



## **PROGRAMA CENTROAMERICANO DE GESTION INTEGRAL DE LA ROYA DEL CAFÉ - PROCAGICA**

### **ESTABLECIMIENTO DE UNA RED REGIONAL DE ALERTA TEMPRANA PARA LA ROYA DEL CAFÉ**

#### **Guía para el uso de modelos estadísticos de pronóstico de la infección, esporulación e intensificación de la esporulación de la roya del café**

### **1. Antecedentes**

Los modelos utilizados para el pronóstico de la infección, esporulación y crecimiento del área esporulada derivan de los que se publicaron en este artículo:

**Merle I, Tixier P, Virginio Filho EDM, Cilas C, Avelino J, 2020. Forecast models of coffee leaf rust symptoms and signs based on identified microclimatic combinations in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. Crop Protection 130.**

Este artículo es un producto de la tesis de doctorado de Isabelle Merle, cofinanciada por CIRAD, la fundación ILLY, y el programa PROCAGICA de la Unión Europea.

### **2. Fundamentos de los modelos**

Los modelos construidos en esta publicación tienen predictores de la roya que caracterizan el microclima, la carga fructífera de la planta, la cantidad de inóculo presente e incluso la edad y tamaño de la lesión. Sin embargo, en la versión simplificada de estos modelos, solamente las variables micro-climáticas más comunes deben informarse para obtener un pronóstico.

La originalidad de estos modelos reside en tres puntos principales:

- No se pronostica ni incidencia ni severidad, sino cambios en el estado de las lesiones: (1) de la ausencia de la lesión hacia su aparición (2) de la lesión sin esporas hacia la aparición de las primeras esporas (3) de la lesión con esporas hacia el incremento del área esporulada. Esto permite librarse del crecimiento o de la defoliación del hospedero que pueden enmascarar el crecimiento del patógeno. En efecto, la incidencia y severidad son relaciones entre una cantidad de enfermedad y una cantidad de tejido vegetal, que pueden aumentar o disminuir de acuerdo a la variación de la enfermedad, pero también de acuerdo a la variación de la cantidad de tejido vegetal. Por lo tanto, esas variables caracterizan dos dinámicas al mismo tiempo y son, teóricamente, más difíciles de explicar que variables que caracterizan sólo la enfermedad. Adicionalmente, el tener tres modelos que pronostican

diferentes fases de la enfermedad ayuda a hacer recomendaciones de control mejor enfocadas, o sea para evitar la infección, para limitar la colonización del tejido, o para contrarrestar la esporulación.

- En muchos modelos, se consideran las condiciones micro-climáticas que ocurren durante el mes anterior a la fecha de pronóstico, para hacer ese pronóstico. En los modelos presentados aquí, los periodos de las variables micro-climáticas, que se contemplan para el pronóstico de la roya, dependen de cada variable y no son definidos a priori. En efecto, la aparición de una enfermedad es el resultado de una secuencia de eventos, cada uno dependiendo de factores micro-climáticos distintos que actúan en diferentes momentos. El enfoque estadístico utilizado permite identificar estos periodos críticos para cada variable micro-climática.
- No todas las relaciones entre las variables micro-climáticas y la enfermedad son lineales. Muchas, por lo contrario, son unimodales. Eso pasa con la temperatura y las precipitaciones. Hay óptimos. Abajo y arriba de esos óptimos, las condiciones se vuelven subóptimas. Nuestros modelos consideran esta posibilidad.

### 3. Los modelos

#### 3.1. Pronóstico de aparición de la lesión o modelo de infección

Son dos modelos, dependiendo de la abundancia de la precipitación. Ambos permiten pronosticar la probabilidad de aparición de una lesión en un punto específico de la hoja de café a los 10 días, considerando que puede haber un máximo de 25 lesiones individuales por hoja (la gran mayoría de las hojas enfermas no tienen más de 25 lesiones identificables).

El modelo de baja precipitación se utiliza cuando el promedio de la lluvia diaria en el periodo entre 33 días antes de la fecha para la cual se pronostica la aparición de la lesión ( $F_L$ ) y 24 días antes de esa fecha, o sea durante un periodo de 10 días (ver **Figura 1**), es  $\leq 4$  mm. El modelo de alta precipitación se utiliza cuando este promedio es  $> 4$  mm.

