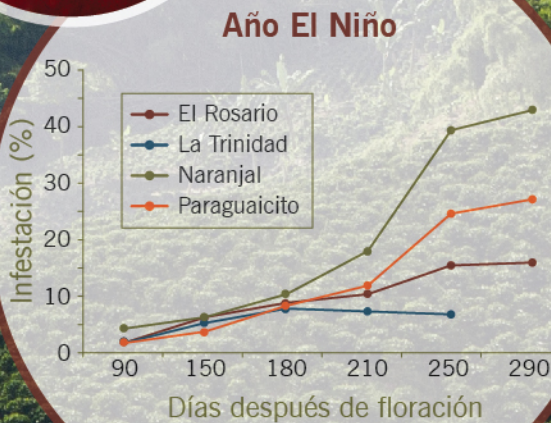
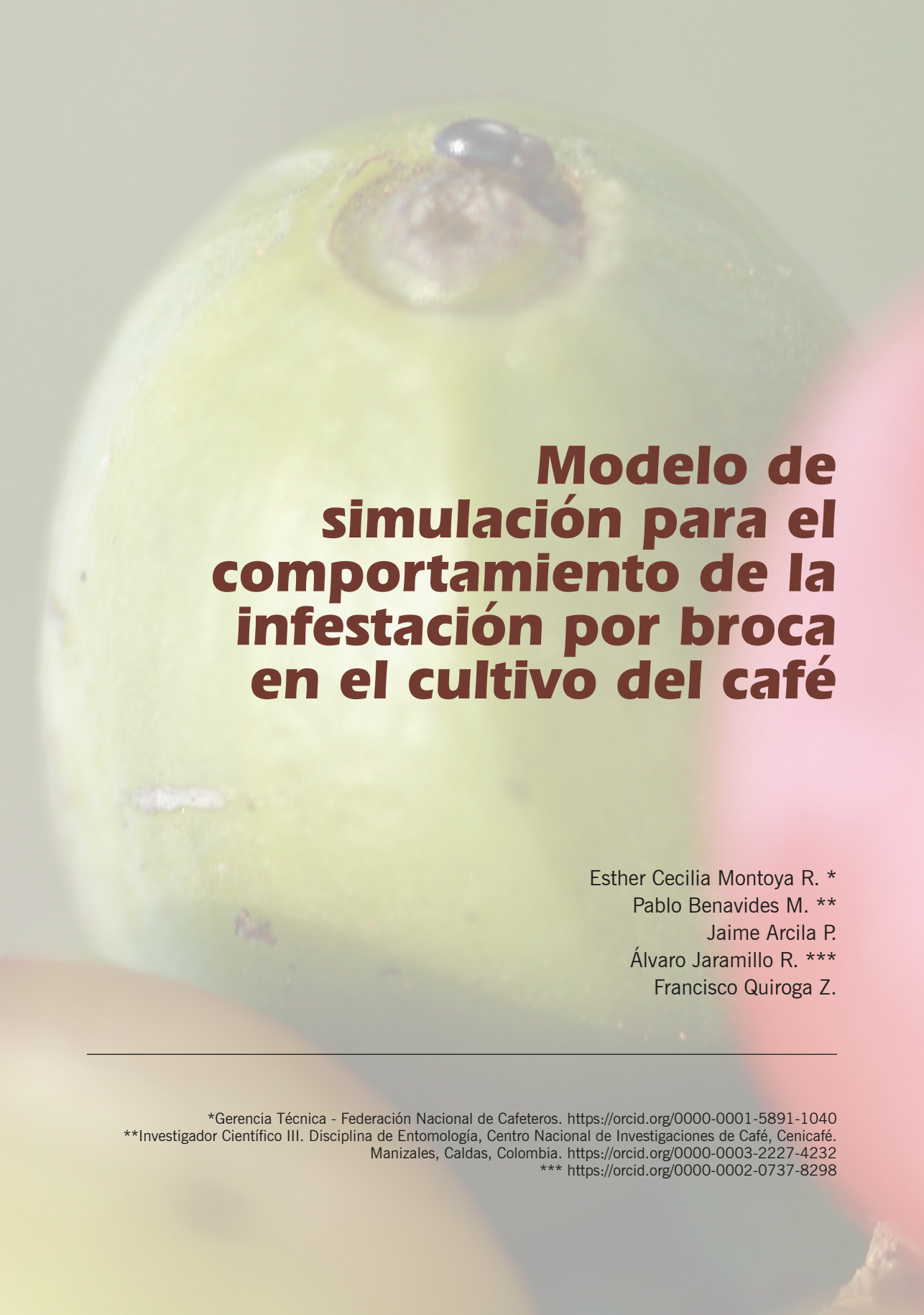


Modelo de simulación para el comportamiento de la infestación por broca en el cultivo del café

Esther Cecilia Montoya R.
Pablo Benavides M.
Jaime Arcila P.
Álvaro Jaramillo R.
Francisco Quiroga Z.





Modelo de simulación para el comportamiento de la infestación por broca en el cultivo del café

Esther Cecilia Montoya R. *

Pablo Benavides M. **

Jaime Arcila P.

Álvaro Jaramillo R. ***

Francisco Quiroga Z.

*Gerencia Técnica - Federación Nacional de Cafeteros. <https://orcid.org/0000-0001-5891-1040>

**Investigador Científico III. Disciplina de Entomología, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2227-4232>

*** <https://orcid.org/0000-0002-0737-8298>



COMITÉ NACIONAL

Ministro de Hacienda y Crédito Público

José Manuel Restrepo Abondano

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural

Rodolfo Enrique Zea Navarro

Ministro de Comercio, Industria y Turismo

María Ximena Lombana Villalba

Director del Departamento Nacional de Planeación

Luis Alberto Rodríguez Ospino

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros

Marcela Uruña Gómez

Período 1° enero/2019 - 31 diciembre/2022

José Eliecer Sierra Tejada (Antioquia)

José Alirio Barreto Buitrago (Boyacá)

Eugenio Vélez Uribe (Caldas)

Danilo Reinaldo Vivas Ramos (Cauca)

Juan Camilo Villazón Tafur (Cesar-Guajira)

Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)

Ruber Bustos Ramírez (Huila)

Javier Mauricio Tovar Casas (Magdalena)

Jesús Armando Benavides Portilla (Nariño)

Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)

Carlos Alberto Cardona Cardona (Quindío)

Luis Miguel Ramírez Colorado (Risaralda)

Héctor Santos Galvis (Santander)

Luis Javier Trujillo Buitrago (Tolima)

Camilo Restrepo Osorio (Valle)

GERENTE GENERAL

Roberto Vélez Vallejo

GERENTE ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO

Juan Camilo Becerra Botero

GERENTE COMERCIAL

Juan Camilo Ramos Mejía

GERENTE TÉCNICO

Hernando Duque Orrego

DIRECTOR INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Álvaro León Gaitán Bustamante

ISSN

0120-047X

ISSN (En línea)

2711-4732

DOI

10.38141/10781/047

Créditos

Edición de textos

Sandra Milena Marín L.

Diseño y diagramación

Luz Adriana Álvarez M.

Fotografías

Archivo Cenicafé

Mapas

Audberto Quiroga Mosquera

Impreso por

--

2022

ISSN

0120-047 X

ISSN (En línea)

2711-4732

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.

El uso de nombres comerciales en esta publicación tiene como propósito facilitar su identificación y en ningún momento su promoción.

Tel. (6) 8500707

A.A.2427 Manizales
Manizales, Caldas, Colombia

www.cenicafe.org

Comité Editorial Cenicafé

Pablo Benavides M.

Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé

Carmenza Esther Góngora B.

Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé

José Ricardo Acuña Z.

Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé

Diana María Molina V.

Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafé

Luis Fernando Salazar G.

Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé

Secretaría Técnica Comité Editorial, revisión de textos y corrección de estilo

Sandra Milena Marín L.

M.Sc., Esp., Ing. Agrónoma. Divulgación y Transferencia, Cenicafé

Citación APA 7ed:

Montoya, E. C., Benavides Machado, P., Arcila-Pulgarín, J., Jaramillo R., A., & Quiroga, F. (2022). Modelo de simulación para el comportamiento de la infestación por broca en el cultivo de café. *Boletín Técnico Cenicafé*, 47, 1–47. <https://doi.org/10.38141/10781/047>



Tabla de CONTENIDO

Introducción	6
Construcción del modelo	11
Evaluación del modelo	18
Dinámica del insecto	18
Población inicial	18
Efecto ENOS	18
Efecto de la recolección oportuna	18
Comportamiento de la infestación	19
Validación del modelo	29
Datos simulados y observados de infestación por broca, año 2011 Estación Experimental Naranjal	33
Datos simulados y observados de infestación por broca, año 2011 Estación Experimental Paraguaicito	34
Datos simulados y observados de infestación por broca, año 2011 Estación Experimental La Catalina	35
Datos simulados y observados de infestación por broca, año 2011 Estación Experimental La Trinidad	36
Aplicación del modelo	37
Literatura citada	43

Introducción

El control de la broca se ha enfocado a través de una estrategia de manejo integrado en el cual se incluyen métodos de control compatibles como el cultural, uso de insecticidas, en una manera racional y el control biológico con parasitoides y entomopatógenos (Bernal et al., 1994; Bustillo & Posada, 1996; Bustillo et al., 1996; Orozco & Aristizábal, 1996; Villalba et al., 1995). La integración de estos métodos ha sido probada en el campo y ha permitido formular una propuesta de manejo racional del problema de la broca a los cafeteros colombianos.

Sin embargo, el diseño de nuevas formas de control, que afectan de manera parcial el ciclo de vida del insecto, y los escenarios de variabilidad climática que afronta la caficultura, exigen el conocimiento del sistema de broca y la planta de café, que es bastante complejo, y su estudio se beneficia con el uso de herramientas de análisis de sistemas como es su representación en un modelo conceptual y matemático (Smerage et al., 1980a, 1980b; Hall & Day, 1977). El **modelo**

conceptual está formado por la representación gráfica de la composición de un sistema, así como de los enunciados cualitativos que acompañan esa representación. Los enunciados matemáticos que describen los componentes, estructuras y todo el sistema como una entidad comprenden el **modelo matemático**. En insectos, el primer modelo matemático para representar el crecimiento de una sola especie apareció a principios del siglo XIX (Verhulst, 1838). En los últimos 50 años los modelos de población han evolucionado a representaciones matemáticas complejas, y las simulaciones con computadores se han hecho necesarias para aproximar las soluciones de las ecuaciones. Se conocen cinco estados diferentes en esta evolución:

- 1) Modelos de una sola especie.
- 2) Modelos de dos especies sin la estructura de la edad.
- 3) Modelos de matriz con la estructura de la edad.
- 4) Modelos orientados a procesos.
- 5) Modelos de comunidades compuestas de múltiples especies (Stimac, 1982; Cheng & Holt, 1990; Cheng et al., 1990; Holt et al., 1990).

El principal objetivo es avanzar más allá de los enfoques clásicos de los primeros trabajos, los cuales fueron ajustes a curvas dinámicas, a enfoques que aumentan el entendimiento de la teoría ecológica la cual guiará a soluciones generales, aplicables a una amplia clase de problemas ecológicos (Pearl & Reed, 1920; Volterra, 1926; Thompson, 1924; Lotka, 1925; Nicholson, 1933; Nicholson & Bailey, 1935; Holling, 1959a y 1959b; Watt, 1959; Hassell & Varley, 1969; Bailey, 1931; Lewis, 1942; Leslie, 1945; Lefkovich, 1965; Stimac, 1977 y 1982; Sharpe & DeMichele, 1977; Logan et al., 1979; Gutiérrez et al., 1981; Hughes & Gilbert, 1968; Shelford, 1927; Hughes, 1963; Gutiérrez et al., 1976, 1988, 1991; Ruesink, 1976; Shoemaker, 1977; Tummala et al., 1975; Stimac & Barfield, 1979; Huffaker, 1980; Getz & Gutiérrez, 1982; Sharkey, 1987; Bustillo, 1983; Shaw, 1984; Benigno, 1988; Gosta, 1991; Kawmoto, 1991; Holt, 1989, 1992).

El comportamiento de la broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae) y su ciclo de vida han sido estudiados por varios autores (Corbett, 1933; Bergamin, 1943; Ticheler, 1963; Baker, 1984; Muñoz, 1989; Decazy, 1990; Baker et al., 1992; Montoya & Cárdenas, 1994). Existen considerables diferencias en cuanto a la información sobre la duración de sus estados, pero esto obedece fundamentalmente a diferencias en las condiciones ambientales de los diversos estudios, especialmente de temperatura. Las ecuaciones de regresión obtenidas por Ticheler (1963) y Borbón (1989), para predecir la duración del ciclo de vida de la broca, se generaron con temperaturas ambientales variables, registrando solo las máximas y mínimas diariamente. Son muy pocas las investigaciones en que este factor se ha controlado o mantenido constante para obtener información sobre los grados-días necesarios para completar el desarrollo de sus estados.

La duración de la biología de la broca, como la de todos los insectos, es dependiente de la temperatura y

normalmente se expresa en acumulación de grados-día. Una forma de obtener esta información que produzca resultados confiables es a través del registro permanente de la temperatura durante el estudio y determinar la mínima a la cual no ocurre desarrollo. Ruiz (1996) determinó bajo condiciones de campo, que la broca toma entre 225 a 230 grados-día desde oviposición hasta emergencia del adulto (45 días), asumiendo un umbral de 16,5°C, para la temperatura en la cual no ocurre desarrollo para todos los estados, estos resultados están de acuerdo con estudios previos de Montoya y Cárdenas (1994). En México, Baker et al. (1992) establecieron parámetros poblacionales de la broca indicando que la capacidad innata de incremento es de 0,065/día, el tiempo de cada generación de 40 días y el tiempo para doblar la población es de 11 días.

El ciclo de vida de la broca se resume a continuación, de los datos obtenidos por Bergamin (1943) en Brasil y otros autores, especialmente Montoya y Cárdenas (1994), Ruiz (1996) y Gaviria et al. (1995). El adulto hembra de *H. hampei*, una vez emerge, tarda unos 4 días para estar listo para la cópula; su período de oviposición es de unos 20 días y coloca entre 2 y 3 huevos/día; en promedio una hembra puede ovipositar 74 huevos durante su vida. La incubación del huevo dura 7,6 días (23°C) y el estado de larva 15 días para los machos y 19 días para las hembras, la prepupa 2 días y la pupa 6,4 días (25,8°C). El ciclo total de huevo a emergencia de adulto se estima en 45 días (22°C). La relación de géneros es aproximadamente de 1:10 en favor de las hembras. Muñoz (1989) presenta evidencias de partenogénesis del tipo telitoquia, al observar un bajo porcentaje de hembras adultas vírgenes que produjeron huevos fértiles; sin embargo, la frecuencia de este evento es muy baja, como lo demostraron Montoya y Cárdenas (1994).

Estudios llevados a cabo bajo condiciones de laboratorio muestran que un 62% de las hembras que emergen de los frutos son fértiles (López, 1993); si esto se comprueba para poblaciones de campo, puede pensarse que a altas densidades de población existe una competencia intraespecífica por cópula entre las hembras, que puede tener implicaciones serias en la dinámica de los adultos que dejan los frutos para colonizar nuevas cerezas.



La broca para reproducirse requiere de los frutos del café, por lo tanto, es necesario conocer en detalle cómo es su desarrollo y cuáles son los momentos críticos de ataque y de reproducción en los frutos; desafortunadamente los estudios de la biología de la broca corresponden a situaciones de laboratorio o a observaciones de campo sin una visión holística del ecosistema donde se desarrolla. La floración del café es un proceso gobernado por condiciones de clima, requiriéndose períodos de humedad y sequía para desencadenar el proceso de floración (Arcila, 1988). Se ha observado que la producción de un

cafetal es variable de un año a otro, variando no sólo por las condiciones agronómicas, fitosanitarias y de manejo, sino por la fisiología de la planta que hace que a un año de alta producción le siga otro de una producción reducida.

