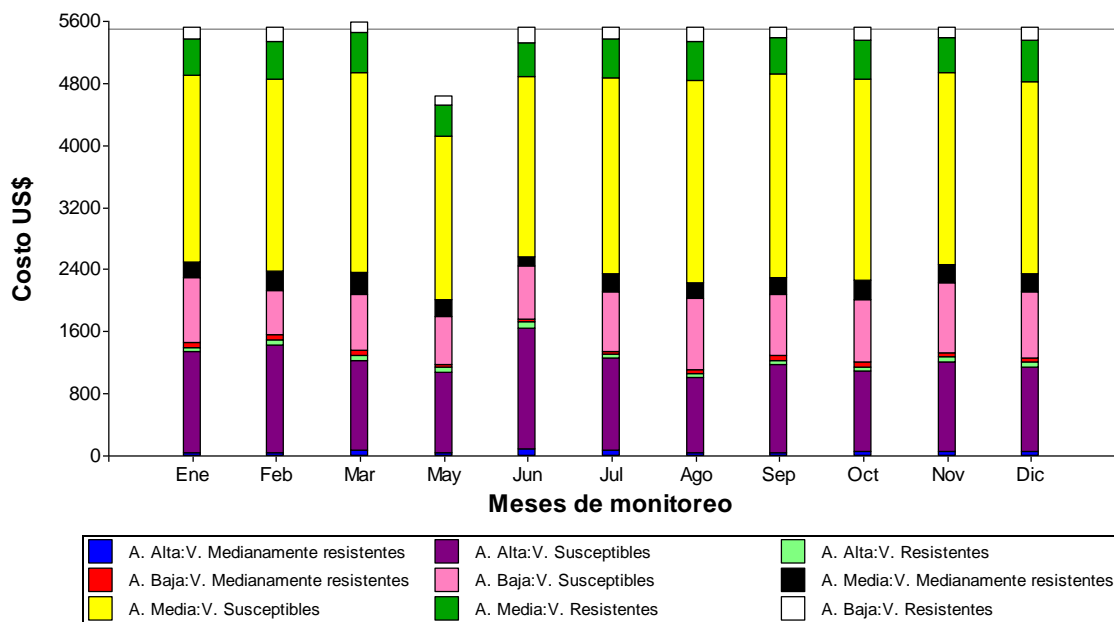


Figura 21. Costo del sistema de monitoreo actual en El Salvador

El sistema de monitoreo que se propone para El Salvador sugiere disminuir los costos a lo largo del año; además muestra las categorías donde se requerirá mayor presupuesto en cada mes. Enero, octubre, noviembre y diciembre son los meses que requieren el presupuesto más alto (US\$3356,26, 3058,78, 3392,34, 3610,61 respectivamente); lo contrario sucede con marzo (US\$800,89), julio (US\$ 548,15) y septiembre (US\$738,22) (Figura 22). La categoría de muestreo altitud media con variedades susceptibles requiere mayor costo en enero (US\$2258,17), agosto (US\$779,05), octubre (US\$2492,07), noviembre (US\$2179,65) y diciembre (US\$2315,32); en marzo es la altitud alta con variedades susceptibles (US\$414,17) y en mayo, la altitud media con variedades medianamente resistentes (US\$753,85).

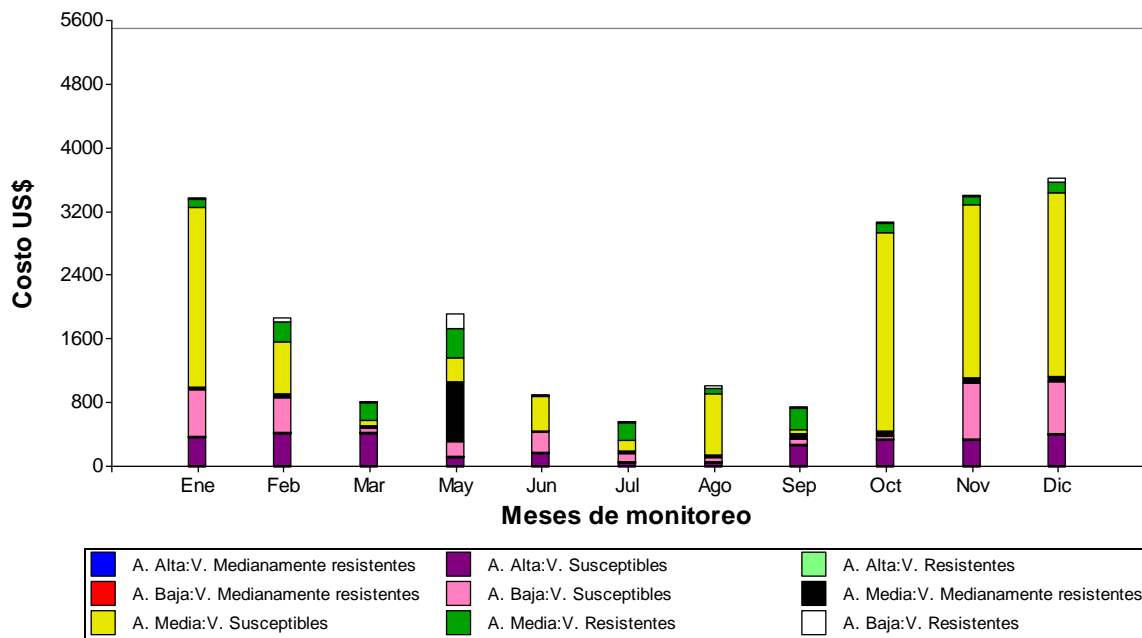


Figura 22. Costo del sistema de monitoreo propuesto en El Salvador

En Panamá, el sistema de monitoreo actual es más caro que en El Salvador, si se considera el esfuerzo de muestreo de ambos países. Los meses donde se costea más son abril (US\$44 200,20) y mayo (US\$42 251,40); contrariamente marzo (US\$17712,40) y noviembre (US\$16 955,50) son meses donde se está invirtiendo menos (Figura 23). En los últimos años la categoría con mayor costo de monitoreo es altitud media con variedades medianamente resistentes en la mayoría de los meses, excepto febrero, mayo, julio y noviembre. Sin embargo, bajo el sistema de monitoreo propuesto, esta categoría tendrá un alto costo solamente en los meses de enero, marzo, junio y diciembre (Figura 24).

La poca disponibilidad de información en los meses de monitoreo en Panamá no permitió estimar el tamaño de muestra para algunas categorías en las fechas de muestreo. Las combinaciones con mayores costos de muestreo corresponden a la categoría altitudes medias con variedades medianamente resistentes en enero (US\$19 417,10) y diciembre (US\$10 227,07); altura media con variedades resistentes en abril (US\$17 917,19), y altitud alta con variedades medianamente resistentes en julio (US\$19 473,97), septiembre (US\$15 412,72) y octubre (US\$9024,01). Aunque febrero y marzo aparentemente son los meses con menos costos, no se puede concluir un valor definitivo porque solamente se estimó el número de parcelas para dos categorías en cada uno (Figura 24).