**Número de días antes de la fecha para la cual se pronostica la probabilidad de aparición de la lesión de roya ( $F_L$ )**

-33	-32	-31	-30	-29	-28	-27	-26	-25	-24	-23	-22	-21	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	<b>F<sub>L</sub></b>
Periodo de precipitación considerado para la selección del modelo de infección																																	

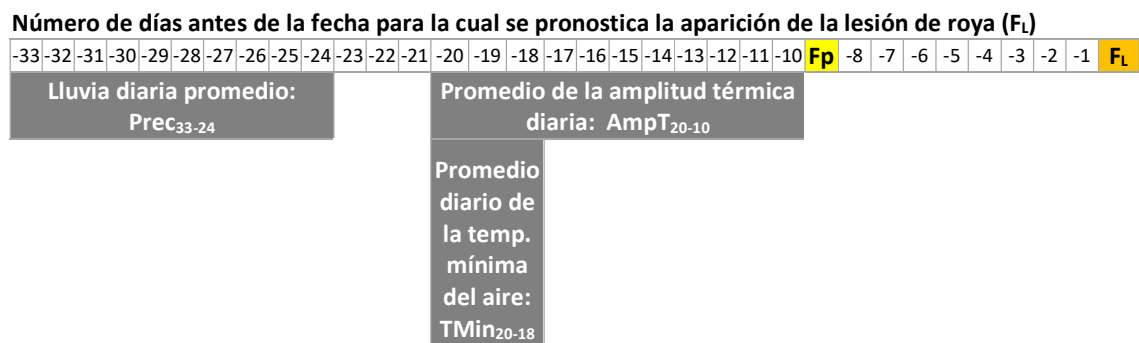
**Figura 1.** Representación esquemática de la variable de precipitación por considerar para la selección del modelo de infección

### 3.1.1. Modelo de baja precipitación: lluvia diaria $\leq 4$ mm en promedio durante 10 días consecutivos

El modelo de baja precipitación para el pronóstico de la probabilidad de aparición de la lesión de roya se basa en 3 variables (**Figura 2**):

- El promedio de la lluvia diaria en el periodo entre 33 días antes de la fecha para la cual se pronostica la aparición de la lesión ( $F_L$ ) y 24 días antes de esa fecha: **Prec<sub>33-24</sub>**
- El promedio de la temperatura mínima del aire en el periodo entre 20 días antes de la fecha para la cual se pronostica la aparición de la lesión ( $F_L$ ) y 18 días antes de esa fecha: **TMin<sub>20-18</sub>**
- El promedio de la amplitud térmica diaria (diferencia entre la temperatura máxima del aire y la temperatura mínima) en el periodo entre 20 días antes de la fecha para la cual se pronostica la aparición de la lesión ( $F_L$ ) y 10 días antes de esa fecha: **AmpT<sub>20-10</sub>**

Esta última variable es la que se acerca más a  $F_L$ . El día después de documentar esa variable, en  $F_P$  (**Figura 2**), y conociendo el valor de las otras dos variables del modelo, se puede hacer un pronóstico de la probabilidad de aparición de una lesión de roya 10 días después.



**Figura 2.** Representación esquemática de las variables micro-climáticas consideradas para el pronóstico de la probabilidad de aparición de la lesión de roya en la fecha  $F_L$ . La fecha en que se hace el pronóstico es  $F_P$ . Se pronostica la aparición de la lesión a los 10 días.

La ecuación del modelo se escribe así:

$$\text{La probabilidad de aparición de la lesión} = \exp(x)/(1+\exp(x))$$

$$\text{Donde } x = -13.58 + 0.40 * \text{Prec}_{33-24} + 0.35 * \text{TMin}_{20-18} + 0.20 * \text{AmpT}_{20-10} \quad (\text{modelo 1})$$

### 3.1.2. Modelo de alta precipitación: lluvia diaria > 4 mm en promedio durante 10 días consecutivos

El modelo de alta precipitación para el pronóstico de la probabilidad de aparición de la lesión de roya se basa en las mismas 3 variables que las que están consideradas en el modelo de baja precipitación (**Figura 2**).