En Colombia el tiempo de desarrollo del fruto del café varía de acuerdo con las condiciones climáticas (Salazar et al., 1993), es así como las variedades Caturra y Colombia, desde floración hasta maduración, toman en promedio 32 semanas a una altitud de 1.400 m, sin embargo, bajo condiciones más frías (1.700 m de altitud), el desarrollo está entre 34-36 semanas, pero a una altitud de 1.200 m es de 28-30 semanas. El desarrollo del fruto del café pasa por varias etapas, las cuales han sido divididas de acuerdo con la edad del fruto, así:

- 1) Frutos desde la floración hasta la octava semana, son de consistencia acuosa y la broca no puede reproducirse en ellos.
- 2) Frutos entre 9 y 26 semanas, después de la semana 17 los frutos empiezan el endurecimiento del endospermo y se reduce su contenido de agua, tornándose aptos para que la broca los perfore y pueda desarrollarse.

3) Frutos entre 27 y 32 semanas, inician el proceso de maduración hasta completarla y ser cosechado, la reproducción de la broca en ellos es más rápida y eficiente (Arcila, 1988; Arcila et al., 1993).

Normalmente, los frutos de café empiezan a ser susceptibles al ataque de la broca, cuando su peso seco es de 20% o más, lo cual se logra cuando el fruto alcanza entre 100 y 150 días de desarrollo (dependiendo de la latitud), después de la floración (Montoya & Cárdenas, 1994; Penados & Ochoa, 1979).

Para encontrar el hospedante, se supone que la broca es primero atraída por el olor, color y forma de una cereza. Las que llegan después son atraídas por los mismos factores, pero también por los olores liberados por la primera broca durante el proceso de perforación de la cereza. Hay evidencias que en los desechos fecales de la broca se producen sustancias alcohólicas que atraen otras hembras. Las hembras de la broca debido a lo anterior tienden a agregarse al llegar a un cafetal, concentrándose en ciertas ramas y árboles. Estudios realizados en Brasil (Batista et al., 1988), muestran que una mezcla de los alcoholes metanol/etanol en relación de 3:1, es capaz de atraer hembras adultas a trampas colocadas en cafetales, sin embargo, observaciones hechas en Colombia, muestran que el radio de acción de estos atrayentes es muy pequeño limitando así su uso para fines prácticos de control (Herrera 1997), sin embargo, pueden utilizarse para detectar el momento de vuelos de la broca en un cafetal.

Miguel y Pauline (1975), en el Brasil, hicieron observaciones sobre el tiempo que una hembra de la broca demora en penetrar un fruto, encontrando que varía de acuerdo con el estado de desarrollo del mismo, así: frutos verdes 5 horas 36 minutos, frutos pintones 5 horas 54 minutos, frutos maduros 4 horas 50 minutos y frutos secos 11 horas 21 minutos. Esta información es de importancia para utilizar medidas de control que deben ser dirigidas al adulto. El incremento de la población durante el período de fructificación del café no es muy grande comparado con otros insectos. Baker (1984), observó incrementos de poblaciones de la broca de 4-5 veces desde abril cuando los frutos están aún semi-consistentes hasta septiembre, cuando se inició la cosecha. La humedad afecta la tasa de

mortalidad y el potencial reproductivo de la broca. A bajas humedades ocurre alta mortalidad y la máxima fecundidad se encontró a 90,0% y 93,5% de HR (Baker et al., 1992a). La emergencia de la broca de frutos infestados se incrementa a humedades entre 90% - 100% HR, pero disminuye cuando la temperatura es inferior a 20°C (90% - 100% HR); también se incrementa entre 20-25°C de temperatura y por encima de este rango, no se presentan aumentos (Baker et al., 1992a).

La broca una vez se establece en un fruto apto para su desarrollo permanece en su interior depositando huevos y cuidando de su progenie. Para el tiempo que los frutos completan su desarrollo, la broca como mínimo ha completado una generación y en el interior de los frutos pueden encontrarse muchos adultos y estados inmaduros. Si los frutos maduros brocados no se recogen, pueden caer al suelo o permanecer en el árbol en donde se secan y la broca continúa desarrollándose. Un fruto seco puede albergar desde diez adultos de broca hasta ciento cincuenta. Cuando el período de lluvias llega, se inicia la emergencia de

las brocas de estos frutos, los cuales van a colonizar nuevos frutos en el árbol.

Las mediciones de poblaciones hechas en diversos lugares en Colombia después de la llegada de la broca, han mostrado que este insecto alcanza niveles mayores del 80% de infestación, pero observaciones recientes realizadas en cafetales que llevan un tiempo (2-3 años) con broca, han mostrado la presencia de muchos enemigos nativos y otros organismos que ejercen competencia inter-específica (Bustillo, 1996). La acción combinada de estos factores de mortalidad es responsable de la disminución en sus poblaciones (30%-50% de infestación). En algunos casos en que el ecosistema cafetero no ha sido alterado con el uso de insecticidas para el control de la broca, la reducción de sus poblaciones ha sido más drástica.

Son muchas las referencias (más de 500), de modelos de simulación y que son realmente regresiones lineales simples. De los trabajos consultados, son pocos los que presentan una estructura basada en el proceso biológico, tanto del hospedante como el de la plaga, interactuando con las condiciones climáticas.

Sobre la broca del café se ha acumulado una vasta información de su biología, comportamiento, sus relaciones con la planta de café y diferentes métodos culturales, biológicos y químicos para combatirla, lo que permite acometer un proyecto de desarrollo de un modelo que simule la dinámica de sus poblaciones en relación con la planta de café y las diferentes opciones de control. Con el propósito fundamental de describir en forma aproximada, el funcionamiento real del ataque y dinámica de la broca, se propuso la construcción de un modelo matemático de simulación, utilizando las técnicas matemáticas y de investigación de operaciones, con base en la formulación de un sistema de análisis viable, que integre las interacciones entre sus componentes: planta, broca y condiciones ambientales. Así, un modelo de simulación para la broca es una herramienta para:

- 1) Visualizar el sistema y analizarlo en una forma holística.
- 2) Re-direccionar y establecer prioridades a la investigación llenando los vacíos existentes en el conocimiento del sistema.
- 3) Estimar parámetros y definir su sensibilidad.
- 4) Ejecutar experimentos usando el modelo en lugar de realizar experimentos de campo muy elaborados, demorados y costosos.
- 5) Analizar estrategias de manejo y llegar a recomendaciones sobre costo/beneficio.

El objetivo de este trabajo fue construir un modelo de simulación, basado en fundamentos teóricos y matemático-estadístico, para explicar y representar la dinámica de la infestación causada por la broca del café.

A continuación, se ilustran los conceptos y fundamentos teóricos, utilizados en la construcción del modelo, el proceso de evaluación de su estructura, el proceso de validación, como herramienta para describir el comportamiento de la infestación causada por la broca del café. Finalmente se ilustra la aplicación del modelo para la construcción de mapas de riesgo.

Construcción del modelo

Los estudios de población en insectos sobre los hospedantes, reconocen la influencia del medio ambiente y la importancia del tiempo en el incremento o disminución de los niveles de infestación durante su interacción (Figura 1). Los sistemas de cómputo y la simulación matemática son herramientas que permiten conocer y cuantificar cada una de las partes de un sistema complejo, como sus interacciones y su efecto sobre la producción. Así mismo, la construcción de un modelo, implica reunir la información experimental, seleccionar aquella que puede sustentar las relaciones que se dan en el proceso e identificar la que hace falta, para describir el mundo real.

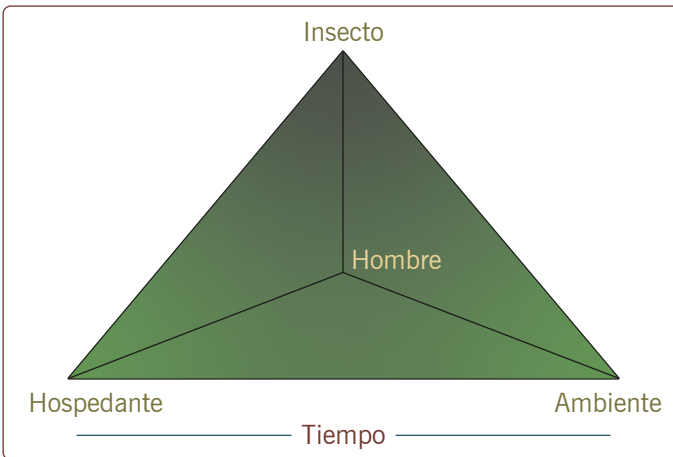


Figura 1. Representación gráfica del teorema de equivalencia.

La simulación del comportamiento de la infestación por broca permite proponer modelos de previsión, precisando épocas, frecuencias y niveles de infestación para controlar el ataque de la broca del café sin causar daño económico.

Teniendo presente el concepto del teorema de equivalencia (Figura 1), en la construcción del modelo matemático para la descripción del comportamiento de la infestación por broca, se identificaron como variables exógenas el ambiente, el hospedante y el insecto, y como variable endógena la infestación o porcentaje de frutos perforados por broca.

En la Figura 2, se presenta el diagrama de Forrester para la estructura del modelo de broca, teniendo en cuenta los conceptos de la Figura 1 y el inóculo inicial para que empiece el proceso de infestación. En esta Figura, **el ambiente** está representado por la temperatura del aire y la humedad relativa, como elementos que influyen en la dinámica del insecto y en el proceso de emergencia; **el hospedante** está representado en la edad del fruto y en el número de frutos de café disponibles para ser infestados; **la intervención del hombre** en este proceso y en esta primera versión del modelo, está representado en la cosecha oportuna de los frutos maduros y en una recolección eficaz, desde el punto de vista cero frutos maduros infestados dejados en el árbol y en el suelo.

A continuación, de acuerdo con la Figura 2, se describe la construcción del modelo de simulación para el comportamiento de la infestación por broca del café.

La población inicial de huevos está conformada por el número de brocas por fruto perforado tanto en el árbol como en el suelo y el número de posturas por hembra - día.

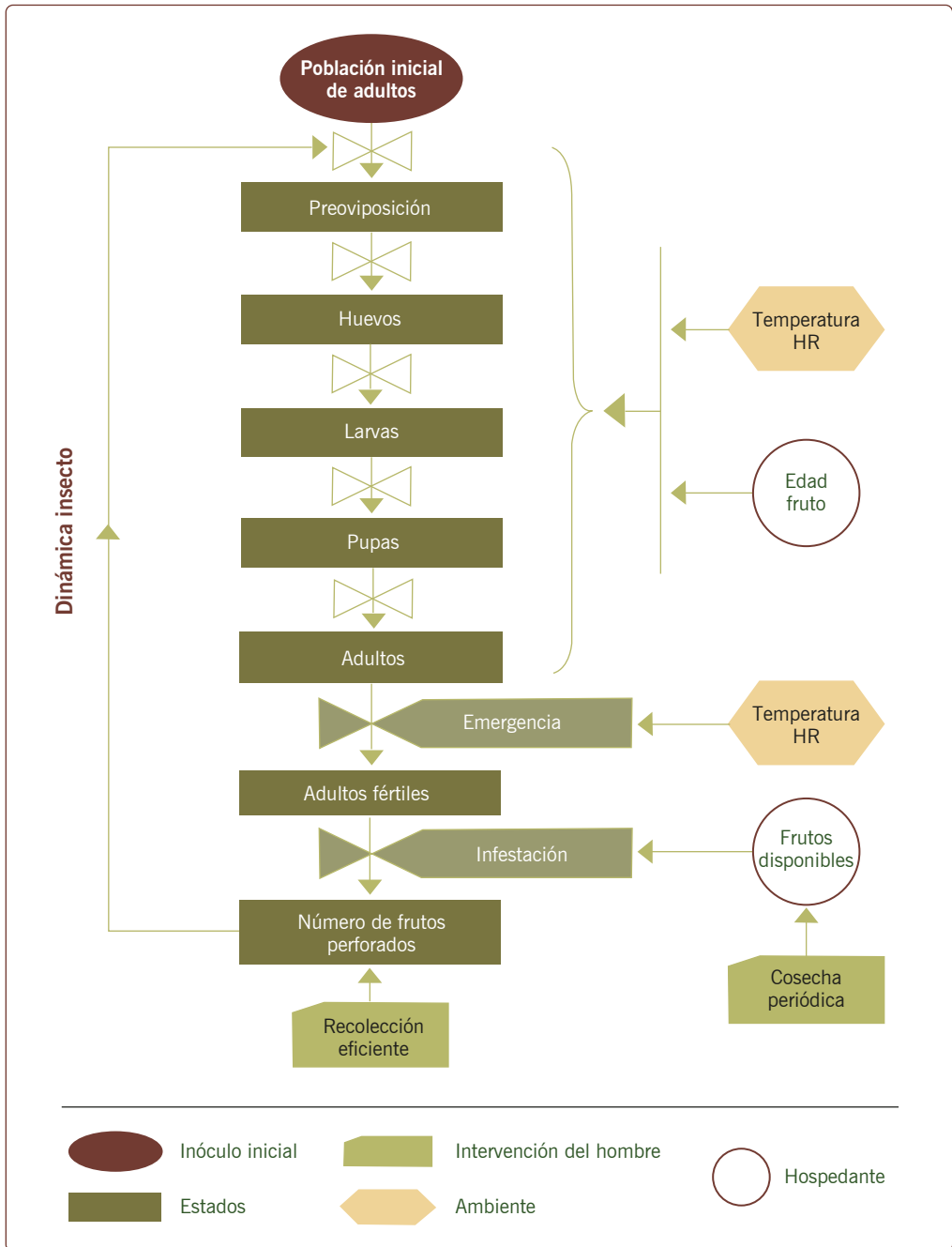


Figura 2. Diagrama de Forrester. Comportamiento de la infestación por broca.

Para el **proceso dinámica del insecto**, se asumió el modelo propuesto por Bellows y Birley, citados por Quintana y Velásquez (1994). Este modelo consta de un conjunto de ecuaciones con las cuales se estima el desarrollo de los individuos de varias cohortes o generaciones que entran a un estado, en diferentes tiempos. Para aplicarlo, se requiere del conocimiento de la distribución estadística de los tiempos de entrada al primer estado. Si dicha distribución no es conocida, se puede asumir un parámetro de forma. El modelo de Bellows y Birley, tiene dos expresiones principales. La primera de ellas, estima la frecuencia en el estado j en el tiempo t ($f_j(t)$), en función de las contribuciones de los individuos que entran en el tiempo $0, 1, 2, \dots, t$, así:

$$f_j(t) = M_1 \sum_{i=1}^t P_j(i) \Phi_j(t-i) [1 - H_j(t-i)]$$

Donde:

M_1 : Número de individuos que entran al primer estado.

$P_j(i)$: Porcentaje de individuos que entran en el estado j , en el tiempo i .

$\Phi_j(t-i)$: Probabilidad de supervivencia de los individuos, en el intervalo de tiempo (i,t) .

$1-H_j(t-i)$: Probabilidad de que los individuos no pasen al estado $j+1$.

La probabilidad de supervivencia del adulto (PSA), para el caso de la broca del café, se obtiene con la siguiente ecuación, en función de la edad del fruto (DDF):

$$PSA = -0,929181 + 0,37476 \ln(DDF); r^2 = 0,93$$

Esta expresión fue obtenida con los datos publicados por Ruiz (1996), quien muestra la probabilidad de sobrevivencia para cuatro fechas después de la floración (60, 90, 120 y 150 días), hasta el momento de la cosecha, en tres localidades. Para los demás estados de la broca, fue asumida como probabilidad de supervivencia del estado adulto.

La segunda expresión del modelo de Bellows y Birley, estima el porcentaje de la población que entra al estado $j+1$ en el tiempo t ($P_{j+1}(t)$), en función de las proporciones que entran al estado j en diferentes tiempos, así:

$$P_{j+1}(t) = \sum_{i=0}^t P_j(i) \Phi_j(t-i) H_j(t-1)$$

Donde:

$H_j(t-1)$: es la probabilidad para que un estado j dure $t-1$.

En la dinámica de la broca, representado en la Figura 2, el número de generaciones, según trabajos realizados en Cenicafé, está en función de la temperatura media por día y de acuerdo con ello, se determinó **el intervalo de tiempo** ($t-1$), para la solución numérica del modelo de Bellows y Birley, de la siguiente manera: para temperaturas promedio por día, mayores de 22°C, el intervalo es tres días; para temperaturas promedio por día entre 19,2 y 22°C, el intervalo es 5 días; y para temperaturas promedio por día menores 19°C, el intervalo es 9 días. Para complementar el modelo, es necesario hacer algunos supuestos acerca de las distribuciones de la duración de los estados y el tiempo de entrada al primer estado. Bellows y Birley sugieren que es práctico asumir que la tasa de desarrollo en un estado tiene una distribución normal entre los individuos, de tal forma que la distribución de la duración de un estado es normal inversa. Luego, la distribución de Weibull es usada para que la función de distribución acumulativa tome la siguiente forma:

$$H_j(t) = 1 - \text{EXP}(t / Q_j)^{\alpha_j}$$

Donde:

α y Q son parámetros de forma y de escala, respectivamente.