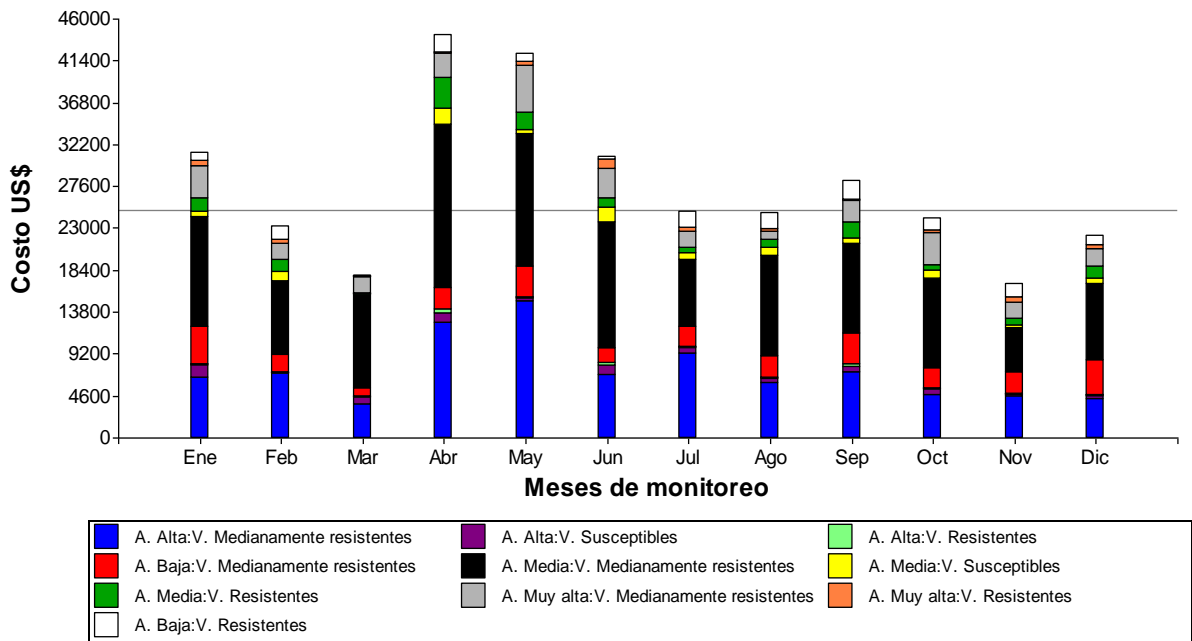


Figura 23. Costo del sistema de monitoreo actual en Panamá

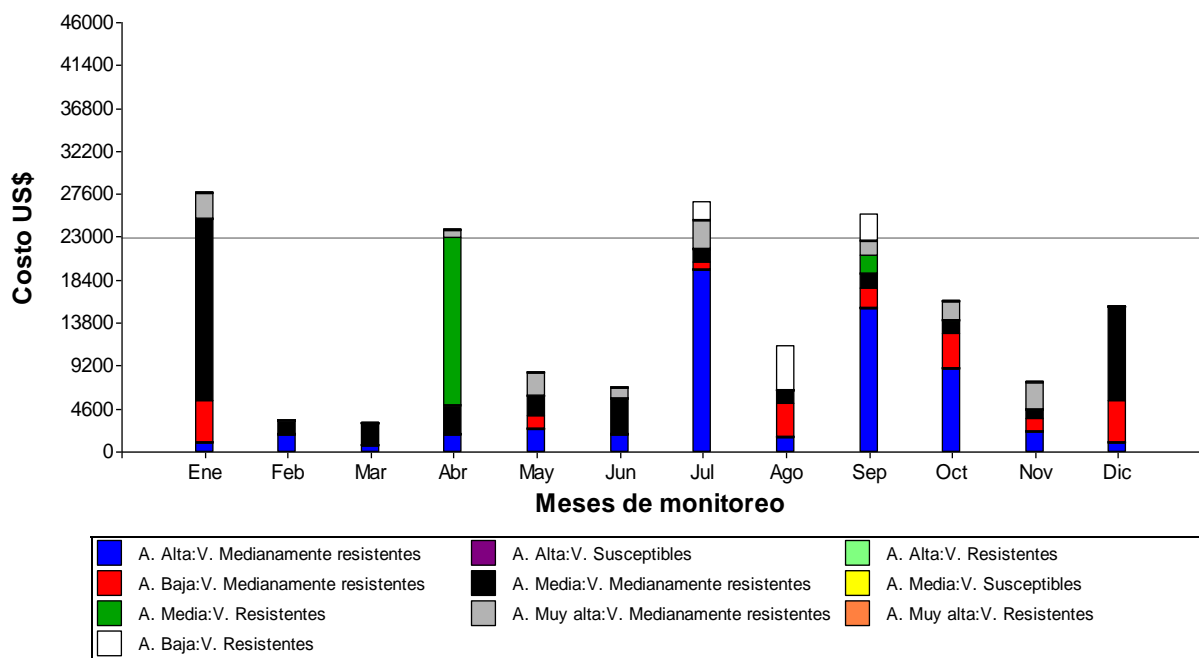


Figura 24. Costo del sistema de monitoreo propuesto en Panamá

República Dominicana es el país con menor intensidad de monitoreo en los últimos años si se considera la distribución y cantidad de fincas cafetaleras. Las fincas ubicadas en altitudes medias con variedades resistentes son las que reportan los mayores costos de muestreos a lo largo del año (Figura 25). La mayoría de los meses tienen un costo de monitoreo similar en el transcurso del año, excepto mayo que demanda mayor presupuesto (US\$4024,32). A pesar de la alta incidencia de roya, la ejecución de los muestreos en este país no representa una actividad de gran importancia para el sector cafetalero; por tal razón, el tamaño de muestra no es elevado como en los otros países considerados en el estudio.

El sistema de muestreo propuesto para República Dominicana sugiere aumentar la intensidad del monitoreo, lo cual incrementaría los costos con respecto al sistema actual. Al igual que el sistema en vigencia, en el sistema propuesto se requiere mayor presupuesto en la categoría de monitoreo altitud media con variedades resistentes los doce meses del año. Los meses con mayor costo son mayo y junio con US\$9342,43 y 8726,61 respectivamente; el mes que demanda menos inversión es noviembre con un total de US\$4531,75 en las seis categorías definidas (Figura 26).