La mayor diferencia reside en la inclusión de dos efectos cuadráticos en el modelo de alta precipitación. Tanto **Prec<sub>33-24</sub>** como **TMin<sub>20-18</sub>** se relacionan positivamente con la probabilidad de aparición de la lesión de roya, hasta cierto óptimo, y pasando este óptimo, se relacionan negativamente con la probabilidad (el término cuadrado es negativo en la ecuación).

La ecuación del modelo se escribe así:

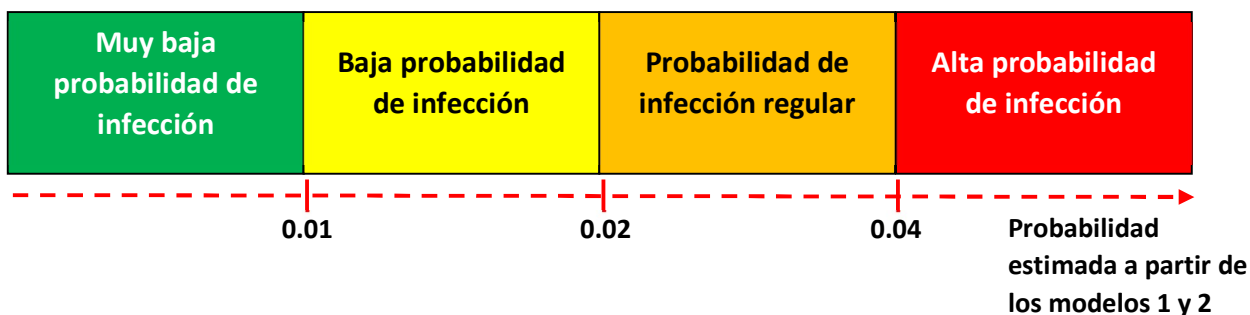
$$\text{La probabilidad de aparición de la lesión} = \frac{\exp(x)}{1 + \exp(x)}$$

$$\text{Donde } x = -36.49 + 0.29 * \text{Prec}_{33-24} - 0.014 * \text{Prec}_{33-24}^2 + 3.34 * \text{TMin}_{20-18} - 0.09 * \text{TMin}_{20-18}^2 + 0.11 * \text{AmpT}_{20-10}$$

**(modelo 2)**

### 3.1.3. Categorías de riesgo

Los pronósticos de los modelos 1 y 2 son probabilidades de aparición de una lesión en un punto específico de la hoja de café, sabiendo que se considera que cada hoja puede albergar hasta 25 lesiones. Se han elaborado 4 categorías de riesgo, definidas de acuerdo a la distribución de las probabilidades observadas, de tal forma que las categorías representen valores plausibles de probabilidad de infección, aunque arbitrarios. El umbral 0.04 es, sin embargo, un umbral crítico bien fundamentado ya que este umbral representa una probabilidad de 1 que una lesión aparezca en una hoja de café (0.04 x 25 lesiones = 1).



**Figura 3.** Riesgos de aparición de una lesión de roya a los 10 días, de acuerdo a las probabilidades calculadas a partir de los **modelos 1 y 2**

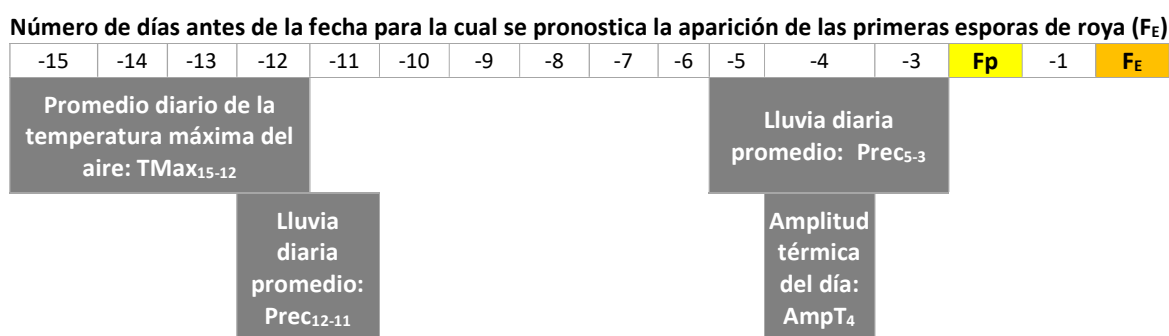
Estas probabilidades están plasmadas en la **Figura 3**. Cada valor define el límite entre diferentes riesgos de aparición de una lesión de roya.