La distribución de Weibull, también es utilizada para modelar la distribución del tiempo de entrada al primer estado, así:

$$P_j(t) = [\exp(-((t-1) / Q_0)^{\alpha_0})] - [\exp(- (t / Q_0)^{\alpha_0})]$$

El valor de α_0 puede ser igual a 1 y Q_0 es el tiempo promedio de duración de la pre-oviposición y los otros valores de Q son los promedios de duración de los otros estados. Para el caso de la broca del café, si la edad del fruto es menor o igual a 150 días, la duración de la pre-oviposición (DP), depende de la edad del fruto, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$DP = 206,0 - 2,18DDF + 0,00563DDF^2; r^2 = 0,94$$

Esta expresión fue obtenida con la información publicada por Ruiz (1996), quien presenta para diferentes días después de la floración, el tiempo en días para la pre-oviposición. También propone para una edad del fruto mayor de 150 días, como

duración de pre-oviposición, cuatro días. Para la duración de los otros estados, fueron ajustadas las siguientes ecuaciones, con la información publicada por Borbón (1989):

$$\text{Duración primer estado (huevos)} = 34,25 - 1,42TMD + 0,14 HR$$

$$\text{Duración segundo estado (larvas)} = 90,73 - 3,73TMD + 0,32 HR$$

$$\text{Duración tercer estado (pupas)} = 44,54 - 1,88TMD + 0,14 HR$$

$$\text{Duración cuarto estado (adultos)} = 11,30 - 0,48TMD + 0,078 HR$$

Donde TMD es la Temperatura media diaria en °C, con valores para aplicar la expresión, entre 19 y 29 °C y HR es la Humedad relativa, en porcentaje, con valores para aplicar la expresión, entre 74% y 91%.

Este método de estimación, para el número de estados, propuesto por Bellows y Birley, tiene algunas ventajas, entre otras: los parámetros α y Q pueden ser usados para definir la distribución de la duración de un estado y es posible obtener una tasa de supervivencia diferente en cada uno; para su aplicación se requiere de una población inicial de huevos y cero individuos en los demás estados y que en las últimas evaluaciones todos los huevos hayan pasado a los otros estados; tiene la ventaja de mostrar el efecto del control de la broca, ya que maneja la probabilidad de permanencia de los estados y la probabilidad de pasar de un estado a otro.

Para el proceso de emergencia (Figura 2), se estableció la ecuación para describir la emergencia de la broca de los frutos del suelo, soportado con los resultados ilustrados en las Tablas 1 y 2, donde se evidencia la diferencia para cada sitio, entre las condiciones de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), tanto en la variable número de brocas capturadas por trampa (Tablas 1 y 2) como en la variable exógena de temperatura. Con estos resultados y la recomendación del experto en clima, se deja la temperatura como la variable exógena que más influye en el proceso de emergencia (porcentaje de brocas emergidas: PBE), de acuerdo con la siguiente ecuación, la cual tiene un coeficiente de determinación del 94,5% y es válida para un rango de temperatura, entre 20,19 y 22,85°C:

$$PBE = -18.539 + 1.729,79 \times \text{Temperatura} - 40,17 \times \text{Temperatura}^2$$

Cuando la temperatura es mayor de 22,85°C, el PBE es igual al 14% y cuando es menor de 20,19 °C, el PBE es del 8%.

Una vez ocurra la emergencia se tiene la disponibilidad de adultos hembras fértiles para que acontezca **el proceso de infestación**, dependiendo de la disponibilidad de frutos. El número de frutos disponibles, se obtiene con la simulación de la producción potencial del cultivo del café (Montoya et al., 2009), limitada por la disponibilidad de agua en el suelo.

En la construcción del modelo, además de las variables exógenas que se tuvieron en cuenta para la modelación del hospedante, el ambiente estuvo representado por la temperatura del aire y la humedad relativa, como factores que influyeron en la dinámica poblacional del insecto y el proceso de emergencia; el hospedante estuvo representado por el número de frutos de café, en cada edad, disponible para ser infestados; y la intervención del hombre, estuvo representado con la cosecha oportuna de los frutos maduros.

Tabla 1. Número de brocas emergidas por trampa y su error estándar (EE), para cada sitio, de acuerdo con la condición ENOS (El Niño - Oscilación del Sur).

SITIO	Condición ENOS	Número de brocas emergidas	
		Media	EE
El Rosario	Neutro	187,3 B	21,4
	La Niña	11,6 C	1,1
	El Niño	539,3 A	67,9
La Catalina	Neutro	493,3 A	29,2
	La Niña	229,7 B	16,2
	El Niño	569,2 A	32,3
Naranjal	Neutro	586,9 B	42,8
	La Niña	55,7 C	4,5
	El Niño	1077,2 A	107,7
Paraguacito	Neutro	192,1 B	10,1
	La Niña	155,8 B	12,4
	El Niño	461,1 A	28,2

Para cada sitio, letras no comunes, implica diferencia estadística entre promedio de la condición ENOS, de acuerdo con la prueba de Duncan al 5%.

Tabla 2. Promedio diario y error estándar (EE), para las variables de clima temperatura, humedad relativa, número de horas de brillo solar y precipitación, en cuatro sitios y de acuerdo con la condición ENOS (El Niño - Oscilación del Sur).

Sitio	Condición ENOS	Temperatura diaria (°C)		Humedad relativa diaria (%)		Número de horas de brillo solar diario		Precipitación (mm)	
		Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE
El Rosario	Neutro	20,3 B	0,04	73,8 B	0,29	5,3 B	0,08	8,1 B	0,34
	La Niña	19,5 C	0,08	84,7 A	0,39	4,9 C	0,18	10,5 A	0,97
	El Niño	20,7 A	0,05	70,9 C	0,40	6,0 A	0,12	5,1 C	0,36
La Catalina	Neutro	21,5 B	0,03	77,4 A	0,20	4,4 B	0,07	7,2 B	0,32
	La Niña	21,0 C	0,06	76,5 A	0,45	4,2 B	0,16	8,9 A	0,86
	El Niño	21,8 A	0,05	75,5 B	0,29	5,2 A	0,09	5,1 C	0,39
Naranjal	Neutro	21,2 B	0,03	75,2 A	0,26	4,4 B	0,07	8,8 AB	0,37
	La Niña	20,7 C	0,06	69,5 C	0,50	4,3 B	0,15	10,4 A	0,90
	El Niño	21,5 A	0,04	73,9 B	0,37	5,2 A	0,10	7,8 B	0,49
Paraguacito	Neutro	21,9 B	0,03	79,9 A	0,17	4,6 B	0,07	6,1 B	0,32
	La Niña	21,3 C	0,06	77,8 B	0,35	4,3 B	0,16	9,6 A	0,96
	El Niño	22,3 A	0,05	78,3 B	0,23	5,3 A	0,09	4,5 C	0,38

Para cada sitio y variable, letras no comunes, implica diferencia de promedios entre condición ENOS, de acuerdo con la prueba de Duncan al 5%.

Evaluación del modelo

La evaluación del modelo se hizo con el fin de determinar la lógica del mismo y lo que se quiere representar del mundo real con respecto al comportamiento de la infestación de la broca del café. A continuación, se ilustran los resultados de la evaluación con respecto a: la dinámica del insecto, efecto de la población inicial, efecto del ENOS, comportamiento de la infestación de acuerdo con el ENOS y en el efecto de la recolección oportuna.

Dinámica del insecto

En la Tabla 3 se ilustra el efecto de la probabilidad de sobrevivencia en cada uno de los estados de broca, sobre la generación de nuevos adultos, para una población inicial de 300 huevos. En esta tabla se aprecia, en el caso de lograr el control de la plaga que asegure una sobrevivencia de las larvas no mayor del 30%, entonces de una población inicial de huevos sólo se llegaría a obtener hasta un 4% de nuevos adultos. Este es uno de los aspectos positivos que tiene el utilizar el modelo de Bellows y Birley.

Población inicial

Para evaluar el efecto de la población inicial, se simuló el comportamiento de la infestación en un cultivo de variedad Colombia, de 5.000 plantas por hectárea, sembrado en enero de 1994, en varias localidades, tomando la producción proveniente de la tercera, quinta y séptima cosecha.

En ausencia de control y sin recolección oportuna, en cada una de las Figuras 3, 4 y 5, se ilustra, para el comportamiento de la infestación por broca, el efecto del porcentaje de frutos perforados por broca dejados en el árbol, en la cosecha inmediatamente anterior, para las condiciones ENOS de la Estación Naranjal, incrementando dicho porcentaje en 0,5%. Si el mismo incremento se hace tanto para frutos perforados en el árbol como en el suelo (Figura 6), los niveles de infestación del lote pasan del 6,0% al 12,7%, para condiciones ambientales poco favorables para que se dé el proceso de infestación, como el caso del año 1999, por efecto año La Niña.

Efecto ENOS

En la Figura 7, se observa el efecto de años con condición El Niño

(1997 y 1998) y año La Niña (1999), frente al comportamiento en un año de condiciones normales (Neutro) de la Estación Naranjal (1996). Por efectos de año La Niña, el inóculo inicial se redujo en un 0,5%, tanto para el porcentaje de frutos perforados por broca dejados en el árbol como para el porcentaje de frutos perforados dejados en el suelo y en promedio por fruto solo se tenía un adulto. Como se puede apreciar en los años El Niño, si no se hace ninguna práctica de manejo para el insecto, con las condiciones de inóculo inicial especificadas en la Figura 6A, llega hasta niveles de infestación del 34% en el lote, caso contrario en año La Niña, donde el máximo de infestación es del 6,3%.

Efecto de la recolección oportuna

El modelo de broca propuesto, tiene la opción de la recolección oportuna o recolección de todos los frutos maduros. En las Figuras 10, 11, 12 y 13, se aprecia como en presencia de El Niño, la práctica de la recolección oportuna de los frutos maduros, reduce los niveles de infestación (de acuerdo con

la simulación), en todas las Estaciones Experimentales, de tal manera que, en las localidades de El Rosario y La Trinidad, con la práctica de recolección de frutos maduros, se pueden mantener en el lote niveles de infestación menores del 3%; en el caso de Paraguaicito, niveles menores del 5% y en el caso de Naranjal, niveles menores del 9%.

Comportamiento de la infestación

En las Figuras 8 y 9, se ilustra el comportamiento de la infestación simulada en diferentes localidades, durante años El Niño y La Niña (1998 y 1999, respectivamente). Como se puede apreciar, en todas ellas el comportamiento, descriptivamente es diferente, siendo más acentuado el efecto del año El Niño en la localidad de Naranjal.

En las Tablas 4 a la 10, se describe el comportamiento de la infestación por broca, en términos del porcentaje de frutos perforados por broca, después de la floración, hasta la cosecha principal, incrementando el número de postura en un 30% y aumentando la duración de los estados en un 40%, situación que se obtendría al tener una línea de broca más longeva y con mayor porcentaje de reproducción.

Dejando después del repase de la cosecha principal (Tabla 4), cinco frutos perforados por broca en árbol y cinco en el suelo, asumiendo cuatro adultos por fruto perforado, para un ciclo de 28 días de la broca, al incrementar las posturas en un 30%, los niveles de infestación al momento de la siguiente cosecha pueden ser del 16,5%. Si no se incrementan las posturas, pero sí la longevidad y la duración de los estados en un 40%, los niveles de infestación pueden llegar sólo al 6,6% y si se incrementan las posturas y la duración de los estados, se llega a un nivel del 8,4%, en condiciones de clima de un año El Niño (Tabla 4). En condiciones de clima de un año Neutro, los niveles de infestación al momento de la cosecha podrían ser del 7,0%, 3,4%, y 4,4%, respectivamente (Tabla 7). En condiciones de clima de un año La Niña, los niveles de infestación al momento de la cosecha podrían ser 5,0%, 2,6% y 3,3%, respectivamente (Tabla 10).

Si no se dejasen frutos perforados por broca en el árbol después del repase de la cosecha principal, pero si se dejan cinco frutos brocados en el suelo y se asume cuatro adultos por fruto perforado, al incrementar las posturas

en un 30%, incrementar la duración de los estados en un 40% e incrementar tanto las posturas como la duración de los estados (longevidad), se tendría: en un año El Niño niveles de infestación del 6,4%, 3,3%, y 4,2%, respectivamente (Tabla 5); en un año Neutro niveles de infestación del 3,5%, 1,7% y 2,2%, respectivamente (Tabla 8); y en un año La Niña niveles de infestación del 2,5%, 1,3% y 1,6%, respectivamente (Tabla 11).

El efecto de no hacer el repase y no cosechar todos los frutos perforados por broca, al incrementar las posturas en un 30%, es el aumento de los niveles de infestación. Por ejemplo: en años El Niño, a los 275 días después de la floración, el incremento en la infestación es de un 10,6% (Tabla 6); en años Neutro en un 5,9% (Tabla 9); y en un año La Niña en un 4% (Tabla 12). Al aumentar la duración de los estados en un 40%, se disminuyen los niveles de infestación en un año El Niño en un 11% (Tabla 6); en un año Neutro en un 6,5% (Tabla 9); y en un año La Niña en un 4,3% (Tabla 12). Si se aumentan las posturas en un 30% y la duración de los estados en un 40%, los niveles de infestación sólo se reducen en un 4,8%, 3,2% y 1,9%, en años El Niño, Neutro y La Niña, respectivamente (Tablas 6, 9 y 12).

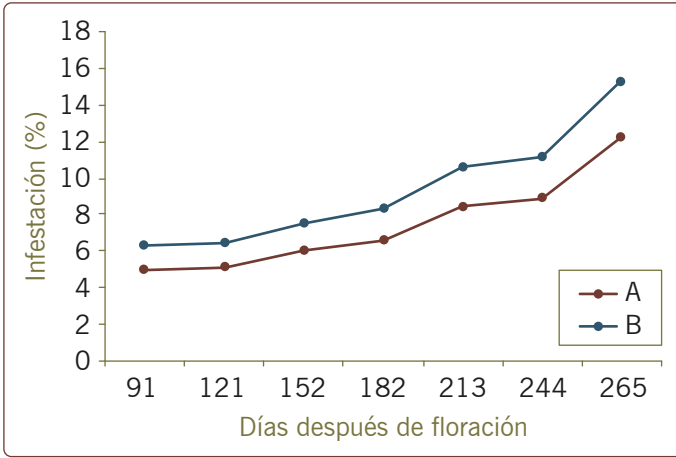


Figura 3. Comportamiento de la infestación, en la Estación Naranjal, año Neutro (1996), para las siguientes condiciones iniciales: porcentaje de frutos infestados por broca dejados en el árbol 1,0% opción A y 1,5% opción B; en ambas opciones, el 1,0% de frutos perforados en el suelo y cuatro adultos por fruto perforado.

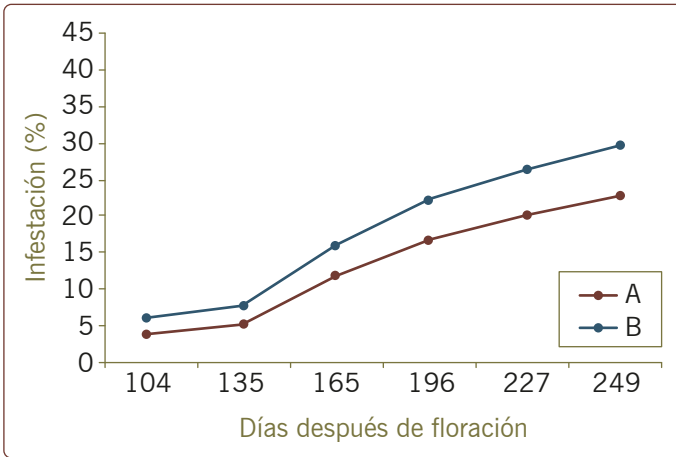


Figura 4. Comportamiento de la infestación, en la Estación Naranjal, año El Niño (1997), para las siguientes condiciones iniciales: porcentaje de frutos infestados por broca dejados en el árbol 1,0% opción A y 1,5% opción B; en ambas opciones, el 1,0% de frutos perforados en el suelo y cuatro adultos por fruto perforado.