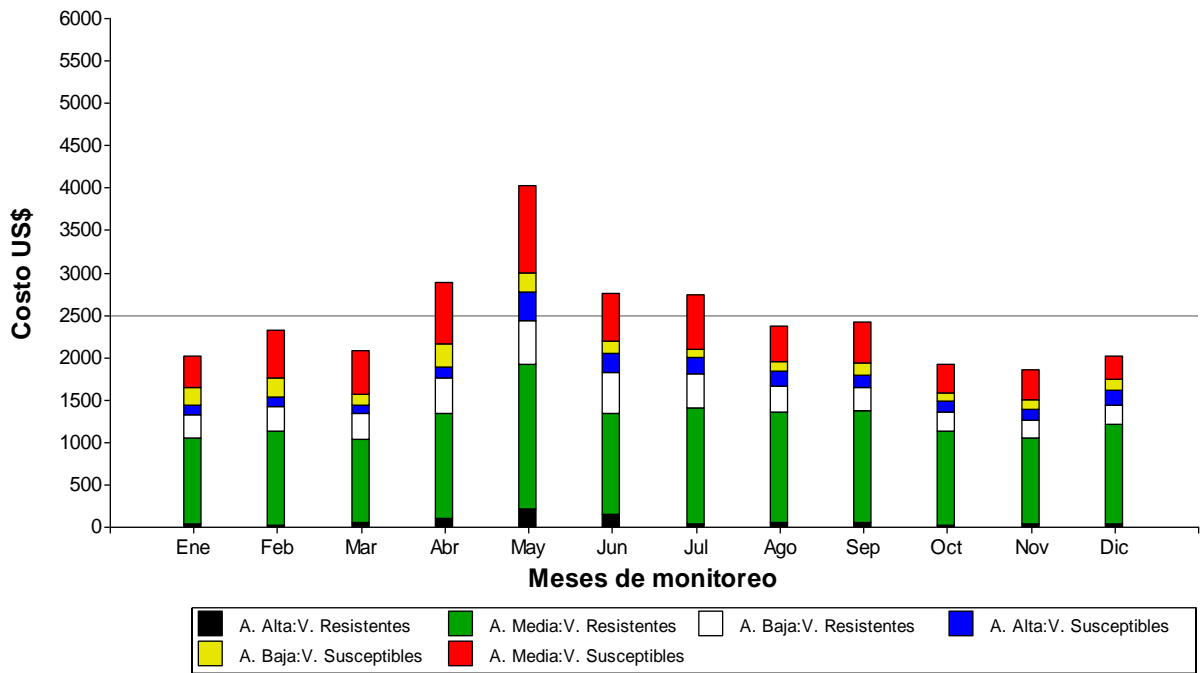


Figura 25. Costo del sistema de monitoreo actual en República Dominicana

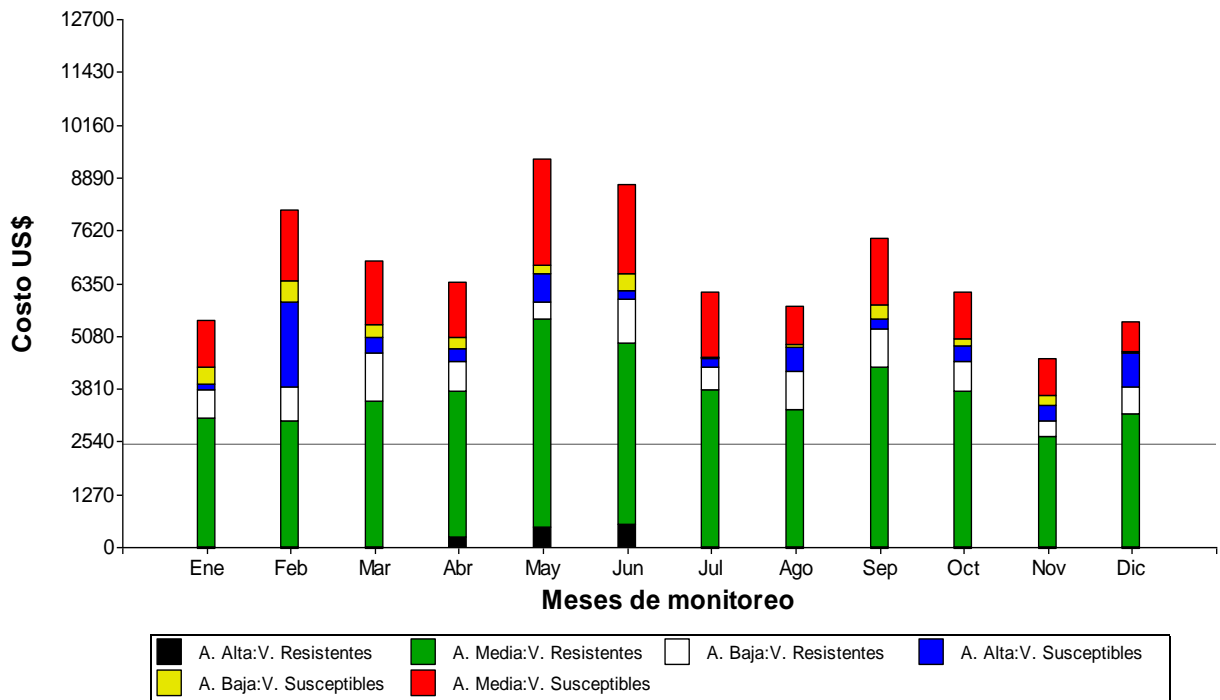


Figura 26. Costo del sistema de monitoreo propuesto en República Dominicana

V. DISCUSIÓN

5.1 Importancia del sistema de monitoreo propuesto considerando vigilancia epidemiológica y cuarentenaria

La vigilancia epidemiológica es la observación sistemática y continua en el tiempo para detectar el avance, presencia o ausencia de una enfermedad dentro de un territorio. Esta vigilancia perfila el desarrollo de metodologías y esquemas estandarizados en sistemas de monitoreo y alerta con herramientas que faciliten el uso, análisis, interpretación e integración de la información con acciones fitosanitarias (FFO *et al.* 2006; Vurro *et al.* 2010; Galindo *et al.* 2011). El sistema de monitoreo que se propone se basa en este tipo de vigilancia, donde la estimación del número de parcelas dependerá de los umbrales de riesgo y niveles de incidencia esperados a lo largo del año poniendo atención en el avance epidemiológico de la enfermedad. Este aspecto coincide con lo descrito por Mora (2019), ya que en México se ejecutan los muestreos bajo un marco racional epidemiológico con alertas epidémicas completas y sustentables. Así mismo FAO (2018b) afirma que uno de los factores más importantes en un programa de vigilancia es la frecuencia de las visitas del personal de campo y que dicha frecuencia dependerá del ciclo de vida o epidemiología de la plaga y/o enfermedad y la fenología de los hospederos. También Campos-Almengor *et al.* (2015), mencionan la posibilidad de realizar un monitoreo técnico de la roya y de establecer oportunamente los índices de infección de la enfermedad, reduciendo riesgos de pérdidas económicas.

La vigilancia cuarentenaria también suele ser de gran relevancia en el monitoreo de enfermedades. Su fin permite la observación estricta y específica de cultivares o variedades con el fin de detectar la pérdida de resistencia a un patógeno. Esta vigilancia requiere de un tamaño de muestra elevado para confirmar la total ausencia de la enfermedad o el rompimiento de la resistencia del hospedero (Osorio 1977; FFO *et al.* 2006; Merianos 2007; FAO 2008; FAO 2018b). Pese a que el sistema propuesto en ciertas categorías de parcelas y momentos de muestreo requiere un número alto de parcelas, no está asociado al tipo de vigilancia cuarentenaria, porque la enfermedad ya existe y el propósito de la estimación se basa en asegurar que un valor bajo de incidencia sea distinto de cero (Madden y Hughes 1999), y no confirmar la presencia de una enfermedad, como pudiera pasar cuando se da el rompimiento de la resistencia del hospedero o cuando se introduce una nueva enfermedad.

