

# Descripción del modelo conceptual **MiRoya**



Contacto: Pierre Bommel ([bommel@cirad.fr](mailto:bommel@cirad.fr))

## ***Autores que han participado en el diseño de este modelo***

En el marco del proyecto PROCAGICA, el diseño de este modelo requirió un largo trabajo en el que participaron varias personas:

- Jacques Avelino, CIRAD - CATIE
- Edwin Treminio, CATIE
- Pierre Bommel, CIRAD - CATIE
- Grégoire Leclerc, CIRAD - CATIE
- Natacha Motisi, CIRAD - CATIE
- Isabelle Merle, CIRAD - CATIE
- Rémi VEZY, CIRAD

Este trabajo se basa también en el conocimiento de expertos referenciado en numerosos artículos científicos.

### Plano

|  |          |
|--|----------|
| <b>Autores que han participado en el diseño de este modelo</b> | <b>1</b> |
| <b>Objetivo de MiRoya</b>                                      | <b>2</b> |
| <b>Estructura del modelo</b>                                   | <b>3</b> |
| Dinámicas del modelo   | 5        |
| Tiempo   | 5        |
| Ciclo de vida de la roya                                       | 6        |
| Lixiviación  | 8        |
| Contaminación  | 8        |
| Auto-infección por la misma hoja                               | 8        |
| Alo-infección por las hojas vecinas del mismo árbol            | 8        |
| Alo-infección externa por viento                               | 9        |
| Germinación  | 9        |
| Penetración  | 9        |
| Período de latencia y de esporulación                          | 9        |
| Esporulación   | 10       |
| Duración de la lesión esporulante                              | 10       |

|   |           |
|---|-----------|
| Mortalidad por alta temperatura                         | 10        |
| Dinamica del Cafeto                                     | 10        |
| Caída de la hoja por la roya (relación estadística)     | 11        |
| <b>Implementación del modelo</b>                        | <b>12</b> |
| <b>Anexo: Parámetros y salidas de DynaCof</b>           | <b>14</b> |
| <b>Anexo: Dinamica del Cafeto en MiRoya sin Dynacof</b> | <b>15</b> |
| Diagrama de actividad del cafeto                        | 16        |
| Fenología del cafeto                                    | 18        |
| Regeneración de hojas                                   | 20        |
| Caída de las hojas                                      | 20        |
| Caída de hojas viejas                                   | 20        |
| Caída de hojas por cosecha                              | 20        |
| Caída de hojas por roya                                 | 20        |
| Acciones de la fungicida                                | 21        |
| Clima local   | 22        |

## Objetivo de MiRoya

El primer objetivo del modelo *MiRoya* es de integrar y probar informaciones científicas y de expertos en un modelo de simulación, para:

- Comprender los mecanismos biofísicos
- Jerarquizar los parámetros que influyen en las epidemias de roya
- Compartir conocimientos,
- Probar hipótesis,
- Probar diferentes medios de control de la roya y
- Consolidar una Red Regional de Gestión de Riesgos en Café (RR-GRC)

El modelo también sirve como simulador interactivo multijugador (Simulacro) para armonizar los niveles de alerta. Para apoyar la organización de juegos serios, este simulador busca promover debates sobre los aspectos socio-económicos de la producción de café en un contexto de crisis de la roya.

Basado en un modelo del ciclo de vida de la roya y de los cafetos, este modelo simula la producción de café según las condiciones climáticas, las enfermedades debidas a la roya y los tratamientos aplicados por los agentes productores.

Dirigido a técnicos y gerentes de institutos cafeteros, el objetivo de este juego es doble: 1°) Facilitar la armonización de las alertas y de las acciones al nivel institucional; 2°) Generar recomendaciones efectivas y oportunas para los pequeños productores con recursos financieros limitados.

Al señalar la importancia de la comunicación entre los países, este modelo también tiene como objetivo estructurar una red regional de institutos meteorológicos y agronómicos. A fin de encontrar estrategias de prevención y control adaptables, también es necesario que los países intercambien información sobre los niveles de gravedad de la roya.

## Estructura del modelo

El modelo conceptual se representa como en forma simple :

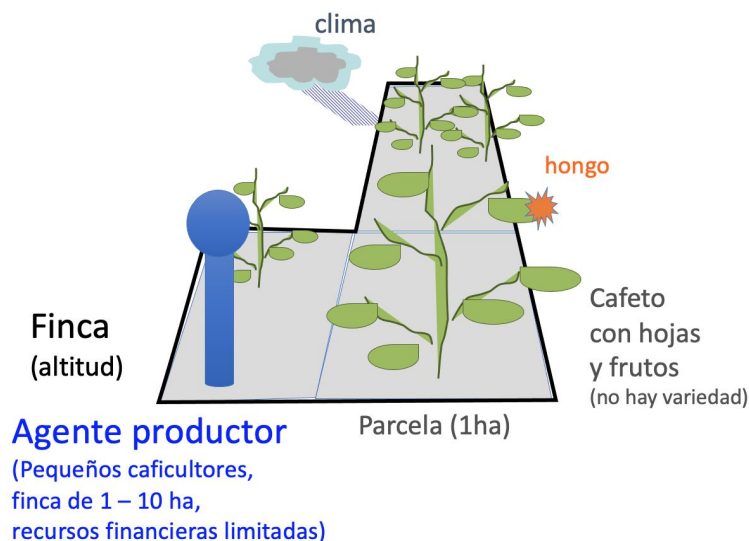


Fig. 1: Representación esquemática del modelo conceptual

Un pequeño caficultor maneja una finca de cafetos afectados por un clima local pero también por la roya. El diagrama de clase siguiente muestra la estructura del modelo (las entidades, sus atributos y relaciones):