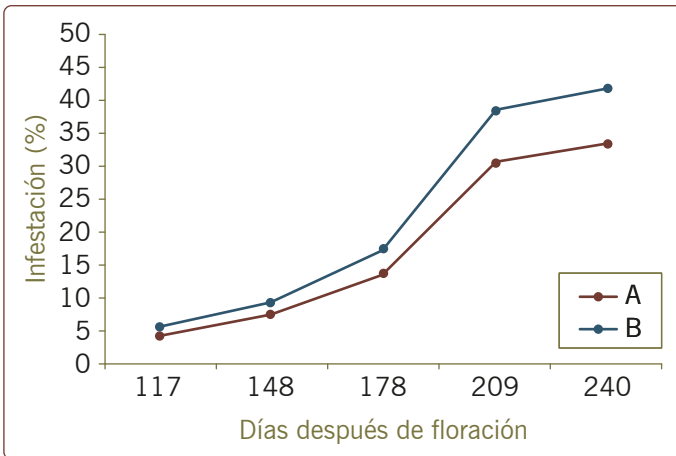


Figura 5. Comportamiento de la infestación, en la Estación Naranjal, año El Niño (1998), para las siguientes condiciones iniciales: porcentaje de frutos infestados por broca dejados en el árbol 1,0% opción A y 1,5% opción B; en ambas opciones, el 1,0% de frutos perforados en el suelo y cuatro adultos por fruto perforado.

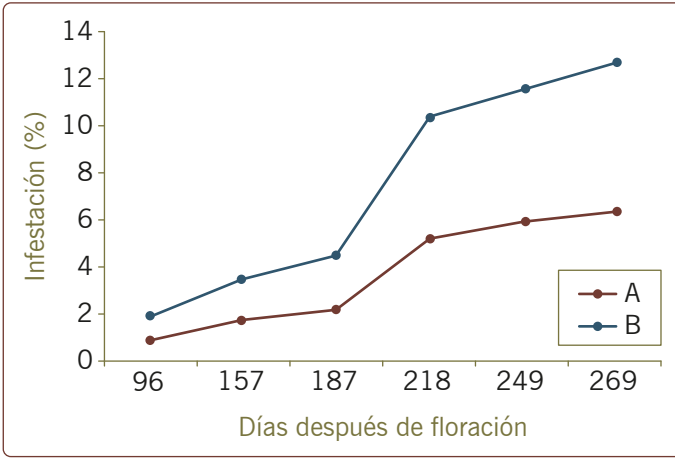


Figura 6. Comportamiento de la infestación, en la Estación Naranjal, año La Niña (1999), para las siguientes condiciones iniciales: para la opción A, 0,5% de frutos perforados dejados en el árbol, el 0,5% de frutos perforados dejados en el suelo; para la opción B, 1,0% de frutos perforados dejados en el árbol y el suelo; en ambas opciones, un adulto hembra por fruto perforado.

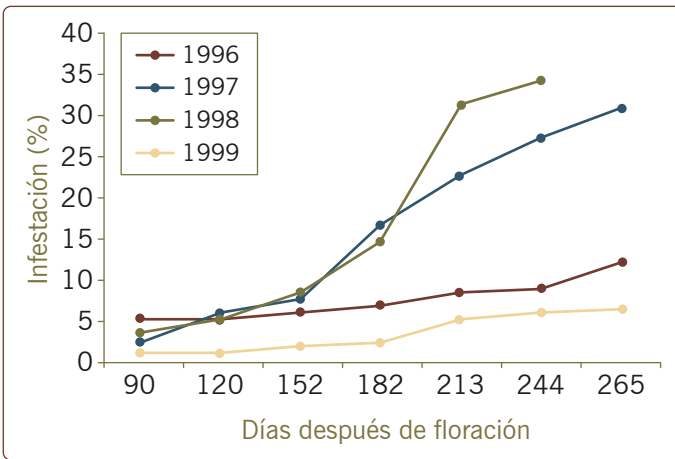


Figura 7. Comportamiento de la infestación, en la Estación Naranjal, en años El Niño (1997, 1998), año La Niña (1999) y en condiciones normales (1996).

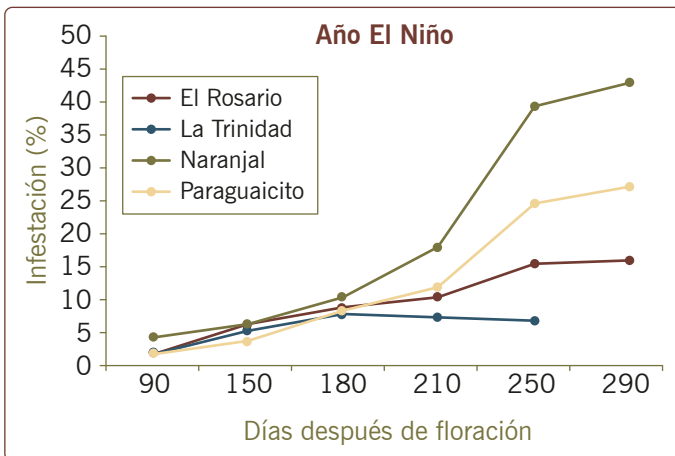


Figura 8. Comportamiento de la infestación en diferentes Estaciones y en condiciones de año El Niño (1998), con las mismas condiciones iniciales de frutos perforados dejados en el árbol y en el suelo (1,5% y 1,0% respectivamente) y cuatro adultos hembra de broca por fruto perforado.

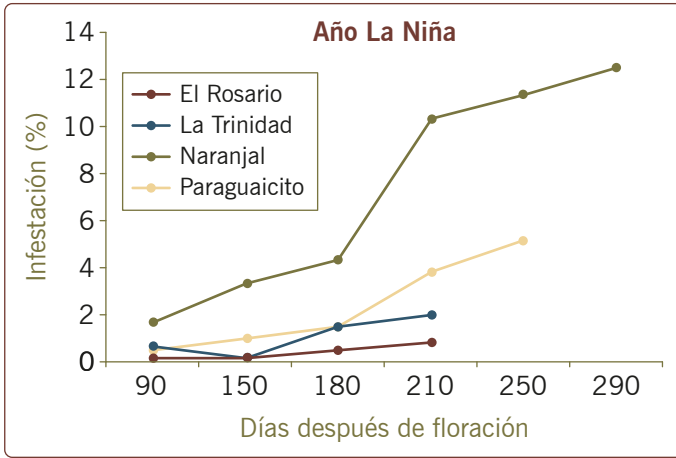


Figura 9. Comportamiento de la infestación en diferentes Estaciones y en condiciones de año La Niña (1999), con las mismas condiciones iniciales de frutos perforados dejados en el árbol y en el suelo (1,0%, en cada caso) y un adulto hembra de broca por fruto perforado.

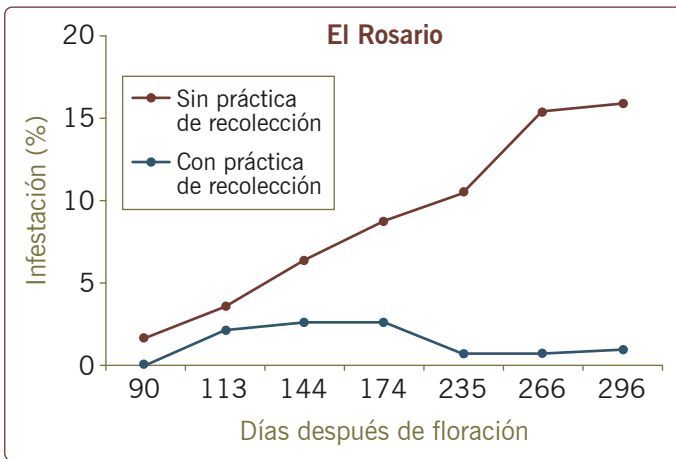


Figura 10. Efecto de la práctica 'recolección oportuna de frutos maduros de café', en el comportamiento de la infestación, en la Estación El Rosario, 1998 (año El Niño), para una condición inicial de 1,5% y 1,9% de frutos perforados dejados en el árbol y en el suelo, respectivamente, en la cosecha inmediatamente anterior y cuatro adultos hembra de broca por fruto perforado.

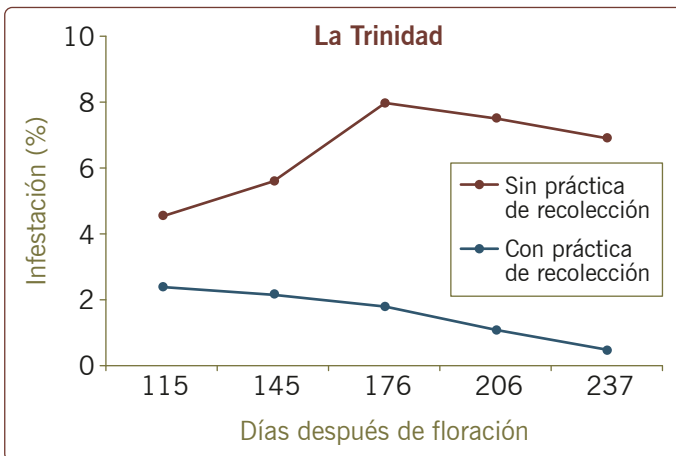


Figura 11. Efecto de la práctica 'recolección oportuna de frutos maduros de café', en el comportamiento de la infestación, en la Estación La Trinidad, 1998 (año El Niño), para una condición inicial de 1,5% y 1,0% de frutos perforados dejados en el árbol y en el suelo, respectivamente, en la cosecha inmediatamente anterior y cuatro adultos hembra de broca por fruto perforado.

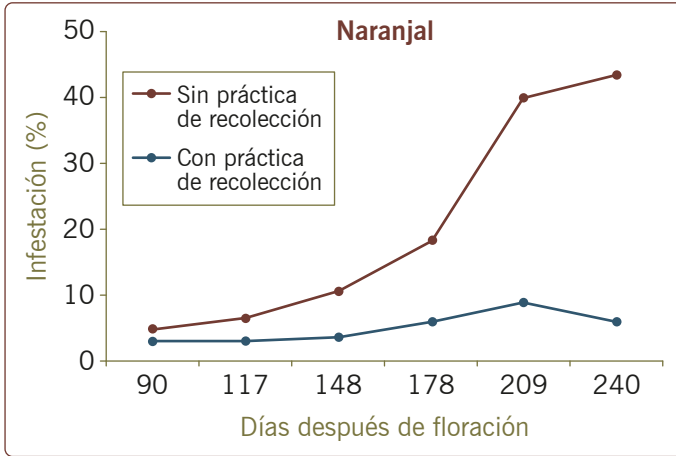


Figura 12. Efecto de la práctica 'recolección oportuna de frutos maduros de café', en el comportamiento de la infestación, en la Estación Naranjal, 1998 (año El Niño), para una condición inicial de 1,5% y 1,9% de frutos perforados dejados en el árbol y en el suelo, respectivamente, en la cosecha inmediatamente anterior y cuatro adultos hembra de broca por fruto perforado.

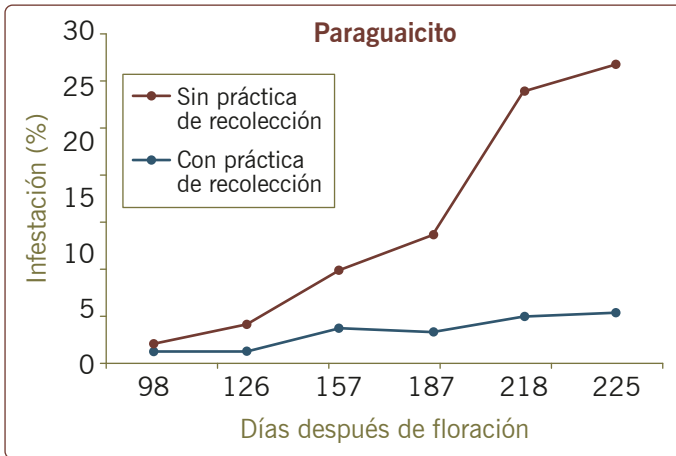


Figura 13. Efecto de la práctica 'recolección oportuna de frutos maduros de café', en el comportamiento de la infestación, en la Estación Paraguaicito, 1998 (año El Niño), para una condición inicial de 1,5% y 1,9% de frutos perforados dejados en el árbol y en el suelo, respectivamente, en la cosecha inmediatamente anterior y cuatro adultos hembra de broca por fruto perforado.



Tabla 3. Número de adultos nuevos, dependiendo de la probabilidad de supervivencia de los diferentes estados, a partir de una población inicial de 300 huevos.

Probabilidad de supervivencia (en forma decimal)				Número adultos	($\%$)
Huevos	Larvas	Pupas	Adultos		
0,4	0,3	0,5	0,7	5	1,7
0,6	0,3	0,5	0,7	7	2,3
0,8	0,3	0,5	0,7	9	3,0
1,0	0,3	0,5	0,7	12	4,0
1,0	0,4	0,5	0,7	16	5,3
1,0	0,6	0,5	0,7	24	8,0
1,0	0,8	0,5	0,7	35	11,0
1,0	1,0	0,5	0,7	46	15,3
1,0	1,0	0,4	0,7	36	12,0
1,0	1,0	0,6	0,7	56	18,7
1,0	1,0	0,8	0,7	78	26,0
1,0	1,0	1,0	0,7	99	33,0
1,0	1,0	1,0	0,4	64	21,3
1,0	1,0	1,0	0,6	87	29,0
1,0	1,0	1,0	0	120	40,0

Tabla 4. Niveles de infestación, después de la floración hasta la recolección, de acuerdo con las posturas y la duración de los estados de broca, dejando después del repase de la recolección principal anterior cinco frutos perforados en el árbol y cinco frutos perforados en el suelo, con un promedio de cuatro brocas por fruto. **Año El Niño.**

DDF	Ciclo de la broca: 28 días		Ciclo de la broca: 39 días	
	NHPD=1,0	NHPD=1,3	NHPD=1,0 $\phi = \phi \times 1,4$	NHPD=1,3 $\phi = \phi \times 1,4$
35	2,5	2,5	2,5	2,5
65	2,5	2,5	2,5	2,5
95	2,9	3,1	2,8	2,9
125	3,8	4,3	3,4	3,7
155	5,2	6,2	4,3	4,9
185	6,6	8,1	5,2	6,1
215	9,6	12,1	6,9	8,6
245	10,7	13,8	7,4	9,4
275	12,6	16,5	6,6	8,4

DDF: días después de la floración; NHPD: número medio de posturas (huevos), por día; ϕ : incremento de la duración de los estados de broca.

Tabla 5. Niveles de infestación, después de la floración hasta la recolección, de acuerdo con las posturas y la duración de los estados de broca, dejando después del repase de la recolección principal anterior cinco frutos perforados en el suelo, con un promedio de cuatro brocas por fruto. **Año El Niño.**

DDF	Ciclo de la broca: 28 días		Ciclo de la broca: 39 días	
	NHPD=1,0	NHPD=1,3	NHPD=1,0 $\varphi = \varphi \times 1,4$	NHPD=1,3 $\varphi = \varphi \times 1,4$
35	1,0	1,0	1,0	1,0
65	1,0	1,0	1,0	1,0
95	1,1	1,2	1,1	1,1
125	1,5	1,7	1,3	1,4
155	2,0	2,4	1,7	1,9
185	2,6	3,1	2,0	2,4
215	3,7	4,6	2,7	3,3
245	4,2	5,4	2,9	3,6
275	4,8	6,4	3,3	4,2

DDF: días después de la floración; NHPD: número medio de posturas (huevos), por día; φ : incremento de la duración de los estados de broca.