El método de este estudio presenta un tamaño muestral para doce categorías de parcelas (combinaciones de altura y variedad), optimizando el sistema y disminuyendo variabilidad; esta condición favorece la eficiencia. Además, en la estimación se toma en cuenta el error estándar asociado a la media y el coeficiente de correlación intraclase (nivel de agregación) que mejora la precisión y garantiza confiabilidad en la definición del número de parcelas. Lo anterior concuerda con lo indicado por FFO *et al.* (2006), al resaltar que los servicios de alerta y vigilancia deben tener una base científica sólida con pronósticos confiables para generar advertencias precisas de manera oportuna. Sin embargo, Colombia no categoriza sus variables importantes, sino que ejecutan el muestreo por conglomerados (distritos), divididos en fincas y

subdivididos en lotes (Ángel 2019); esa misma tendencia se muestra en México donde utilizan un método polietápico de manera nacional, estatal, regional, parcelario, planta, rama y hoja con una metodología estadística ponderada por superficie (Mora 2019).

La selección de altura sobre el nivel del mar y variedad como las variables más influyentes en el desarrollo de la roya del cafeto coincide con Zambolim (2015), quien menciona que en los años de alta carga productiva, por efecto únicamente de una variedad susceptible y altura óptima, la incidencia de la enfermedad puede llegar a 80 o 90% en Brasil. Por esta misma razón, en Colombia se está incrementando el uso de cultivares resistentes para tener una caficultura renovada (Rivillas 2015), con alta predominancia de variedades resistentes (80%) sobre variedades susceptibles (20%) bajo diferentes tipologías de altura (Ángel 2019).

Además de la importancia de la categorización al diseñar el método, es necesario mejorar más la precisión disminuyendo la variabilidad de los datos. Para este fin, el sistema que se sugiere toma en cuenta el nivel de agregación en los muestreos con una distribución beta binomial. Esta decisión es compartida con FAO (2008) al afirmar que la mayoría de plagas y/o enfermedades se agregan hasta cierto punto en el campo; y el aumento de la agregación siempre reducirá la probabilidad de encontrar una infestación y disminuirá el nivel de confianza del muestreo. Por esta razón, cuando existe agregación, el cálculo del tamaño de la muestra se debe realizar idealmente utilizando una distribución beta binomial.

5.2 Ventajas y desventajas del sistema de monitoreo propuesto

Los sistemas o metodologías de vigilancia deben basarse en información científica, geográfica y estadística relevante y ser operativamente factibles (FAO 2018b). Lo último coincide con una de las ventajas del método propuesto porque aumenta la factibilidad del sistema al disminuir los costos. Por ejemplo en Honduras, el sistema actual cuesta US\$439 742 anuales y el propuesto US\$158 274, lo que equivale a una reducción aproximada del 64% de los costos totales. Este aspecto, sumado a la eficiencia y confiabilidad del sistema, lo convierte en una estrategia rentable y sostenible. Ángel (2019) afirma que el costo del sistema de monitoreo de la roya en Colombia es cero por que está incluido en las responsabilidades del extensionista, que contempla además del muestreo, otras actividades con los productores. Sin embargo, es importante reconocer que el tiempo y esfuerzo que requiere el muestreo siempre debe cuantificarse. La vigilancia epidemiológica de México es más integral porque monitorea 16 plagas, pero los costos son elevados (Mora 2019). Si se efectúa una comparación con Honduras, según la FAO (2018a) en el año 2017, México tuvo 505 115 ha cosechadas de café con un rendimiento de 2408 hg/ha e invirtieron US\$1 560 865 anuales en el programa de vigilancia; por otro lado Honduras, en este mismo año cosechó 638 603 ha de café con un rendimiento de 9405 hg/ha, ejecutando un método de muestreo con un costo de US\$439 742 anual. Esto significa que el costo de la vigilancia en México es 17,53 veces más alto que el de Honduras cuando se relaciona con la producción total del país. Estos datos muestran que un sistema como el de México no resultaría factible para países de Centroamérica, ya que

generalmente los costos debe asumirlos el mismo sector cafetalero, el cual está ya muy debilitado por la crisis de bajos precios.

La disponibilidad de información sobre el número de fincas por categoría y distribución espacial de las parcelas es la desventaja del método propuesto. Según Mora (2019), en México existe un enfoque particular del programa de vigilancia que permite generar mapas con probabilidad de brotes en zonas de alta vulnerabilidad a la roya y con proyecciones geoestadísticas se emiten pronósticos para identificar posibles focos de la enfermedad. Aunque el sistema que proponemos da prioridad a la distribución de las parcelas según ponderación por superficie y no bajo una estricta distribución espacial, esto no excluye la posibilidad de mapear los resultados de la vigilancia, pues la georeferenciación de las parcelas permite el mapeo posterior utilizando técnicas de geoestadística.

5.3 Metodología de transición del sistema de muestreo propuesto (de lo teórico a la aplicación)

La estimación del tamaño de muestra se basa en los datos históricos de los últimos años. El sistema se optimiza a través de categorías de muestreo en cada mes de monitoreo. La aplicación del sistema que se está proponiendo es una fase importante en el desarrollo de este estudio. Para este fin, si se considera una categoría en particular, por ejemplo, altitud alta con variedades susceptibles en mayo, los datos muestran que actualmente en Honduras se están monitoreando 104 parcelas (con p de 0,05162); sin embargo, con la estimación se propone muestrear 12.

Para validar el método se debe tomar nueva información; por ejemplo, la de las mismas 104 parcelas de un nuevo año y mes en una categoría. Luego, por remuestreo se obtienen 500 muestras al azar con tamaños de entre 104 y 5, y para cada uno de estos tamaños se obtienen los promedios de los límites superiores e inferiores de los intervalos de confianza al 95%. Si la estimación de 12 es correcta, este valor debería estar cercano al punto de quiebre del gráfico de los límites de confianza promedios en función de n .

Si el punto de quiebre cae en el n de 12, se considera ese tamaño de muestra como correcto, pero si para ese p estimado se obtiene el punto de quiebre cercano a 30, entonces se aumentan 18 parcelas más (30 parcelas en total), al azar de entre las parcelas originales. Con estas 30 parcelas se debe estimar aproximadamente la misma proporción que con 104 parcelas, es decir, en el 95% de los casos los límites de confianza contendrán al valor de proporción estimado con 104 (Figura 27). Como esta estimación de n es empírica y con base en información real, a medida que se agregue información, se retroalimentará el sistema de estimación, mejorando su eficiencia.