### 3.2. Pronóstico de aparición de las primeras esporas o modelo del inicio de la esporulación

El modelo para el pronóstico de la probabilidad de aparición de las primeras esporas en las lesiones de roya se basa en 4 variables (**Figura 4**):

- El promedio de la temperatura máxima del aire en el periodo entre 15 días antes de la fecha para la cual se pronostica la aparición de las primeras esporas ( $F_E$ ) y 12 días antes de esa fecha:  **$TMax_{15-12}$**
- El promedio de la lluvia diaria en el periodo entre 12 días antes de la fecha para la cual se pronostica la aparición de las primeras esporas ( $F_E$ ) y 11 días antes de esa fecha:  **$Prec_{12-11}$**
- La amplitud térmica del día 4 antes de la fecha para la cual se pronostica la aparición de las primeras esporas ( $F_E$ ):  **$AmpT_4$**
- El promedio de la lluvia diaria en el periodo entre 5 días antes de la fecha para la cual se pronostica la aparición de las primeras esporas ( $F_E$ ) y 3 días antes de esa fecha:  **$Prec_{5-3}$**

Esta última variable es la que se acerca más a  $F_E$ . El día después de documentar esa variable, en  $F_P$  (**Figura 4**), y conociendo el valor de las otras tres variables del modelo, se puede hacer un pronóstico de la probabilidad de aparición de las primeras esporas en las lesiones de roya 3 días después.



**Figura 4.** Representación esquemática de las variables micro-climáticas consideradas para el pronóstico de la probabilidad de aparición de las primeras esporas en las lesiones de roya en la fecha  $F_E$ . La fecha en que se hace el pronóstico es  $F_P$ . Se pronostica la aparición de las esporas a los 3 días.

El modelo obtenido conlleva dos efectos cuadráticos. Tanto  **$TMax_{15-12}$**  como  **$Prec_{5-3}$**  se relacionan positivamente con la probabilidad de aparición de las primeras esporas en las lesiones de roya, hasta cierto óptimo, y pasando este óptimo, se relacionan negativamente con la probabilidad (el término cuadrado es negativo en la ecuación).

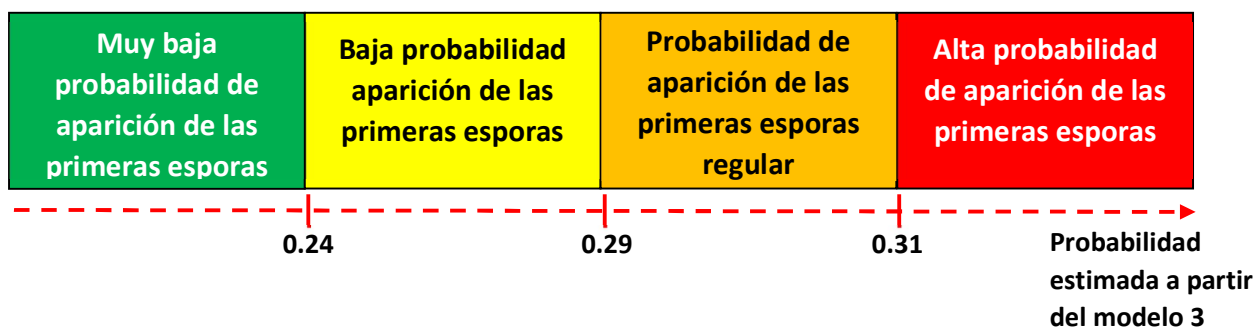
La ecuación del modelo se escribe así:

La probabilidad de aparición de las primeras esporas =  $\exp(x)/(1+\exp(x))$

Donde  $x = -18.68 + 1.29 * TMax_{15-12} - 0.023 * TMax_{15-12}^2 + 0.019 * Prec_{12-11} - 0.046 * AmpT_4 + 0.069 * Prec_{5-3} - 0.0033 * Prec_{5-3}^2$

(modelo 3)

Se han creado 4 categorías de riesgo con el modelo 3, definidas de acuerdo al valor de los cuartiles de la distribución de las probabilidades observadas. Estas están plasmadas en la **Figura 5**. Cada cuartil define el límite entre diferentes riesgos de aparición de una lesión de roya.



**Figura 5.** Riesgos de aparición de las primeras esporas en las lesiones de roya a los 3 días, de acuerdo a las probabilidades calculadas a partir del **modelo 3**

### 3.3. Pronóstico del incremento del área esporulada o modelo de intensificación de la esporulación

El modelo para el pronóstico del incremento del área esporulada por lesión se basa en 1 variable solamente (**Figura 6**):

- la temperatura máxima del aire 5 días antes de la fecha para la cual se pronostica el incremento del área esporulada ( $F_{AE}$ ):  $TMax_5$

El día después de documentar esa variable, en  $F_P$  (**Figura 6**), se puede hacer un pronóstico del incremento del área esporulada por lesión 5 días después.

La relación entre  $TMax_5$  y el incremento del área esporulada es cuadrática. Primero la relación es positiva, hasta cierto óptimo, y pasando este óptimo, se vuelve negativa (el término cuadrado es negativo en la ecuación)

Número de días antes de la fecha para la cual se pronostica el incremento del área esporulada ( $F_{AE}$ )

-5	$F_P$	-3	-2	-1	$F_{AE}$
Temperatura máxima: $TMax_5$					

**Figura 6.** Representación esquemática de la variable micro-climática considerada para el pronóstico del incremento del área esporulada por lesión en la fecha  $F_{AE}$ . La fecha en que se hace el pronóstico es  $F_P$ . Se pronostica el incremento del área esporulada a los 5 días.

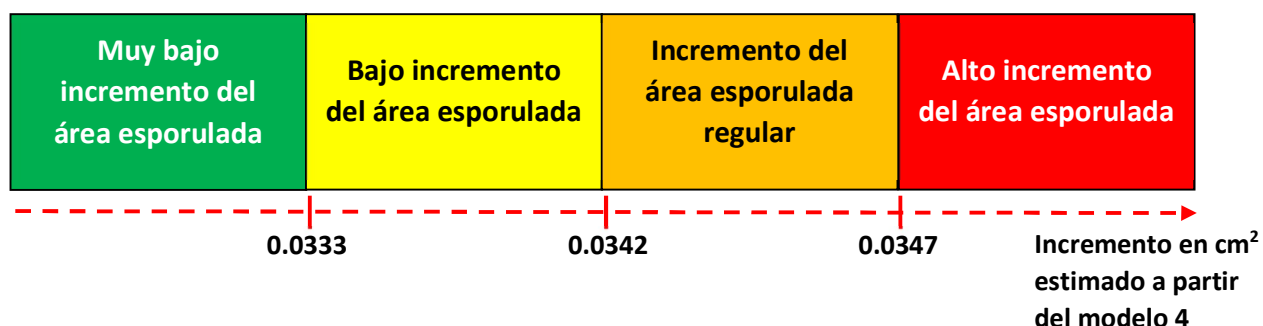
La ecuación del modelo se escribe así:

El incremento de área esporulada por lesión ( $cm^2$ )

$$= - 0.0672 + 0.007 * TMax_5 - 0.00012 * TMax_5^2$$

(modelo 4)

Se han creado 4 categorías de riesgo con el modelo 4, definidas de acuerdo al valor de los cuartiles de la distribución de los valores de incremento observados. Estas están plasmadas en la **Figura 7**. Cada cuartil define el límite entre diferentes riesgos de crecimiento del área esporulada.