Tabla 6. Niveles de infestación, después de la floración hasta la recolección, de acuerdo con las posturas y la duración de los estados de broca, dejando después de la recolección principal anterior 15 frutos perforados en el árbol y 20 frutos perforados en el suelo, con un promedio de cuatro brocas por fruto. **Año El Niño.**

DDF	Ciclo de la broca: 28 días		Ciclo de la broca: 39 días	
	NHPD=1,0	NHPD=1,3	NHPD=1,0 $\varphi = \varphi \times 1,4$	NHPD=1,3 $\varphi = \varphi \times 1,4$
35	6,9	6,9	6,8	6,8
65	6,8	6,9	6,8	6,9
95	7,9	8,4	7,6	8,0
125	10,3	11,6	9,2	10,1
155	14,2	16,7	11,7	13,5
185	18,0	21,9	13,9	16,6
215	25,9	32,8	18,9	23,2
245	29,1	37,6	20,2	25,4
275	34,2	44,8	23,1	29,4

DDF: días después de la floración; NHPD: número medio de posturas (huevos), por día; φ : incremento de la duración de los estados de broca.

Tabla 7. Niveles de infestación, después de la floración hasta la recolección, de acuerdo con las posturas y la duración de los estados de broca, dejando después del repase de la recolección principal anterior cinco frutos perforados en el árbol y cinco frutos perforados en el suelo, con un promedio de cuatro brocas por fruto. **Año Neutro.**

DDF	Ciclo de la broca: 28 días		Ciclo de la broca: 39 días	
	NHPD=1,0	NHPD=1,3	NHPD=1,0 $\varphi = \varphi \times 1,4$	NHPD=1,3 $\varphi = \varphi \times 1,4$
35	0,6	0,6	0,6	0,6
65	0,7	0,7	0,7	0,7
95	0,8	0,8	0,8	0,8
125	1,0	1,1	0,9	0,9
155	1,3	1,5	1,1	1,2
185	2,2	2,7	1,6	1,9
215	3,2	4,1	2,2	2,7
245	4,3	5,6	2,9	3,6
275	5,3	7,0	3,4	4,4

DDF: días después de la floración; NHPD: número medio de posturas (huevos), por día; φ : incremento de la duración de los estados de broca.

Tabla 8. Niveles de infestación, después de la floración hasta la recolección, de acuerdo con las posturas y la duración de los estados de broca, dejando después del repase de la recolección principal anterior cinco frutos perforados en el suelo, con un promedio de cuatro brocas por fruto. **Año Neutro.**

DDF	Ciclo de la broca: 28 días		Ciclo de la broca: 39 días	
	NHPD=1,0	NHPD=1,3	NHPD=1,0 $\varphi = \varphi \times 1,4$	NHPD=1,3 $\varphi = \varphi \times 1,4$
35	0,3	0,3	0,3	0,3
65	0,3	0,3	0,3	0,3
95	0,4	0,4	0,4	0,4
125	0,5	0,5	0,4	0,5
155	0,7	0,8	0,5	0,6
185	1,1	1,4	0,8	1,0
215	1,6	2,0	1,1	1,4
245	2,1	2,8	1,4	1,8
275	2,7	3,5	1,7	2,2

DDF: días después de la floración; NHPD: número medio de posturas (huevos), por día; φ : incremento de la duración de los estados de broca.

Tabla 9. Niveles de infestación, después de la floración hasta la recolección, de acuerdo con las posturas y la duración de los estados de broca, dejando después de la recolección principal anterior 15 frutos perforados en el árbol y 20 frutos perforados en el suelo, con un promedio de cuatro brocas por fruto. **Año Neutro.**

DDF	Ciclo de la broca: 28 días		Ciclo de la broca: 39 días	
	NHPD=1,0	NHPD=1,3	NHPD=1,0 $\varphi = \varphi \times 1,4$	NHPD=1,3 $\varphi = \varphi \times 1,4$
35	2,3	2,3	2,3	2,3
65	2,4	2,4	2,4	2,4
95	2,7	2,8	2,6	2,7
125	3,1	3,7	3,0	3,2
155	4,6	5,4	3,8	4,2
185	7,7	9,5	5,7	6,8
215	11,1	14,2	7,7	9,6
245	15,0	19,6	10,0	12,7
275	18,6	24,5	12,1	15,4

DDF: días después de la floración; NHPD: número medio de posturas (huevos), por día; φ : incremento de la duración de los estados de broca.

Tabla 10. Niveles de infestación, después de la floración hasta la recolección, de acuerdo con las posturas y la duración de los estados de broca, dejando después del repase de la recolección principal anterior cinco frutos perforados en el árbol y cinco frutos perforados en el suelo, con un promedio de cuatro brocas por fruto. **Año La Niña.**

DDF	Ciclo de la broca: 28 días		Ciclo de la broca: 39 días	
	NHPD=1,0	NHPD=1,3	NHPD=1,0 $\varphi = \varphi \times 1,4$	NHPD=1,3 $\varphi = \varphi \times 1,4$
35	0,5	0,5	0,5	0,5
65	0,5	0,5	0,5	0,5
95	0,7	0,7	0,6	0,7
125	0,8	0,9	0,7	0,8
155	1,3	1,5	1,0	1,2
185	1,7	2,1	1,3	1,5
215	2,6	3,3	1,8	2,3
245	3,4	4,4	2,3	2,9
275	3,8	5,0	2,6	3,3

DDF: días después de la floración; NHPD: número medio de posturas (huevos), por día; φ : incremento de la duración de los estados de broca.

Tabla 11. Niveles de infestación, después de la floración hasta la recolección, de acuerdo con las posturas y la duración de los estados de broca, dejando después del repase de la recolección principal anterior cinco frutos perforados en el suelo, con un promedio de cuatro brocas por fruto. **Año La Niña.**

DDF	Ciclo de la broca: 28 días		Ciclo de la broca: 39 días	
	NHPD=1,0	NHPD=1,3	NHPD=1,0 $\phi = \phi \times 1,4$	NHPD=1,3 $\phi = \phi \times 1,4$
35	0,3	0,3	0,3	0,3
65	0,3	0,3	0,3	0,3
95	0,3	0,3	0,3	0,3
125	0,4	0,4	0,4	0,4
155	0,6	0,8	0,5	0,6
185	0,9	1,1	0,6	0,8
215	1,3	1,6	0,9	1,1
245	1,7	2,2	1,2	1,5
275	1,9	2,5	1,3	1,6

DDF: días después de la floración; NHPD: número medio de posturas (huevos), por día; ϕ : incremento de la duración de los estados de broca.

Tabla 12. Niveles de infestación, después de la floración hasta la recolección, de acuerdo con las posturas y la duración de los estados de broca, dejando después de la recolección principal anterior 15 frutos perforados en el árbol y 20 frutos perforados en el suelo, con un promedio de cuatro brocas por fruto. **Año La Niña.**

DDF	Ciclo de la broca: 28 días		Ciclo de la broca: 39 días	
	NHPD=1,0	NHPD=1,3	NHPD=1,0 $\phi = \phi \times 1,4$	NHPD=1,3 $\phi = \phi \times 1,4$
35	1,9	1,9	1,9	1,9
65	1,9	1,9	1,9	1,9
95	2,3	2,4	2,2	2,3
125	2,8	3,1	2,5	2,7
155	4,4	5,3	3,6	4,1
185	6,0	7,3	4,5	5,4
215	9,0	11,4	6,4	7,9
245	11,8	15,3	8,1	10,2
275	13,3	17,3	9,0	11,4

DDF: días después de la floración; NHPD: número medio de posturas (huevos), por día; ϕ : incremento de la duración de los estados de broca.

La evaluación del modelo, mostró la lógica en el comportamiento de la infestación, de acuerdo con la recolección (repase o no), el número de frutos perforados dejados en el árbol, el número de adultos de broca en el fruto, la longevidad de la broca, el incremento de las posturas y el efecto de las variables de clima.

Validación del modelo

La validación consistió en tomar los siguientes registros de infestación en el campo (información observada), durante los años 2010 y 2011, para compararlos con los valores simulados:

- En cada una de seis Estaciones Experimentales de Cenicafé, se seleccionaron mínimo dos lotes de una hectárea cada uno, sembrado con variedad Colombia o Castillo®.
- En cada lote, tres meses después de la floración, se estimó el número medio de frutos perforados en el árbol y en el suelo, el número de adultos en los frutos perforados en el suelo y en el árbol (datos de entrada del modelo). Con la selección aleatoria de 150 árboles y en cada árbol seleccionado, tanto en la parte aérea (en seis ramas), como en el suelo, se registró el número de frutos y el número de ellos perforados por la broca del café; de cada árbol, se retiraron cinco frutos perforados del árbol y el suelo para identificar el número de hembras adultas.
- Se llevó el registro diario de la temperatura, humedad relativa, brillo solar y la precipitación (datos de entrada del modelo).
- Se identificó, la latitud, altitud, fecha de siembra y si se hizo o no recolección oportuna (datos de entrada del modelo).
- De allí en adelante, cada mes, hasta la recolección principal de ambos semestres, con 150 árboles seleccionados aleatoriamente, y en cada árbol, máximo seis ramas con frutos, se estimó la infestación media por árbol (valor observado).

- Con la información de entrada identificada en los párrafos anteriores, se corrió el modelo para obtener la infestación media por árbol (valor simulado).

En la Tabla 13, se ilustra, tanto las estimaciones de infestación obtenidas con los datos observados, como los valores simulados durante el 2010 y en las Figuras 14 a la 29, la información obtenida en el 2011. La proporción de datos simulados que están entre los límites de los datos estimados (observados), para el 2010 fue de 55,6%; para el año 2011 fue de 61,1% y en general (2010 y 2011), fue del 59,1%.

Con la información de infestación del año 2010, la probabilidad de tener errores absolutos relativos, entre datos observados y simulados de infestación, menores del 30% es del 81,5%; mientras que, con la información de infestación del año 2011, dicha probabilidad es del 71% y con la información general (uniendo la información de los dos años), la probabilidad es del 74,3%.

Al establecer la relación lineal entre los valores observados y simulados, se obtuvo:

1) Para el año 2010, un coeficiente de regresión (0,87) diferente de cero y menor que 1,0, estadísticamente, según prueba t, al 5% y un coeficiente de determinación del 93%.

2) Para año 2011, un coeficiente de regresión (1,01) diferente de cero e igual a 1,0, estadísticamente, según prueba t, al 5% y un coeficiente de determinación del 96,5%.

3) En general (años 2010 y 2011), un coeficiente de regresión (0,93) diferente de cero y menor que 1,0, estadísticamente, según prueba t, al 5% y un coeficiente de determinación del 94,6%.

4) Estos resultados indican que unas veces el modelo ni sobrestima ni subestima los valores observados, como el caso del 2011, y en otros sobrestima el valor observado.

5) El modelo hace una descripción precisa para niveles menores del 2% de infestación.

En general, el proceso de validación indicó que el modelo hace una descripción del comportamiento de la infestación por broca, con una probabilidad mínima del 71% para un error relativo menor del 30%, y no siempre sobrestima la infestación observada. Con estas características del modelo, de acuerdo con lo establecido por los expertos, se dispone de una herramienta confiable para definir estrategias de manejo de la broca del café.



Tabla 13. Infestación observada y simulada, en varios lotes de diferentes sitios, 2010.

Sitio	Lote	Densidad	Mes	Infestación observada			Infestación simulada
				Estimación	Límite inferior	Límite superior	
Naranjal (Chinchiná, Caldas)	1	10.000	1	7,1	5,4	8,8	7,2
			2	6,8	5,3	8,4	6,9
			3	6,8	4,9	8,6	6,5
			4	5,2	4,5	6,0	5,1
			5	3,2	2,5	3,9	4,3
			6	3,3	2,9	3,8	2,4
			7	2,4	2,1	2,7	1,9
	2	4.444	1	11,1	8,3	13,9	11,1
			2	12,1	10,0	14,2	10,2
			3	8,1	6,9	9,4	8,2
			4	5,4	4,7	6,1	6,1
			5	5,2	4,6	5,8	4,7
			6	5,5	4,9	6,1	3,4
			7	2,9	2,7	3,2	3,0
	3	5.000	1	18,2	15,9	20,5	18,1
			2	16,5	14,3	18,6	16,4
			3	7,5	6,5	8,4	7,3
			4	6,2	5,4	6,9	5,4
			5	4,4	4,0	4,8	4,4
			6	4,2	3,5	4,8	2,1
			7	3,1	2,8	3,3	1,8
	4	4.444	1	25,4	22,1	28,6	25,2
			2	23,1	20,2	25,9	27,7
			3	8,2	7,2	9,1	8,3
			4	5,5	5,0	6,0	5,2
			5	3,6	3,2	4,1	3,5
			6	2,6	2,3	2,9	3,2
			7	3,0	2,7	3,2	2,6

Continúa...

...continuación

Sitio	Lote	Densidad	Mes	Infestación observada			Infestación simulada
				Estimación	Límite inferior	Límite superior	
La Bella (Calarcá, Quindío)	1	10.000	1	7,0	6,6	7,4	7,0
			2	8,0	7,4	8,5	16,4
			3	9,9	9,3	10,5	10,1
			4	6,4	5,8	7,0	6,6
	2	10.000	1	14,8	12,8	16,8	15,0
			2	19,0	17,1	20,9	31,4
			3	26,7	24,3	29,1	25,4
			4	12,0	11,0	13,0	21,7
			5	16,8	14,6	18,9	16,8
			6	17,5	15,5	19,5	17,2
			7	21,2	19,4	23,0	22,5
			8	6,0	5,5	6,4	17,3
			9	18,2	15,9	20,6	17,9
			10	13,0	11,4	14,7	14,2
	5	10.000	1	5,6	4,8	6,4	6,3
			2	9,0	7,9	10,2	10,2
			3	9,3	8,3	10,4	7,1
			4	6,4	5,8	7,1	5,0
			5	3,4	3,1	3,6	4,3
			6	3,3	2,8	3,7	3,3
			7	3,9	3,6	4,2	3,7
			8	3,0	2,4	3,7	4,3
			9	4,3	4,0	4,7	3,0
			10	2,3	2,1	2,5	1,9
			11	1,9	1,8	2,1	1,1

Datos simulados y observados de infestación por broca, año 2011
Estación Naranjal

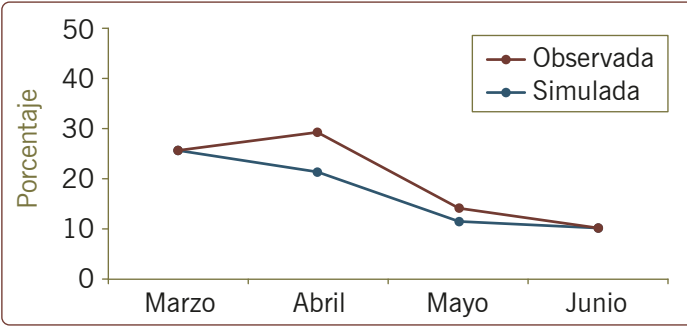


Figura 14. Lote Castillo® 3, densidad 10.000 plantas.

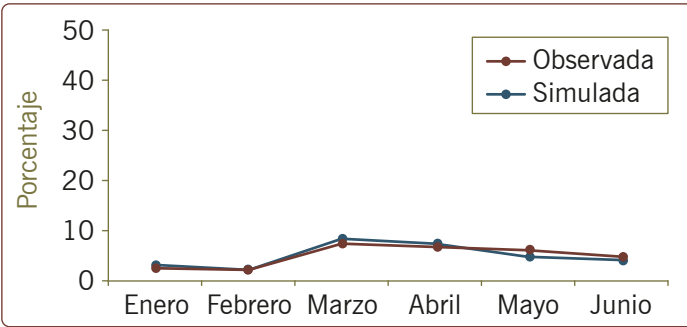


Figura 15. Lote Paraguaicito 2007, densidad 4.444 plantas.

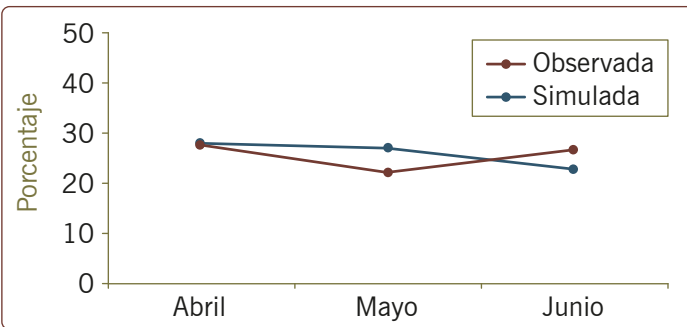


Figura 16. Lote Parcela 2-3, densidad 5.000 plantas.