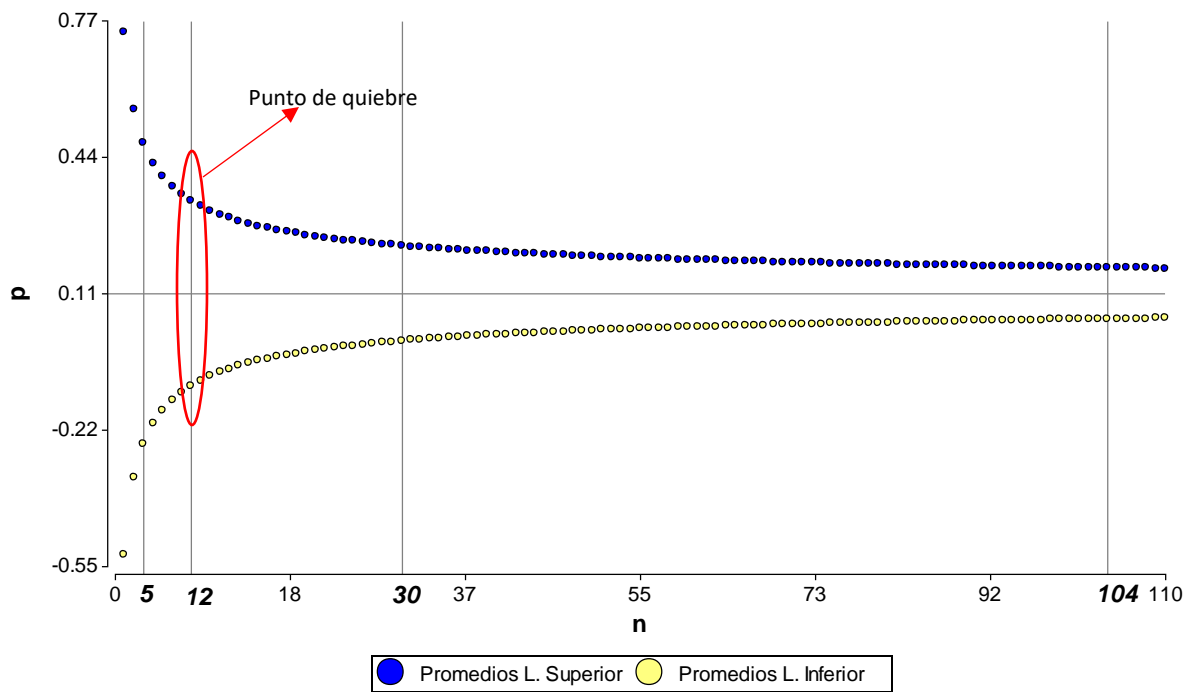


Figura 27. Propuesta para la validación del nuevo método de monitoreo de la roya anaranjada del café en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana

VI. CONCLUSIONES

La vigilancia actual de la roya no está tomando en cuenta el desarrollo epidemiológico de la enfermedad a lo largo del año para definir el número de parcelas que se deben muestrear a nivel nacional en cada mes. Las instituciones definen la intensidad de monitoreo de acuerdo a la disponibilidad de recurso humano y económico.

La definición de altitud y variedad como las variables más influyentes en el desarrollo de la roya anaranjada permitió disminuir la variabilidad de los datos al sugerir un método de muestreo por categoría (combinaciones de altitud y variedad) en cada mes de monitoreo. Las categorías también permiten identificar en cuáles se debe aumentar o disminuir la intensidad de muestreo en una fecha determinada.

La estimación del tamaño de muestra con distribuciones binomial y betabinomial, que incluye el error estándar asociado a la media de la proporción y el coeficiente de agregación, mejoran la precisión y eficiencia del sistema. Este aspecto permite definir los niveles de incidencia en un sitio y momento determinado con mayor confiabilidad.

El sistema propuesto disminuye el costo de muestreo en los países estudiados, excepto República Dominicana. Para Honduras, el método ayuda a reducir un 64% de los costos anuales del sistema actual. Este resultado permite generar presupuesto y tiempo para otras actividades que no se están realizando actualmente debido a la intensidad de los muestreos.

VII. RECOMENDACIONES

Determinar el número de fincas que tienen cada una de las categorías de muestreo de las combinaciones de altitud y variedad a nivel nacional, con el fin de calcular el tamaño de muestra real para el sitio de la categoría que se desea monitorear.

Incorporar la distribución espacial de las parcelas considerando la estimación muestral de este estudio para identificar cualquier foco de ataque de la enfermedad en una fecha específica, evitando ataques agresivos de manera repentina.

Desarrollar un análisis financiero de los costos y beneficios que genera el método de muestreo para cuantificar la inversión, tiempo y mano de obra que se está dedicando exclusivamente al proceso.

Evaluar los impactos directos e indirectos de la aplicación del método considerando su influencia en el control efectivo de la roya anaranjada, para mejorar la vigilancia de la enfermedad a nivel local, regional y nacional.

Gestionar con las instituciones socias de PROMECAFE, la armonización de estas metodologías a nivel centroamericano con el fin de fortalecer los sistemas de alerta temprana y evitar futuras epidemias como la ocurrida entre el 2011-2012 en la región.

VIII. LITERATURA CITADA

- Aime, M. 2006. Toward resolving family-level relationships in rust fungi (Uredinales) *Mycosciense* 47(3):112-122.
- Ángel, C. 2019. La vigilancia en café en Colombia. Cárdenas, J (ed.). Establecimiento de una red regional de alerta temprana para la roya del café: capacitación y taller regional sobre vigilancia fitosanitaria (I, 2018, Cartago, Costa Rica, PROCAGICA. 11-14 p.
- Avelino, J; Muller, R; Cilas, C; Velasco Pascual, H. 1991. Development and behavior of coffee orange rust (*Hemileia vastatrix* Berk. and Br.) in plantations undergoing modernization, planted with dwarf varieties in South-East Mexico *Café Cacao Thé* 35(1):21-37.
- Avelino, J; Toledo, J; Medina, B. 1993. Développement de la rouille orangée (*Hemileia vastatrix*) dans une plantation du sud ouest du Guatemala et évaluation des dégâts qu'elle provoque, in: Quinzième colloque scientifique international sur le café, ASIC: Montpellier, France:293-302.
- Avelino, J; Toledo, J; Medina, B. 1995. Evaluación de épocas y número de aplicaciones de óxido de cobre para el control de la roya anaranjada del cafeto (*Hemileia vastatrix*) en una finca del suroeste de Guatemala, (XVI Simposio). Caficultura latinoamericana IICA-PROMECAFE: Managua, Nicaragua.
- Avelino, J. 1999. Contribution à la gestion du pathosystème *Hemileia vastatrix* et *Coffea arabica* au Honduras. Influence des principaux facteurs physiques, phytotechniques et biologiques. Tesis Orsay, France, Université Paris XI. 127 p.
- Avelino, J; Savary, S. 2002. La lutte chimique raisonnée et optimisée contre la rouille orangée (*Hemileia vastatrix*) L'expérience de l'Amérique latine Plantations, recherche, développement:134-140.
- Avelino, J; Willocquet, L; Savary, S. 2004. Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics *Plant Pathology* 53:541-547. doi 10.1111/j.1365-3059.2004.01067.x
- Avelino, J; Zelaya, H; Merlo, A; Pineda, A; Ordonez, M; Savary, S. 2006. The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations *Ecological Modelling* 197(3-4):431-447.
- Avelino, J; Ten Hoopen, GM; DeClerck, FAJ. 2011. Ecological mechanisms for pest and disease control in coffee and cacao agroecosystems of the Neotropics *In* Rapidel, B; DeClerck, FAJ; J.-F. Le Coq; Beer, J (eds.). Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry Measurement and Payment. Earthscan. p. 91-117.
- Avelino, J; Rivas, G. 2013. La roya anaranjada del cafeto. 47 p. Disponible en hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036
- Avelino, J; Cristancho, M; Georgiou, S; Imbach, P; Aguilar, L; Bornemann, G; Läderach, P; Anzueto, F; Hruska, A; Morales, C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions *Food Sec.* 7:303-321. doi Food Sec. (2015) 7:303–321
- Balmelli, G; Simeto, S; Martínez, G; Torres, D; Pérez, C; Fros, D; Betancur, O. 2009. Incidencia y severidad de enfermedades y plagas en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus*