**Figura 7.** Riesgos de incremento del área esporulada por lesión a los 5 días, de acuerdo a las salidas del **modelo 4**

#### 4. El uso combinado de los modelos

Diariamente, se pueden calcular los riesgos de infección (modelos 1 y 2), del inicio de la esporulación (modelo 3) y de intensificación de la esporulación (modelo 4). En teoría, hay  $4 \times 4 \times 4 = 64$  combinaciones posibles de esos riesgos, que pueden ayudar a afinar las recomendaciones de control (ver **Cuadro 1**).

Un alto riesgo de infección, combinado con riesgos bajos o moderados de inicio de la esporulación y de su intensificación puede llevar a una recomendación de utilizar productos protectantes, para proteger de las nuevas infecciones. Un alto riesgo de que aparezcan las primeras esporas, pero con un riesgo bajo o moderado de intensificación de la esporulación, puede conducir a recomendar un producto curativo afectando más el micelio, para evitar que esporulen las lesiones. Un alto riesgo de intensificación de la esporulación puede significar la necesidad de aplicar un producto erradicante, para eliminar las esporas.

Cuadro 1. Algunas combinaciones posibles de riesgos y el tipo de recomendación\*

Riesgo de infección	Riesgo de inicio de la esporulación	Riesgo de intensificación de la esporulación	Tipo de recomendación posible
			Producto protectante
			Producto curativo con efecto principal en el micelio (triazol por ejemplo)
			Producto curativo erradicante (estrobilurina por ejemplo)

\* Los colores representan los niveles de riesgo plasmados en la **Figura 3** para la infección, la **Figura 5** para el inicio de la esporulación y la **Figura 7** para la intensificación de la esporulación

## 5. Incorporando la sombra en los pronósticos

Las temperaturas del aire consideradas en los modelos son las de la parcela de café. Es decir, para tener un pronóstico que se ajuste a las condiciones de la parcela, los sensores de temperatura deberían estar en las parcelas de café. Si éste no es el caso, por ejemplo, si las temperaturas proceden de estaciones meteorológicas (en condiciones de pleno sol), los pronósticos que resultarían del uso de estas temperaturas estarían ajustados a las condiciones de pleno sol.

Sin embargo, es posible deducir las temperaturas del aire de la parcela a partir del conocimiento de las temperaturas registradas en una estación meteorológica cercana y las condiciones de sombra de la parcela.

Los modelos, descritos a continuación, están explicados en la siguiente publicación:



**Merle I, Villarreyna-Acuña R, Ribeyre F, Roupsard O, Cilas C, Avelino J, 2020. Microclimate estimation under different coffee-based agroforestry systems using full sun weather data and shade trees characteristics. Agroforestry Systems. Submitted.**

Considerando que **TMin<sub>s</sub>** y **TMax<sub>s</sub>** son, respectivamente, las temperaturas mínimas y máximas bajo sombra, y que **TMin<sub>E</sub>** y **TMax<sub>E</sub>** son, respectivamente, las temperaturas mínimas y máximas de la estación meteorológica ubicada al sol, se tienen las relaciones siguientes (algunas dependen de la altura y de la regularidad de la cobertura de la sombra):

$$\text{TMin}_s = 1.23 + 0.94 * \text{TMin}_E$$

(modelo 5)

$$\text{TMax}_s = 6.56 + 0.77 * \text{TMax}_E$$

Arboles < 7m de altura

(modelo 6-1)

$$\text{TMax}_s = 5.18 + 0.77 * \text{TMax}_E$$

Arboles ≥ 7m de altura y Cobertura de la sombra Irregular

(modelo 6-2)

$$\text{TMax}_s = 4.23 + 0.77 * \text{TMax}_E$$

Arboles ≥ 7m de altura y Cobertura de la sombra Regular

(modelo 6-3)

Para tener pronósticos de roya más ajustados a las condiciones de la sombra presente en las parcelas, se transformarán los datos de temperatura de las estaciones meteorológicas ubicadas al sol utilizando los modelos 5, 6-1, 6-2 y 6-3, antes de hacer los pronósticos con los modelos 1, 2, 3 y 4.