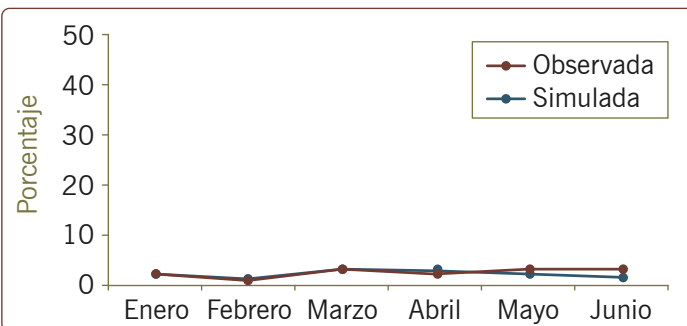


Figura 17. Lote Tambo 2007, densidad 4.444 plantas.

Datos simulados y observados de infestación por broca, año 2011
Estación Paraguaicito

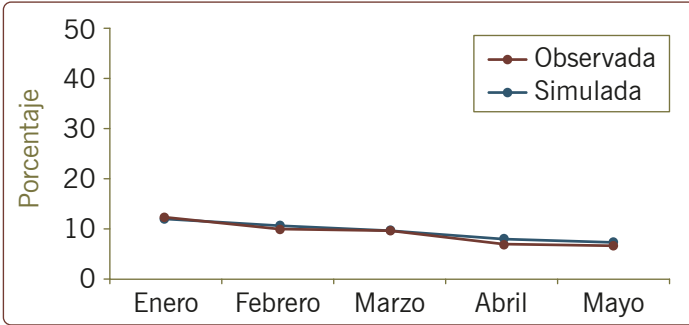


Figura 18. Lote 2, densidad 10.000 plantas.

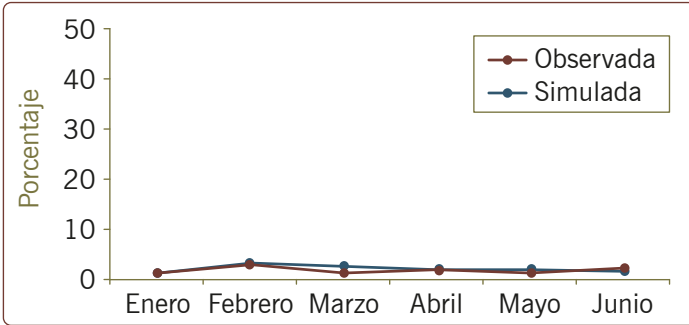


Figura 19. Lote 3A, densidad 10.000 plantas.

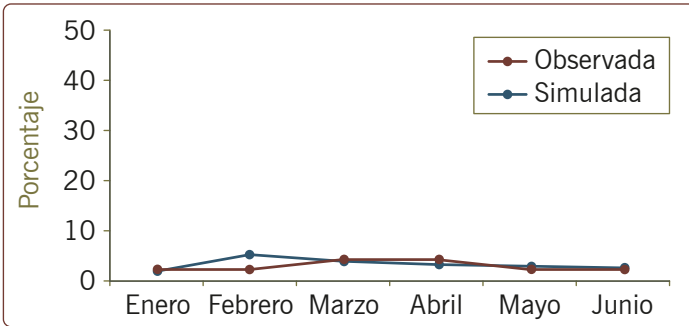


Figura 20. Lote 3B, densidad 10.000 plantas.

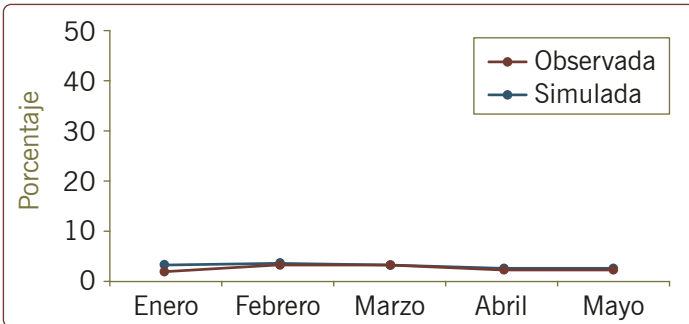


Figura 21. Lote 5, densidad 10.000 plantas.

Datos simulados y observados de infestación por broca, año 2011
Estación La Catalina

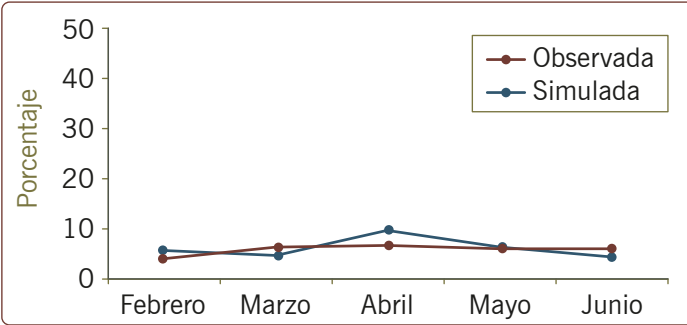


Figura 22. Lote Calvario 1, densidad 5.000 plantas.

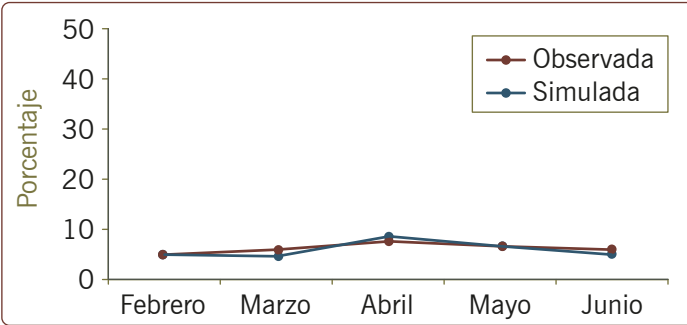


Figura 23. Lote Calvario 2, densidad 5.000 plantas.

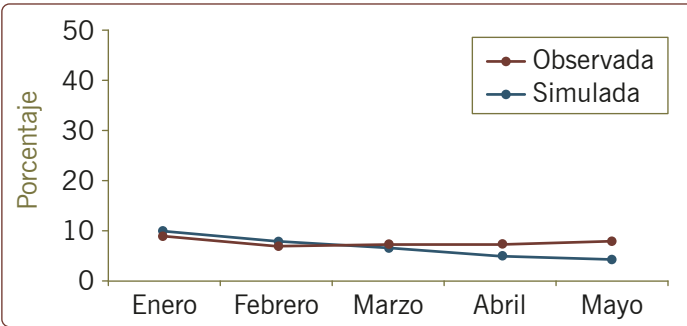


Figura 24. Lote Espejo, densidad 5.000 plantas.

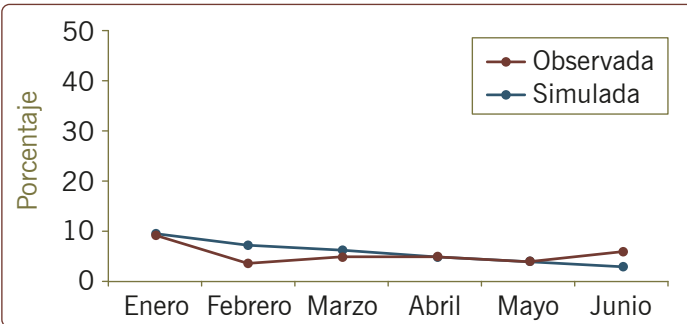


Figura 25. Lote La María, densidad 5.000 plantas.

Datos simulados y observados de infestación por broca, año 2011
Estación La Trinidad

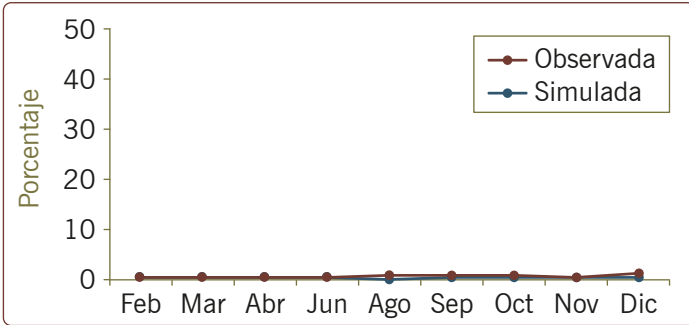


Figura 26. Lote Castillo® regional, densidad 10.000 plantas.

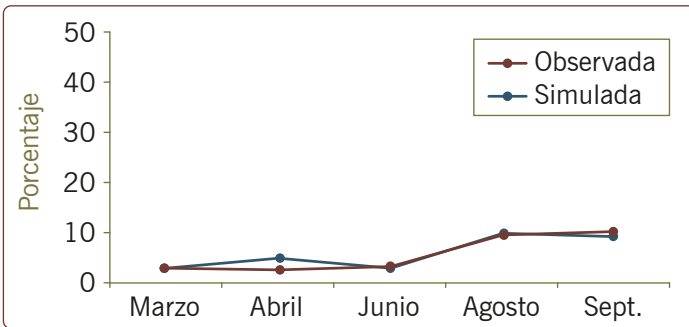


Figura 27. Lote R8 Zoca, densidad 10.000 plantas.

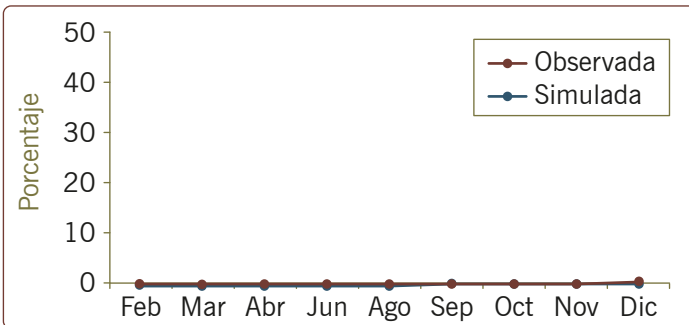


Figura 28. Lote Sue 0537, densidad 10.000 plantas.

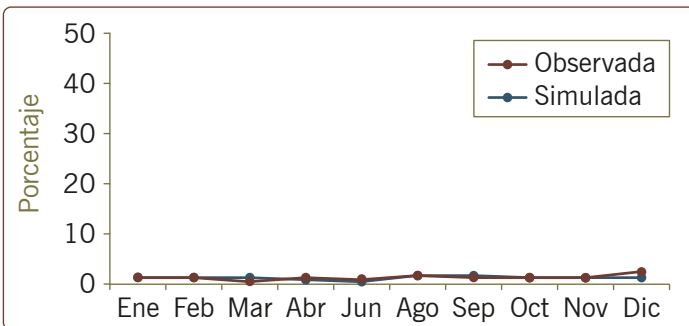


Figura 29. Lote Sue 0540, densidad 10.000 plantas.

Aplicación del modelo

Una vez validado el modelo de simulación para el comportamiento de la infestación de la broca del café y teniendo los escenarios de clima requeridos para correr el programa, se generaron los mapas de riesgo para los departamentos de Antioquia y Caldas. Un mapa de riesgo es una herramienta que puede ser utilizada como alerta temprana, dado que ilustra, con diez meses de anticipación, el nivel de infestación por broca al momento de la cosecha si no se toman las medidas de manejo oportuno, según el escenario del ENOS que se tenga pronosticado. Mientras que un mapa de vulnerabilidad, en cualquiera de los eventos ENOS, son únicos, el mapa de riesgo cambia cada año, dado que además de la temperatura media diaria, intervienen las siguientes variables a nivel diario: la humedad relativa, la precipitación, el número de horas de brillo solar y las relacionadas con el cultivo, como la edad y la densidad (Cenicafé, 2020).

El procedimiento en la construcción de mapas de riesgo para un departamento, fue el siguiente:

1) Mediante técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), utilizando el software ArcGIS en su versión 10.3.1, a partir de los Ecotopos Cafeteros y de la información actualizada del Sistema de Información Cafetera (SIC@, 2019), se generó la máscara para el departamento con el número de píxeles correspondientes. Cada píxel representa un área de 1 km², incluyendo como mínimo un predio cafetero. En cada píxel, se obtuvo a nivel diario (por un año), la siguiente información de clima: temperatura, humedad relativa, precipitación y número de horas de brillo solar, para cada escenario de El Niño Oscilación Sur (ENOS), tomando como referencia los años 1990, como escenario Neutro; entre mayo de 1997 y abril de 1998, como escenario El Niño; el año 1999 como escenario La Niña.

2) Con la información de temperatura, se obtuvieron por año las unidades térmicas acumuladas (UTA), para cada ENOS y cada píxel. Teniendo como referencia el Neutro, se agruparon los píxeles de acuerdo con la distribución percentilica de UTA, de cinco en cinco, obteniendo así veinte grupos.

3) Para cada grupo se verificó la diferencia de UTA y humedad relativa entre ENOS (El Niño, La Niña y Neutro), con la prueba de Duncan al 5%.

4) Se verificó que en al menos 15 de los 20 grupos, difirieran en la temperatura y humedad relativa, con la prueba de Duncan al 5%. Además, se estimó el promedio de la latitud por grupo píxel y en general.

5) Con la información del diagnóstico de broca del mes de enero, del año para el cual se elaboró el mapa de riesgo, se obtuvo el percentil 90 y/o 95 para las variables número de frutos perforados por broca en el árbol y en el suelo, y el promedio de la edad y de la densidad por lote evaluado.

6) Con el promedio de edad por lote se construyó el escenario de clima, desde la fecha de siembra hasta el año en el cual se hizo la simulación del comportamiento de la infestación. Dichos escenarios se elaboraron de acuerdo con el registro en los años anteriores de lo demarcado mensualmente por el ONI y en el año a simular la infestación, por el pronóstico que se tenga del mismo.

7) Para cada grupo, se simuló el comportamiento de la infestación por broca, de acuerdo con la estructura del nivel de producción (producción-broca), teniendo como entrada al modelo la siguiente información: fecha de siembra, latitud, densidad, variedad, número de frutos perforados por broca en el árbol y en el suelo (del mes de enero), y a nivel diario, desde la siembra hasta el año en el cual se simuló la infestación: temperatura, número de horas de brillo solar, humedad relativa y precipitación.

8) Con la infestación simulada en el mes de la cosecha principal, para cada grupo, se elaboró el mapa de riesgo.

Para los departamentos de Antioquia y Caldas, se construyeron los mapas de riesgo, en los años 2015, 2016 y 2020 y se tomó en el mes de julio, la infestación media simulada por grupo-lote, con el objetivo de ver el cambio en la dinámica de la infestación al mes de la recolección y evaluar el modelo con respecto a la infestación promedio obtenida en el diagnóstico del mes de julio del año para el cual se construyó el mapa de riesgo.

En el departamento de Caldas, en todos y cada uno de los grupos, se diferenciaron los ENOS (El Niño, La Niña y Neutro) en el promedio de UTA y humedad relativa, de acuerdo con la prueba de Duncan al 5%; y en el departamento de Antioquia igual resultado exceptuando el primer grupo (percentil 5), donde La Niña y el Neutro fueron iguales en UTA y Neutro y El Niño iguales en humedad relativa. En ambos departamentos se verificó que en al menos 15 de los 20 grupos fueran diferentes en el promedio de UTA y humedad relativa, según prueba de Duncan al 5%.

En las Tablas 14 y 15 se ilustran aspectos relacionados con la simulación de la infestación para los departamentos de Caldas y Antioquia. El resultado de la simulación, en cada uno de los años, para cada departamento, mostró que el valor promedio simulado de infestación por grupo-lote, es

igual estadísticamente a la infestación estimada, de acuerdo con los registros del diagnóstico de broca en el mismo mes.

Teniendo en cuenta que en los años 2015 - 2016, se presentó el evento El Niño más fuerte en los últimos 100 años, se observa para cada departamento una dinámica diferente, dado por el cambio del porcentaje de pixeles en cada nivel de infestación, entre el mes de julio y el mes de la cosecha principal (Tablas 16 y 17). También se observa el cambio del comportamiento de la infestación entre los años 2015, 2016 y 2020 dentro del mismo departamento (Figuras 30 a la 35); para el año 2020, los tres primeros meses fueron El Niño y desde abril hasta agosto Neutro.

Finalmente, los mapas de riesgo son una herramienta que indica el nivel de infestación dentro de los departamentos como entre ellos, 10 meses antes de la recolección principal, obteniéndose así, una alerta temprana.