- en las regiones Sureste y Litoral Oeste de Uruguay *In*. Jornada Técnica Protección Forestal. Uruguay Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). p. 51-65.
- Barquero, M. 2013. Recomendaciones para el combate de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk et Br.). 3era ed. ICAFE (ed.). San José, Costa Rica. 63 p.
- Becker, S; Kranz, J. 1977. Comparative studies on the dispersal of *Hemileia vastatrix* in Kenya *Zeitschrift fuer Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 84(9):526-539.
- Bigirimana, J; Njoroge, K; Gahakwa, D; Phiri, N. 2012. Incidence and severity of coffee leaf rust and other coffee pests and diseases in Rwanda *African Journal of Agricultural Research* 7(26):3847-3852.
- Bock, K. 1962. Seasonal periodicity of coffee leaf rust and factors affecting the severity of outbreaks in Kenya Colony *Transactions of the British Mycological Society* 45(3):289-300.
- Boudrot, A; Pico, J; Merle, I; Granados, E; Vílchez, S; Tixier, p; Virginio-Filho, EDM; Casanoves, F; Tapia, A; Allinne, C; Rice, R; Avelino, J. 2016. Shade effects on the dispersal of airborne *Hemileia vastatrix* uredospores *Phytopathology* 106:572-580.
- Brown, J; Kenny, M; Whan, J; Merriman, P. 1995. The effect of temperature on the development of epidemics of coffee leaf rust in Papua New Guinea. *Crop Protection* 14(8):671-676.
- Buriticá Céspedes, P. 2010. La Roya del Cafeto en Colombia: Realizaciones de Impacto Nacional e Internacional en el Siglo XX *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín* 63(1):5285-5292.
- Campbell, C; Madden, L. 1990. *Introduction to Plant Disease Epidemiology* John Wiley & Sons, New York.:
- Campos-Almengor, O; Gento-Reyes, J; Monterroso, N; Santos, D; Reyes, J; Mazariegos, R. 2015. Evaluación y validación de un método de muestreo comercial de la Roya *Hemileia vastatrix* Berk & Br FAO (ed.). Seminario científico internacional sobre manejo agroecológico de la roya del café (I, Ciudad de Panamá, Panamá. 70-74 p.
- Carrasco, L. 2017. Elementos componentes de sistemas de alerta temprana para café, cooperación realizada por la FAO en algunos de los países miembros de PROMECAFE, modulo WEB para SATCAFE de la FAO Soto, C (ed.). Taller de mapeo de sistemas y herramientas de alerta temprana en Mesoamérica (I, 2017, BID, PROMECAFE, IICA. 97 p.
- Carvalho, C; Fernandes, R; Carvalho, G; Barreto, RW; Evans, HC. 2011. Cryptosexuality and the Genetic Diversity Paradox in Coffee Rust, *Hemileia vastatrix* *PloS ONE* 6(11):26-38.
- Casanoves, F; Ospina, M; Ruenes, V; Morfín, J; Carrillo, O; Rangel, L; Segura, D; Andrade, H; Salgado, B; Morales, W. 2017. Estimación del carbono a partir de inventarios forestales nacionales. Buenas prácticas para la recolección, manejo y análisis de datos. 1 ed. Casanoves, F; Cifuentes, M; Chacón, M (eds.). Turrialba, Costa Rica. 110 p. (410). Disponible en [//hdl.handle.net/11554/8696](http://hdl.handle.net/11554/8696)

- Cerda, R; Avelino, J; Gary, C; Tixier, P; Lechevallier, E; Allinne, C. 2017. Primary and Secondary Yield Losses Caused by Pests and Diseases: Assessment and Modeling in Coffee PLoS ONE 12(1):1-17. doi 10.1371/journal.pone.0169133
- Chuang, T; Jeger, M. 1987. Relationship between incidence and severity of banana leaf spot in Taiwan Phytopathology 77:1537-1541.
- Costa, M; Zambolim, L; Rodrigues, F. 2006. Effect of levels of coffee berry removals on the incidence of rust and on the level of nutrients, carbohydrates and reductor sugar Fitopatologia Brasileira 31(6):564-571.
- Coutinho, T; Rijkenberg, F; Vanasch, M. 1995. Teliospores of *Hemileia vastatrix* Mycological Research 99:932-934.
- Cristancho, MA; Rozo, Y; Escobar, C; Rivillas, CA; Gaitán, AL. 2012. Outbreak of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in Colombia New Disease Reports 25(19): doi 10.5197/j.2044-0588.2012.025.019.
- Cummins, G; Hiratsuka, Y. 2003. Illustrated genera of rust fungi. 3 ed. St. Paul, MN: American Phytopathological Society.
- DaMatta, FM. 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review Field Crops Research 86(2-3):99-114.
- de Carvalho, V; Chalfoun de Souza, S; de Carvalho, V; de Castro, H. 1993. Efeito dos níveis de carga pendente e estágio de desenvolvimento dos frutos sobre a evolução e intensidade de ataque de *Hemileia vastatrix* Berk & Br., agente da ferrugem do cafeeiro Ciência e Prática Lavras 17(4):351-356.
- de Carvalho, V; Chalfoun, S; de Castro, H; de Carvalho, V. 1996. Influence of yield on coffee tree leaves rust Pesquisa Agropecuária Brasileira 31(6):401-405.
- de Carvalho, V; Chalfoun, S; de Castro, H; de Carvalho, V. 2001. Influence of different yield levels on coffee rust evolution and on phenolic compounds on leaves Ciencia e Agrotecnologia 25(1):49-54.
- Di Rienzo, JA; Macchiavelli, R; Casanoves, F. 2011. Modelos lineales mixtos: Aplicaciones en InfoStat. 1 ed. InfoStat, CG (ed.).
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; González, L; Tablada, M; Robledo, CW. 2018. InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, F, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (ed.). Disponible en <http://www.infostat.com.ar>
- Dillard, H; Seem, R. 1990. Incidence - severity relationships for common maize rust on sweet corn Phytopathology 80:842-846.
- Eskes, A; Toma-Braghini, M. 1981. Assessment methods for resistance to coffee leaf rust *Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) FAO Plant Prot. Bull 29:56-66.
- FAO. 2008. ISPM No. 31: Methodologies for sampling of consignments. Convention, SotIPP (ed.). Rome, Italy. 19 p.
- FAO. 2018a. FAOSTAT: Café verde (Página web). Roma, Italia, Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- FAO. 2018b. ISPM 6 Surveillance. Convention, SotIPP (ed.). Rome, IPPC. 14 p.

- Fernandes, RdC; Evans, HC; Barreto, RW. 2009. Confirmation of the occurrence of teliospores of *Hemileia vastatrix* in Brazil with observations on their mode of germination *Tropical Plant Pathology* 34(2):108-113.
- Ferrandino, FJ. 2008. Effect of crop growth and canopy filtration on the dynamics of plant disease epidemics spread by aerially dispersed spores *Phytopathology* 98(5):492-503.
- FEWS NET; RUTA; PROMECAFE. 2014. Coffee Rust Impact in Central America. Coffee producer and laborer income to decline for a second consecutive year Washington DC, USA, 7 p. (SPECIAL REPORT Central America).
- FEWS NET; USAID; PROMECAFE. 2016. El impacto de la roya de café en el sector cafetalero de América Central. Washington DC, USA, 12 p. (América Central Informe Especial).
- FFO; ISDR; UN. 2006. Developing Early Warning Systems: A Checklist. Third International Conference on Early Warning: From concept to action (EWC III Bonn, Germany. 13 p.
- Figueiredo, M; Passador, M. 2008. Morphology, function of sori and variations of the life cycle of rusts *Arquivos do Instituto Biológico* 75(1):117-134.
- Galindo, M; Contreras, C; Aldama, C. 2011. La vigilancia epidemiológica fitosanitaria en México: Un acercamiento metodológico. UASLP; CIACyT (eds.). 212 p.
- Gálvez, G; Flores, M; Portillo, D. 1980. Determinación de razas fisiológicas de roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) en El Salvador. . San Salvador, El Salvador: Instituto Salvadoreño de Investigaciones del Café. 10 p. (Boletín Técnico.).
- Gamboa, H; Urías, C. 2014. Método de muestreo de incidencia de la roya del café para la región del OIRSA: manual del evaluador. 1ª ed. San Salvador, El Salvador, Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA). 34 p. (Serie técnica caficultura. Documento técnico No. 02).
- Garçon, C; Zambolim, L; Vale, F; Costa, H; Silva, M. 2000. Progresso da ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) do cafeeiro (*Coffea arábica* L.) em diferentes altitudes. Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, EMBRAPA: Poços de Caldas, Minas Gerais. 237-240 p.
- Holguín, F. 1985. Epidemiología de la roya del cafeto bajo diferentes condiciones ecológicas (2 Reunión Regional del PROMECAFE sobre el Control de la Roya del Cafeto). IICA: Tegucigalpa, Honduras). 150-158 p.
- Holguín, F. 1987. Estudios epidemiológicos de la roya del cafeto en México. Simposio Latinoamericano sobre Caficultura, IICA: Tapachula, Chiapas, México (X, IICA: Tapachula, Chiapas, México. 32-39 p.
- ICO. 2014. World coffee trade (1963 – 2013): A review of the markets, challenges and opportunities facing the sector:27.
- Imhoff, M; Leonard, K; Main, C. 1982. Analysis of disease progress curves, gradients, and incidence-severity relationships for field and phytotron bean rust epidemics *Phytopathology* 72:72-80.
- James, W; Shih, C. 1973. Relationship between incidence and severity of powdery mildew and leaf rust on winter wheat *Phytopathology* 63:183-187.

- Kranz, J. 1968. Eine Analyse von annuellen Epidemien pilzlicher Parasiten. I. Die Befallskurven und ihre Abhängigkeit von einigen Umweltfaktoren *Phytopathol Z* 61:59-86.
- Kushalappa, A; Akutsu, M; Oseguera, S; Chaves, G; Melles, C; Miranda, J; Bartolo, G. 1984. Equations for predicting the rate of coffee rust development based on net survival ratio for macrocyclic process of *Hemileia vastatrix* *Fitopatologia Brasileira* 9:255-271.
- Lamouroux, N; Pellegrin, F; Nandris, D; Kohler, F. 1995. The *Coffea arabica* fungal pathosystem in New Caledonia - Interaction at 2 different spatial scales *Journal of Phytopathology-Phytopathologische Zeitschrift* 143(7):403-413.
- Lopez-Bravo, DF; Virginio-Filho, EDM; Avelino, J. 2012. Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions *Crop Protection* 38:21-29.
- Madden, L; Hughes, G; Munkvold, G. 1996. Plant disease incidence: inverse sampling, sequential sampling, and confidence intervals when observed mean incidence is zero *Crop Protection* 15(7):621-632.
- Madden, L; Hughes, G. 1999. Sampling for Plant Disease Incidence *Phytopathology* 89:1088-1103.
- Mayne, W. 1930. Seasonal periodicity of coffee leaf disease (*Hemileia vastatrix* B. & Br.). 16 p. (Bulletin. Vol. 4: Mysore Coffee Experimental Station).
- Mayne, W. 1939. A note on the origin of attacks of leaf disease (*Hemileia vastatrix*) in coffee estates *Planters' Chronicle* 34(14):417.
- MCCook, S. 2006. Global rust belt: *Hemileia vastatrix* and the ecological integration of world coffee production since 1850 *Journal of Global History* 1:177-195.
- MCCook, S. 2008. Crônica de uma praga anunciada epidemias agrícolas e história ambiental do café nas Américas *Varia Historia* 24(39):87-111.
- Meira, CAA; Rodrigues, LHA; Moraes, SA. 2008. Analysis of coffee leaf rust epidemics with decision tree *Tropical Plant Pathology* 33(2):114-124.
- Merianos, A. 2007. Surveillance and Response to Disease Emergence. In Childs, J; Mackenzie, J; Richt, J (eds.). *Wildlife and Emerging Zoonotic Diseases: The Biology, Circumstances and Consequences of Cross-Species Transmission*. Berlin, Heidelberg, Springer. p. 477-508.
- Mora, G. 2019. La vigilancia en café en México Cárdenas, J (ed.). *Establecimiento de una red regional de alerta temprana para la roya del café: capacitación y taller regional sobre vigilancia fitosanitaria (I, 2018, Cartago, Costa Rica, PROCAGICA*. 14-16 p.
- Moreno de Alas, G. 1985. Evaluación de las influencias de las variables climáticas en el comportamiento epidemiológico de la roya del cafeto en una zona climática de El Salvador. VIII Simposio Latinoamericano sobre Caficultura (165-172, IICA:Granada, Nicaragua.
- Moreno de Alas, G. 1990. Estudio de la epidemiología de la roya del cafeto *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. en cafetal ecológicamente clasificado como “bosque muy húmedo subtropical”. Taller Regional sobre Epidemiología, Control Químico de la Roya y Otras Enfermedades del Café IICA: Tegucigalpa, Honduras. 17-32 p.