Tabla 14. Aspectos relacionados con la simulación del comportamiento de la infestación - Antioquia (Cenicafé, 2020).

Tema	Año		
	2015	2016	2020
Número de árboles por hectárea (densidad)	5.629	5.360	5.340
Edad (años)	4,1	4,5	5,3
Frutos brocados árbol	5	9	3
Frutos brocados suelo	2	1	2
Número de píxeles	10.792	10.792	10.792
Infestación diagnóstico			
Límite inferior	2,33	3,05	2,03
Límite superior	2,88	4,22	2,99
Promedio	2,61	3,63	2,51
Infestación simulada	2,55	3,80	2,30

Tabla 15. Aspectos relacionados con la simulación del comportamiento de la infestación - Caldas (Cenicafé, 2020).

Tema	Año		
	2015	2016	2020
Número de árboles por hectárea (densidad)	5.539	5.429	5.272
Edad (años)	4,0	4,4	4,8
Frutos brocados árbol	5	8	5
Frutos brocados suelo	2	1	1
Número de píxeles	2.932	2.932	2.932
Infestación diagnóstico			
Límite inferior	2,55	3,77	1,85
Límite superior	3,34	4,77	3,17
Promedio	2,94	4,27	2,51
Infestación simulada	2,99	4,08	2,89

Tabla 16. Proporción de pixeles para cada nivel de infestación por broca simulada - Antioquia (Cenicafé, 2020).

Nivel de infestación (%)	Año 2015		Año 2016		Año 2020	
	Julio	Octubre	Julio	Octubre	Agosto	Octubre
<= 2	40	-	30	15	45	35
> 2 y <= 5	60	35	35	25	55	20
> 5 y <= 10	-	25	35	25	-	45
> 10	-	40	-	35	-	-

Tabla 17. Proporción de pixeles para cada nivel de infestación por broca simulada - Caldas (Cenicafé, 2020).

Nivel de infestación (%)	Año 2015		Año 2016		Año 2020	
	Julio	Octubre	Julio	Octubre	Agosto	Octubre
<= 2	30	-	20	-	30	20
> 2 y <= 5	60	25	45	25	70	20
> 5 y <= 10	10	30	35	15	-	60
> 10	-	45	-	60	-	-

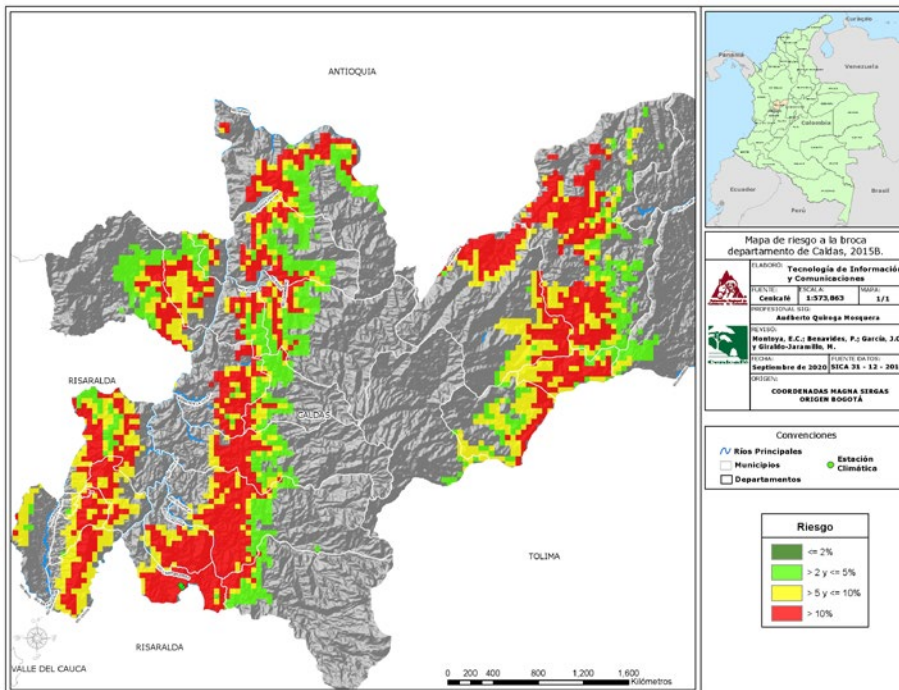


Figura 30. Mapa de riesgo Caldas año 2015.

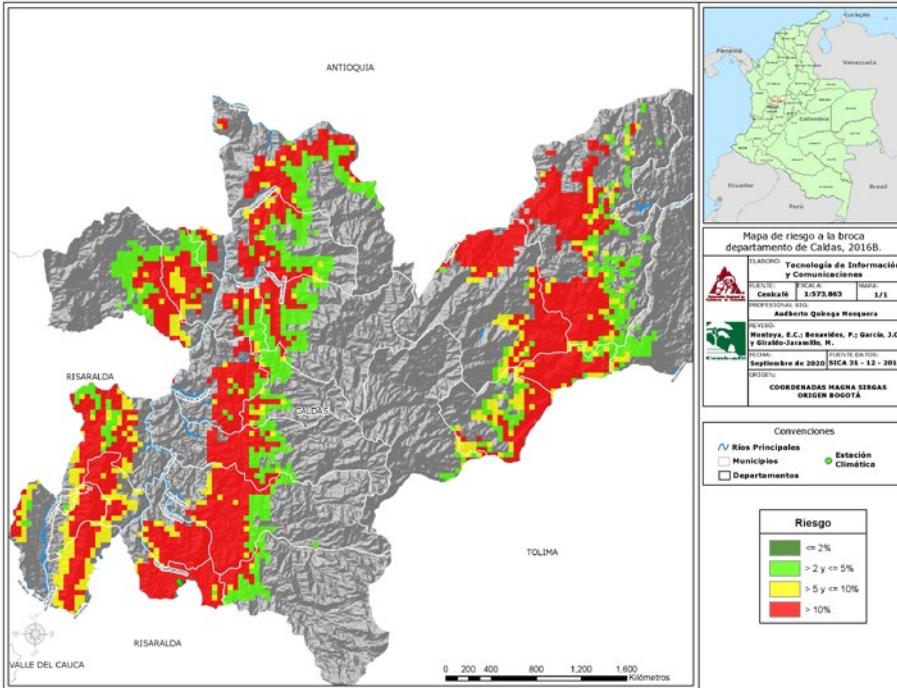


Figura 31. Mapa de riesgo Caldas año 2016.

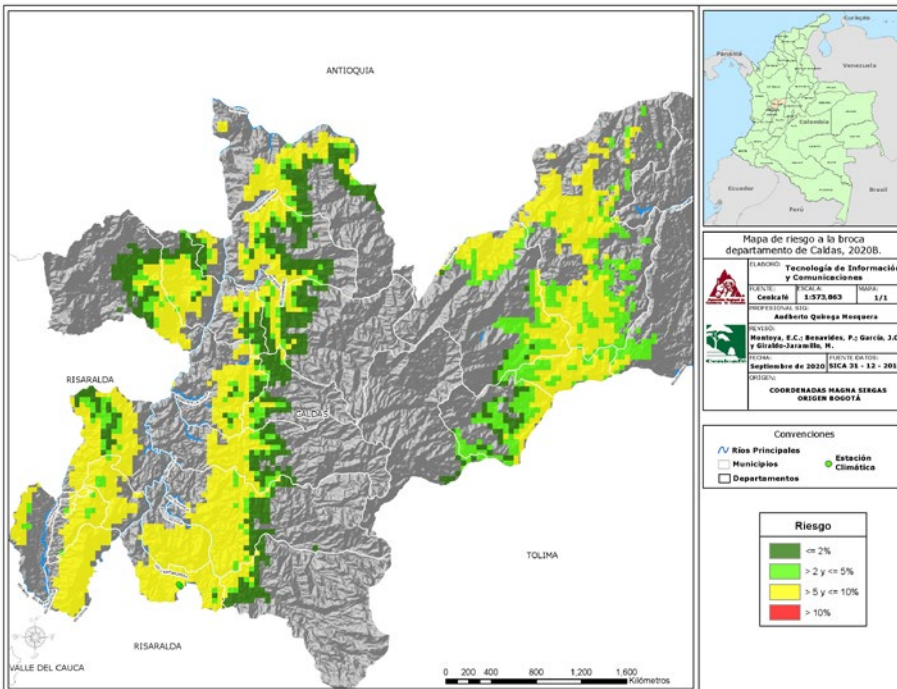


Figura 32. Mapa de riesgo Caldas año 2020.

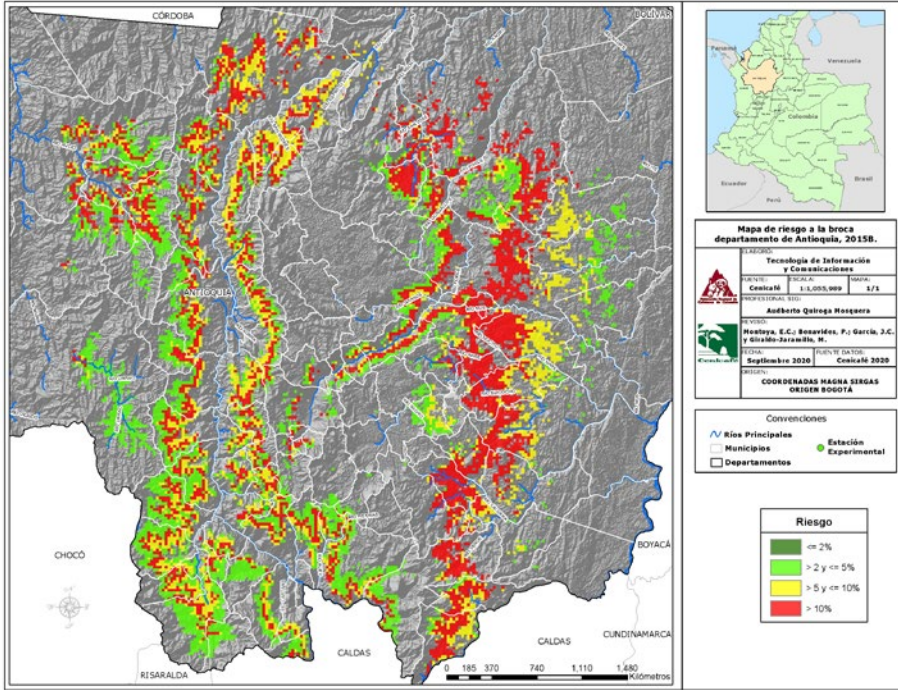


Figura 33. Mapa de riesgo Antioquia año 2015.

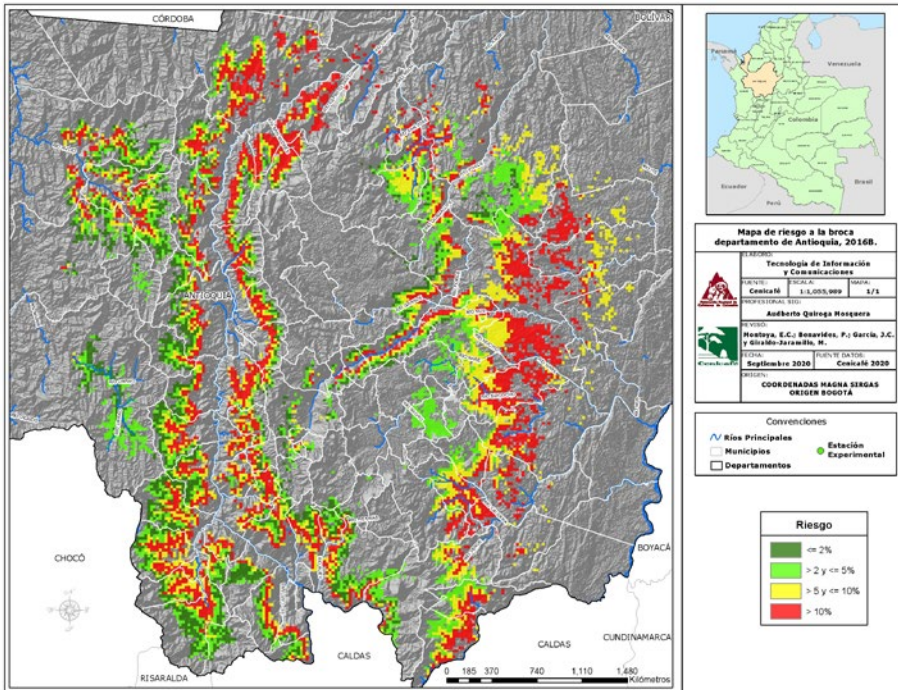


Figura 34. Mapa de riesgo Antioquia año 2016.

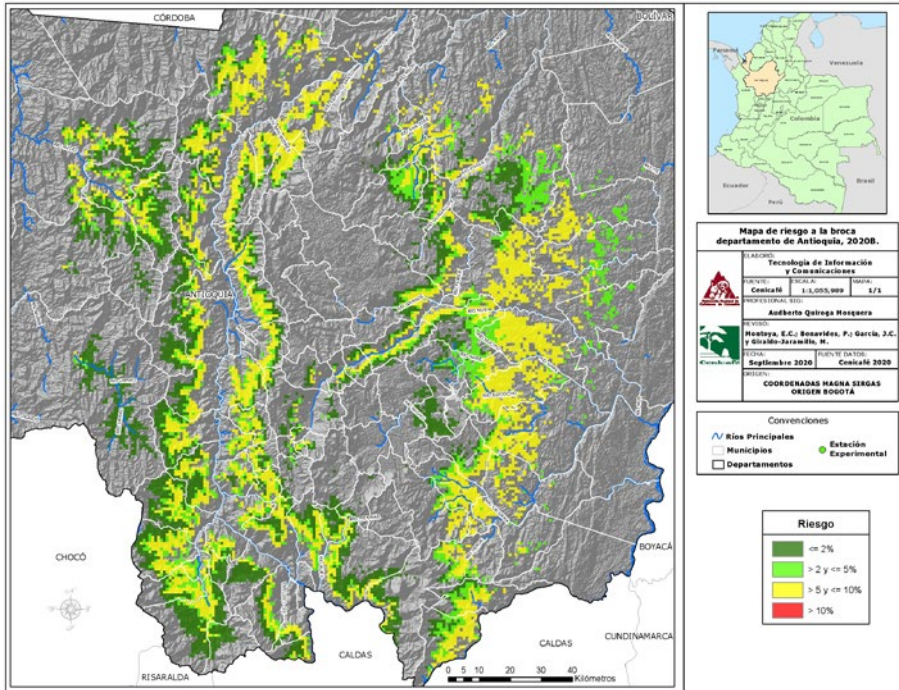


Figura 35.
Mapa de riesgo
Antioquia año
2020.

Literatura citada

Arcila, J. (1988). Desarrollo reproductivo del café. En Federación Nacional de Cafeteros (Ed.), *Tecnología del cultivo del café* (2a ed, pp. 88–96). Cenicafe. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/717>

Arcila, J., Jaramillo, A., Baldión, V., & Bustillo, A. E. (1993). La floración del café y su relación con el control de la broca. *Avances Técnicos Cenicafe*, 193, 1–6. <http://hdl.handle.net/10778/1044>

Bailey, V. A. (1931). The interaction between hosts and parasites. *The Quarterly Journal of Mathematics*, 2(1), 68–77. <https://doi.org/10.1093/qmath/os-2.1.68>

Baker, P. S. (1984). Some aspects of the behavior of the coffee berry borer in relation to its control in southern Mexico (Coleoptera: Scolytidae). *Folia Entomológica Mexicana*, 61, 9–24.

Baker, P. S., Barrera, J. F., & Rivas, A. (1992). Life-History Studies of the Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*, Scolytidae) on Coffee Trees in Southern Mexico. *The Journal of Applied Ecology*, 29(3), 656. <https://doi.org/10.2307/2404473>

Baker, P. S., Ley, C., Balbuena, R., & Barrera, J. F. (1992). Factors affecting the emergence of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae)

from coffee berries. *Bulletin of Entomological Research*, 82(2), 145–150. <https://doi.org/10.1017/S000748530005166X>

Batista Filho, A., Abrahão, J., & Bastos Cruz, B. P. (1988). Contribuição ao estudo de *Hypothenemus hampei* (Ferrari 1867). *Arquivos Do Instituto Biológico*, 55(1/4), 37–41.