- Muller, R. 1975. L'irrigation précoce, assurance pour une production régulière de haut niveau du caféier Arabica Café Cacao Thé 19(2):95-122.
- Muller, R. 1980. Contribution à la connaissance de la phycomycocénose, *Coffea arabica* L., *Colletotrichum coffeanum* Noack sensu Hindorf, *Hemileia vastatrix* B. et Br., *Hemileia coffeicola* Maublanc et Roger. 174 p. (Bulletin IFCC).
- Muthappa, B. 1980. Behaviour of *Hemileia vastatrix* during unfavourable weather Journal of Coffee Research 10(2):31-35.
- Osorio, J. 1977. Procedimientos cuarentenarios Cartagena, JdAd (ed.). Primer curso subregional sobre roya del cafeto Tachira, Venezuela. 411 p.
- Phiri, N; Hillocks, R; Jeffries, P. 2001. Incidence and severity of coffee diseases in smallholder plantations in northern Malawi Crop Protection 20(4):325-332.
- R-Development-Core-Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. Computing, RfS (ed.). Vienna, Austri. Disponible en <http://www.R-project.org>.
- Rajendren, R. 1967. A new type of nuclear life cycle in *Hemileia vastatrix* Mycologia 59(2):279-285.
- Rayner, R. 1961. Measurement of fungicidal effects in field trials Nature 190:328-330.
- Rayner, RW. 1972. Micología, Historia y Biología de la roya del cafeto. Costa Rica: IICA-CATIE. 68 p. (Publicación Miscelanea).
- Rivillas, C; Serna, C; Cristancho, M; Gaitán, Á. 2011. La roya del cafeto en Colombia. Impacto, manejo y costos de control. Cenicafé (ed.). Chinchiná, Caldas, Colombia. 14 p. (Boletín técnico).
- Rivillas, CA. 2015. Acciones emprendidas por Colombia en el manejo de la roya del cafeto FAO (ed.). Seminario científico internacional sobre manejo agroecológico de la roya del café (I, Ciudad de Panamá, Panamá. 11-16 p.
- Ruíz-García, A; Mendoza-Tijerino, F. 2014. Impacto de la roya en los medios de vida de familias productoras y jornaleros del café en Nicaragua. 2nd ed., Nitlapan, Oxfam, Echo. 72 p.
- Saccas, AM; Charpentier, J. 1971. La Rouille des caféiers due á *Hemileia vastatrix*. IFCC, B (ed.). France: IFCC. 123 p.
- Salgado, BG; Macedo, RLG; Carvalho, VLd; Salgado, M; Venturin, N. 2007. Progress of rust and coffee plant cercosporiose mixed with grevilea, with ingazeiro and in the full sunshine in Lavras - MG Ciencia e Agrotecnologia 31(4):1067-1074.
- Santacreo, R; Polanco, E; Oseguera, S. 1983a. Periodo de incubación y generación de *Hemileia vastatrix* Berk y Br. en tres zonas cafetaleras Honduras, Centro América. IV Simposio Latinoamericano sobre Caficultura IICA, Panamá, Panamá. 199-213 p.
- Santacreo, R; Reyes, E; Oseguera, S. 1983b. Estudio del desarrollo de la roya del cafeto *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. y su relación con factores biológicos y climáticos en condiciones de campo en dos zonas cafetaleras de Honduras, C.A. Simposio Latinoamericano sobre Caficultura (VI, IICA: Panamá, Panamá. 199-213 p.
- Schroth, G; Krauss, U; Gasparotto, L; Aguilar, JAD; Vohland, K. 2000. Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics Agroforestry Systems 50(3):199-241.

- Seem, R; Gilpatrick, J. 1980. Incidence and severity relationships of secondary infections of powdery mildew on apple. *Phytopathology* 70:851-854.
- Seem, R. 1984. Disease incidence and severity relationships *Annu. Rev. Phytopathol* 22:133-150.
- Silva-Acuña, R. 1994. Intensity of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk. and Br.) in coffee plants with different levels of controlled production in Venezuela *Café Cacao Thé* 38(1):19-24.
- Silva-Acuña, R; Maffia, L; Zambolim, L; Berger, R. 1999. Incidence-Severity Relationships in the Pathosystem *Coffea arabica*–*Hemileia vastatrix* *Plant Dis.* 83:186-188.
- Soto-Cárdenas, E. 2017. SISTEMA Participativo de Alertas Tempranas Sanitarias (SPATS) Soto, C (ed.). Taller de mapeo de sistemas y herramientas de alerta temprana en Mesoamérica (I, 2017, BID, PROMECAFE, IICA. 97 p.
- Soto-Pinto, L; Perfecto, I; Caballero-Nieto, J. 2002. Shade over coffee: its effects on berry borer, leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas, Mexico *Agroforestry Systems* 55(1):37-45.
- Soto, C. 2017. Consultoría Sistematización del conocimiento PROMECAFE, F (ed.). I Taller de mapeo de sistemas y herramientas de alerta temprana en Mesoamérica. 97 p.
- Staver, C; Guharay, F; Monterroso, D; Muschler, RG. 2001. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America *Agroforestry Systems* 53:151-170.
- Urías, C. 2017. Modelos y experiencias SAT en la región por OIRSA Soto, C (ed.). Taller de mapeo de sistemas y herramientas de alerta temprana en Mesoamérica (I, 2017, BID, PROMECAFE, IICA. 97 p.
- van der Plank, J. 1963. *Plant diseases: epidemics and control.* New York: Academic Press. 349 p.
- Vurro, M; Bonciani, B; Vannacci, G. 2010. Emerging infectious diseases of crop plants in developing countries: impact on agriculture and socio-economic consequences *Food. Sec.* 2:113-132. doi DOI 10.1007/s12571-010-0062-7
- Zadoks, J; Schein, R. 1979. *Epidemiology and plant disease management.* Oxford University Press, New York. 427 p.
- Zambolim, L; Silva-Acuña, R; Do Vale, FXR; Chaves, GM. 1992. Influencia da produção do cafeeiro sobre o desenvolvimento da ferrugem (*Hemileia vastatrix*) *Fitopatologia Brasileira* 17:32-35.
- Zambolim, L. 2015. La roya del cafeto en Brasil FAO (ed.). Seminario científico internacional sobre manejo agroecológico de la roya del café (I, Ciudad de Panamá, Panamá. 7-10 p.
- Zambolim, L. 2016. Current status and management of coffee leaf rust in Brazil *Trop. plant pathol.*:1-8. doi DOI 10.1007/s40858-016-0065-9

IX. ANEXOS

Gráficos de las variables más importantes según *Random Forest*