Benigno, E., Shepard, B., Rubia, E., Arida, G., Penning de Vries, F., & Bandong, J. (1988). Simulation of rice leafhopper population dynamics in lowland rice. *IRRI Research Paper Series—International Rice Research Institute*, 1988(135), 1–7.

- Bergamin, J. (1943). Contribuição para o conhecimento da biologia da broca do café *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Col. Ipidae). *Arquivos Do Instituto Biológico*, 14, 31–72.
- Bernal, M. G., Bustillo, A. E., & Posada, F. J. (1994). Virulencia de aislamientos de *Metarhizium anisopliae* y su eficacia en campo sobre *Hypothenemus hampei*. *Revista Colombiana de Entomología*, 20(4), 225–228.
- Borbón, O. (1989). *Bioecologie d' un ravageur des bajes de cafeier Hypothenemus hampei (Ferr.) (Coleoptera: Scolytidae) et des ses parasitoides au togo* [Thèse de doctorat]. L'Universite Paul-Sabatier de Toulouse Cedex.
- Bustillo, A. E. (1983). *Analysis of a Southern pine coneworm (Dioryctria amatella -egg parasitoid (Trichogramma minutum) production system under laboratory conditions*. [Tesis de Doctorado], University of Florida. Gainesville.
- Bustillo, A. E. (1996, octubre 23–25). *Elementos biológicos para un programa de manejo integrado de la broca del café en Colombia*. En Comité Departamental de Cafeteros de Antioquia (Organizador), Memorias II Curso de actualización sobre manejo integrado de la broca del café-Cenicafé, Medellín, Colombia.
- Bustillo, A. E., & Posada, F. J. (1996). El uso de entomopatógenos en el control de la broca del café en Colombia. *Manejo Integrado de Plagas*, 42, 1–13.
- Bustillo, A. E., Orozco Hoyos, J., Benavides Machado, P., & Portilla Reina, M. (1996). Producción masiva y uso de parasitoides para el control de la broca del café en Colombia. *Revista Cenicafé*, 47(4), 215–230. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4165>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2020). *Informe Anual Cenicafé 2020*. <https://doi.org/10.38141/10783/2020>
- Cheng, J. A., & Holt, J. (1990). A Systems Analysis Approach to Brown Planthopper Control on Rice in Zhejiang Province, China. I. Simulation of Outbreaks. *The Journal of Applied Ecology*, 27(1), 85–99. <https://doi.org/10.2307/2403569>
- Cheng, J. A., Norton, G. A., & Holt, J. (1990). A Systems Analysis Approach to Brown Planthopper Control on Rice in Zhejiang Province, China. II. Investigation of Control Strategies. *The Journal of Applied Ecology*, 27(1), 100–112. <https://doi.org/10.2307/2403570>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2020). *Informe Anual Cenicafé 2020*. <https://doi.org/10.38141/10783/2020>
- Corbett, G. H. (1933). Some Preliminary Observations on the Coffee Berry Beetle Borer *Stephanoderes (Cryphalus) hampei* Ferr. *Malayan Agricultural Journal*, 21(1), 8–22. <https://www.cabi.org/ISC/abstract/19330500537>
- De Oliveira Aparecido, L. E., & De Souza Rolim, G. (2020). Models for simulating the frequency of pests and diseases of *Coffea arabica* L. *International Journal of Biometeorology*, 64(7), 1063–1084. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01881-5>
- Decazy, B. (1990). Descripción, biología, ecología y control de la broca del fruto del café, *Hypothenemus hampei* (Ferr.). En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *50 años de Cenicafé 1938-1988: Conferencias conmemorativas*. (pp. 133–139). Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/713>
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Wiley.
- Gaviria, A. M., Cardenas, R., Montoya, E. C., & Madrigal, A. (1995). Incremento poblacional de la broca del café *Hypothenemus hampei* relacionado con el desarrollo del fruto del café. *Revista Colombiana de Entomología*, 21(3), 145–151.
- Getz, W. M., & Gutierrez, A. P. (1982). A perspective on systems analysis in crop production and insect pest management. *Annual Review of Entomology*, 27(1), 447–466. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.27.010182.002311>
- Gutierrez, A. P., Christensen, J. B., Merritt, C. M., Loew, W. B., Summers, C. G., & Cothran, W. R. (1976). Alfalfa and the Egyptian alfalfa weevil (Coleoptera: Curculionidae). *The Canadian Entomologist*, 108(6), 635–648. <https://doi.org/10.4039/Ent108635-6>
- Gutiérrez, A. P., Baumgaertner, J. U., & Hagen, K. S. (1981). A conceptual model for growth, development, and reproduction in the ladybird beetle, *Hippodamia convergens* (Coleoptera: Coccinellidae). *The Canadian Entomologist*, 113(1), 21–33. <https://doi.org/10.4039/Ent11321-1>
- Gutierrez, A. P., Yaninek, J. S., Wermelinger, B., Herren, H. R., & Ellis, C. K. (1988). Analysis of Biological Control of Cassava Pests in Africa. III. Cassava Green Mite *Mononychellus tanajoa*. *The Journal of Applied Ecology*, 25(3), 941–950. <https://doi.org/10.2307/2403756>
- Gutierrez, A. P., Santos, W. J. D., Villacorta, A., Pizzamiglio, M. A., Ellis, C. K., Carvalho, L. H., & Stone, N. D. (1991). Modelling the Interaction of Cotton and the Cotton Boll Weevil. I. A Comparison of

- Growth and Development of Cotton Varieties. *The Journal of Applied Ecology*, 28(2), 371–397. <https://doi.org/10.2307/2404557>
- Hall, C. A. S., & Day, J. W. (1977). Systems and models: Terms and basic principles. En *Ecosystem modeling in theory and practice: An introduction with case histories*. Wiley.
- Hamilton, L. J., Hollingsworth, R. G., Sabado-Halpern, M., Manoukis, N. C., Follett, P. A., & Johnson, M. A. (2019). Coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) (Coleoptera: Curculionidae) development across an elevational gradient on Hawai'i Island: Applying laboratory degree-day predictions to natural field populations. *PLOS ONE*, 14(7), e0218321. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218321>
- Hassell, M. P., & Varley, G. C. (1969). New Inductive Population Model for Insect Parasites and its Bearing on Biological Control. *Nature*, 223(5211), 1133–1137. <https://doi.org/10.1038/2231133a0>
- Herrera, H. (1997). Búsqueda de sustancias atrayentes para la broca del café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) [Tesis de pregrado]. Universidad de Caldas.
- Holling, C. S. (1959a). The Components of Predation as Revealed by a Study of Small-Mammal Predation of the European Pine Sawfly. *The Canadian Entomologist*, 91(5), 293–320. <https://doi.org/10.4039/Ent91293-5>
- Holling, C. S. (1959b). Some Characteristics of Simple Types of Predation and Parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7), 385–398. <https://doi.org/10.4039/Ent91385-7>
- Holt, J., Cheng, J. A., & Norton, G. A. (1990). A Systems Analysis Approach to Brown Planthopper Control on Rice in Zhejiang Province, China. III. An Expert System for Making Recommendations. *The Journal of Applied Ecology*, 27(1), 113–122. <https://doi.org/10.2307/2403571>
- Holt, J., Warein, D. R., Norton, G. A., & Cook, A. G. (1989). A Simulation of the impact of immigration on brown planthopper population dynamics in tropical rice. *Journal of Plant Protection in the tropics*, 6(3), 173–187.
- Huffaker, C. B. (Ed.). (1980). *New Technology of pest control*. Wiley.
- Hughes, R. D. (1963). Population Dynamics of the Cabbage Aphid, *Brevicoryne brassicae* (L.). *The Journal of Animal Ecology*, 32(3), 393–424. <https://doi.org/10.2307/2600>
- Hughes, R. D., & Gilbert, N. (1968). A Model of an Aphid Population—A General Statement. *The Journal of Animal Ecology*, 37(3), 553–563. <https://doi.org/10.2307/3074>
- Kawamoto, H., Sinha, R. N., Muir, W. E., & Woods, S. M. (1991). Simulation Model of *Acarus siro* (Acari: Acaridae) in Stored Wheat. *Environmental Entomology*, 20(5), 1381–1386. <https://doi.org/10.1093/ee/20.5.1381>
- Lefkovich, L. P. (1965). The Study of Population Growth in Organisms Grouped by Stages. *Biometrics*, 21(1), 1–18. <https://doi.org/10.2307/2528348>
- Leslie, P. H. (1945). On the use of matrices in certain population mathematics. *Biometrika*, 33(3), 183–212. <https://doi.org/10.1093/biomet/33.3.183>
- Lewis, E. G. (1942). On the Generation and Growth of a Population. En K. Krickeberg & S. A. Levin, *Mathematical Demography* (Vol. 6, pp. 221–225). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-81046-6_25
- Logan, J. A., Stinner, R. E., Rabb, R. L., & Bacheler, J. S. (1979). A Descriptive Model for Predicting Spring Emergence of *Heliothis zea* populations in North Carolina. *Environmental Entomology*, 8(1), 141–146. <https://doi.org/10.1093/ee/8.1.141>
- López, A. A. (1993). Contribución a la biología del scolyte du café, *Hypothenemus hampei* (Ferr.) (Coleoptera, Scolytidae) [Tesis de pregrado]. Université de Villeneuve.
- Lotka, A. J. (1925). Elements of physical biology. *Nature*, 116(2917), 461–461. <https://doi.org/10.1038/116461b0>
- Miguel, A. E., & Paulini, A. E. (1975, Novembro 18–21). *Velocidade de penetração da broca do café Hypothenemus hampei* (Ferrari) no fruto do café. III Congresso Brasileiro de pesquisas Cafeeiras, Curitiba, Rio de Janeiro, Brasil.
- Montoya, S., Cárdenas, R. (1994). Biología de *Hypothenemus hampei* (Ferrari) en frutos de café de diferentes edades. *Revista Cenicafé*, 45(1), 5–13.
- Montoya, E.C., Arcila, J., Jaramillo, A., Riaño, N., & Quiroga, F. (2009). Modelo para simular la producción potencial del cultivo del café en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafé*, 33, 1–52. <http://hdl.handle.net/10778/588>
- Montoya, E. C., Sierra, C. A. (1993). Desarrollo matemático e Implantación del modelo

de simulación de la roya del café en Colombia. *Revista Cenicafé*, 44(2), 56–67.

- Muñoz, R. (1989). Ciclo biológico y reproducción partenogenética del café, *Hypothenemus hampei* (Ferr.). *Turrialba*, 39(3), 415–421.
- Nachman, G. (1991). An acarine predator-prey metapopulation system inhabiting greenhouse cucumbers. *Biological Journal of the Linnean Society*, 42(1–2), 285–303. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1991.tb00564.x>
- Nicholson, A. J. (1933). The Balance of Animal Populations. *The Journal of Animal Ecology*, 2(1), 131–178. <https://doi.org/10.2307/954>
- Nicholson, A. J., & Bailey, V. A. (1935). The Balance of Animal Populations.-Part I. *Proceedings of the Zoological Society of London*, 105(3), 551–598. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1935.tb01680.x>
- Orozco, J., & Aristizábal, L. F. (1996). Parasitoides de origen africano para el control de la broca del café. *Avances Técnicos de Cenicafé*, 223, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/1046>
- Pearl, R., & Reed, L. J. (1920). On the Rate of Growth of the Population of the United States since 1790 and Its Mathematical Representation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 6(6), 275–288. <https://doi.org/10.1073/pnas.6.6.275>
- Penados, R., Ochoa, H. (1979). La consistencia del fruto del café y su importancia en el control de la broca. *Revista Cafetalera de Guatemala*, 181, 10–16.
- Quintana, O., & Velasquez, B. (1994). *Estudios de modelos de dinámica poblacional y aplicación a la broca del café (Hypothenemus hampei ferrari 1867) en presencia del parasitoide (Cephalonomia Stephanoderis)* [Tesis de pregrado]. Universidad del Valle.
- Rodríguez, D., Cure, J. R., Gutierrez, A. P., Cotes, J. M., & Cantor, F. (2013). A coffee agroecosystem model: II. Dynamics of coffee berry borer. *Ecological Modelling*, 248, 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.09.015>
- Ruesink, W. G. (1976). Status of the Systems Approach to Pest Management. *Annual Review of Entomology*, 21(1), 27–44. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.21.010176.000331>
- Ruiz, R. (1996). *Efecto de la fenología del fruto del café sobre los parámetros de la tabla de vida de la broca del café, Hypothenemus hampei* [Tesis de pregrado]. Universidad de Caldas.
- Salazar, M., Arcila, J., Riaño, N., & Bustillo, A. E. (1993). Crecimiento y desarrollo del fruto del café y su relación con la broca. *Avances Técnicos Cenicafé*, 194, 1–4. <http://hdl.handle.net/10778/1045>
- Sharkey, A. J., Salt, D. W., & Ford, M. G. (1987). Use of simulation to define an optimum deposit for control of a sedentary pest. *Aspects of Applied Biology*, 14, 267–280.
- Sharpe, P. J. H., & DeMichele, D. W. (1977). Reaction kinetics of poikilotherm development. *Journal of Theoretical Biology*, 64(4), 649–670. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(77\)90265-X](https://doi.org/10.1016/0022-5193(77)90265-X)
- Shaw, P. B. (1984). Simulation model of a predator-prey system comprised of Phytoseiulus persimilis Athias-Henriot (Acari: Phytoseiidae) and Tetranychus urticae Koch (Acari: Tetranychidae). I. Structure and validation of the model. *Researches on Population Ecology*, 26(2), 235–259. <https://doi.org/10.1007/BF02515492>
- Shelford, V. (1927). An Experimental Investigation of the Relations of the Codling Moth to Weather and Climate. *Illinois Natural History Survey Bulletin*, 16(1–7), 312–440. <https://doi.org/10.21900/j.inhs.v16.296>
- Shoemaker, C. A. (1977). Pest Management models of crop ecosystems. En C. A. S. Hall & J. W. Day (Eds.), *Ecosystem modeling in theory and practice: An introduction with case histories* (pp. 545–574). Wiley.
- SMERAGE, G. H.; POE, S. L.; MUSGRAVE, C. A. 1980a. Conceptual modeling. In: Systems analysis of insect population dynamics. Ch. 1, 23 p. Plant protection through IPM. IFAS, Univ. of Florida, Gainesville. 90p.
- SMERAGE, G. H.; POE, S. L.; MUSGRAVE, C. A. 1980b. Mathematical modeling. In: Systems analysis of insect population dynamics. Ch. 3, 39p. Plant protection through IPM. IFAS, Univ. of Florida, Gainesville. 90p.
- Stimac, J. L. (1977). *A model study of a plant-herbivore system* [Tesis de Doctorado]. Oregon State University. Oregon.
- Stimac, J. L. (1982). History and Relevance of Behavioral Ecology in Models of Insect Population Dynamics. *The Florida Entomologist*, 65(1), 9–16. <https://doi.org/10.2307/3494142>
- Stimac, J. L., & Barfield, C. S. (1979). Systems approach to pest management in soybeans. En F. T. Corbin (Ed.), *Proceed. World Soybean Res. Conf. II* (pp. 249–259). Westview Press.

Thompson, W. R. (1924). La theorie mathematique de l'action des parasites entomophages et le facteur du hasard. *Annales de la Faculté des Sciences de Marseille*, 2(2), 69–89.

Ticheler, J. H. G. (1963). Estudio analítico de la epidemiología del escolítido de los granos de café, *Stephanoderis hampei* Ferr., en Costa de Marfil (G. Quiceno, Trad.). *Revista Cenicafé*,

14(4), 223–294. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc014%2804%29223-294.pdf>

Trejos, V. P. (1998). *Determinación de factores ambientales que influyen en la emergencia y mortalidad de la broca del café hypothenemus hampei (Coleoptera: Curculionidae) en frutos del árbol y del suelo* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Colombia.

Tummala, R. L., Ruesink, W. G., & Haynes, D. L. (1975). A Discrete Component Approach to the Management of the Cereal Leaf Beetle Ecosystem1. *Environmental Entomology*, 4(2), 175–186. <https://doi.org/10.1093/ee/4.2.175>





Cenicafé

Ciencia, tecnología
e innovación
para la caficultura
colombiana