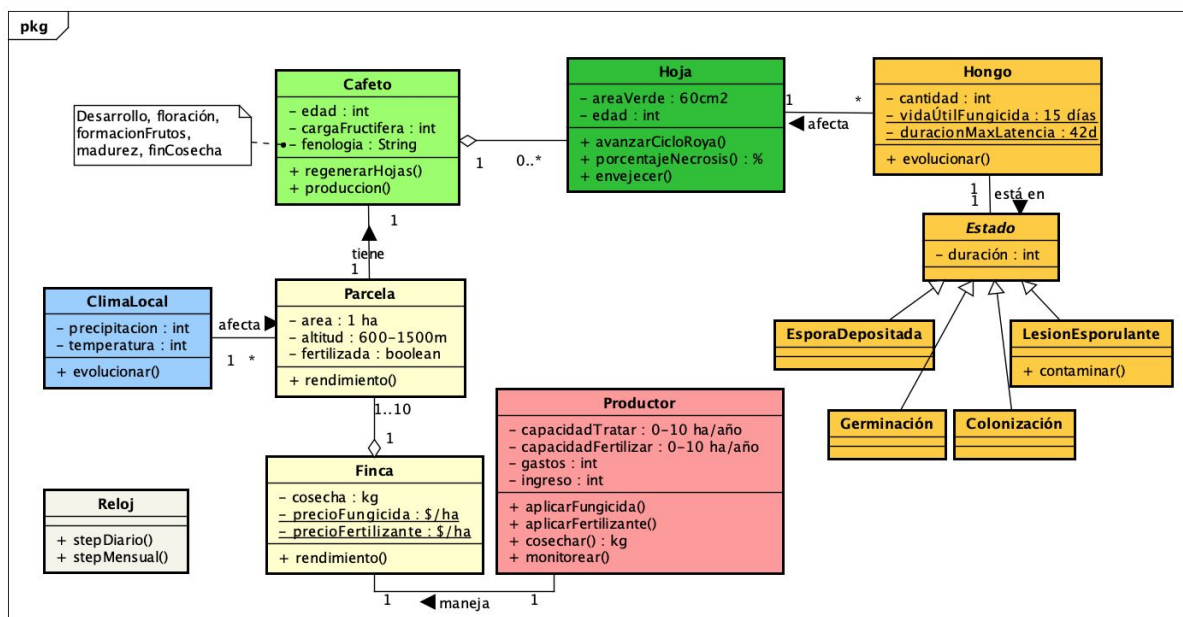


Fig. 2: Diagrama de clase UML del modelo conceptual

Un productor maneja una finca compuesta por parcelas afectadas por un clima local. En una parcela hay un cafeto, que representa un grupo de cafetos. Contiene hojas cuyo número puede fluctuar con el tiempo. En el momento de la cosecha, produce frutos. Cada hoja es susceptible de ser infectada por la roya. Se encuentra primero en forma de esporas depositadas. Si las condiciones lo permiten, las esporas germinan y penetran en la hoja para convertirse en lesiones. Tras un periodo de latencia, las lesiones se convierten en lesiones esporulantes que emiten esporas.

Ya que en realidad hay millones de esporas liberadas en un momento dado, es imposible implementar tal modelo de manera computarizada. Los 4 posibles estados del hongo de la roya se describen, por lo tanto, mediante 4 atributos definidos a nivel de cada hoja:

1. *numDeposiciones*: un número de esporas depositadas en una hoja,

2. *numGerminaciones*: un número de esporas germinadas en una hoja,
3. *numColonizaciones*: un vector de números de lesiones no esporulantes en una hoja,
4. *numPustulas*: un vector de números de lesiones esporulantes en una hoja.

Entonces, en vez de manipular objetos (instancias de Hongos), hay 4 variables: 2 variables simples (números enteros) y 2 tablas numéricas. Las tablas (o vectores) representan el número de lesiones y sus edades (de maximum 42 o 78 días). La evolución y el envejecimiento de cada lesión se simula de la siguiente manera: cada lesión avanza de 1 hasta 3 steps cada día, en función de las condiciones climáticas. Significa que una lesión no esporulante puede estar en este estado de 14 días (en el mejor caso) hasta 42 días (en el peor caso climático). (Hongo *duracionMaxLatencia* = 42 días). El mismo procedimiento se aplica a las lesiones esporulantes :

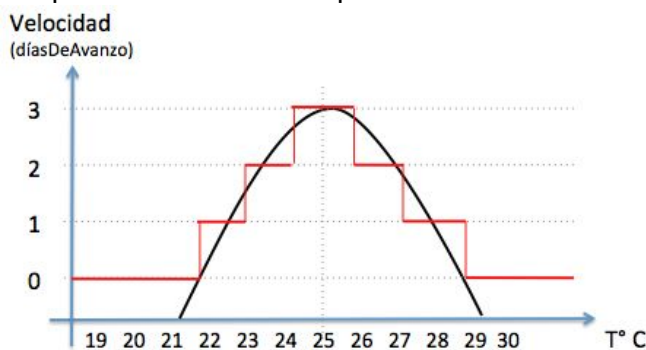


Fig. 3: Tasa de envejecimiento de una lesión en función de la temperatura

si  $21.39233 < T < 23.16103 \Rightarrow 3$  steps  
 si  $23.16103 < T < 24.92972 \Rightarrow 2$  steps  
 si  $24.92972 < T < 26.69842 \Rightarrow 1$  step, si no  $\Rightarrow 0$

Por consiguiente, el modelo conceptual adecuado para la aplicación es el siguiente:

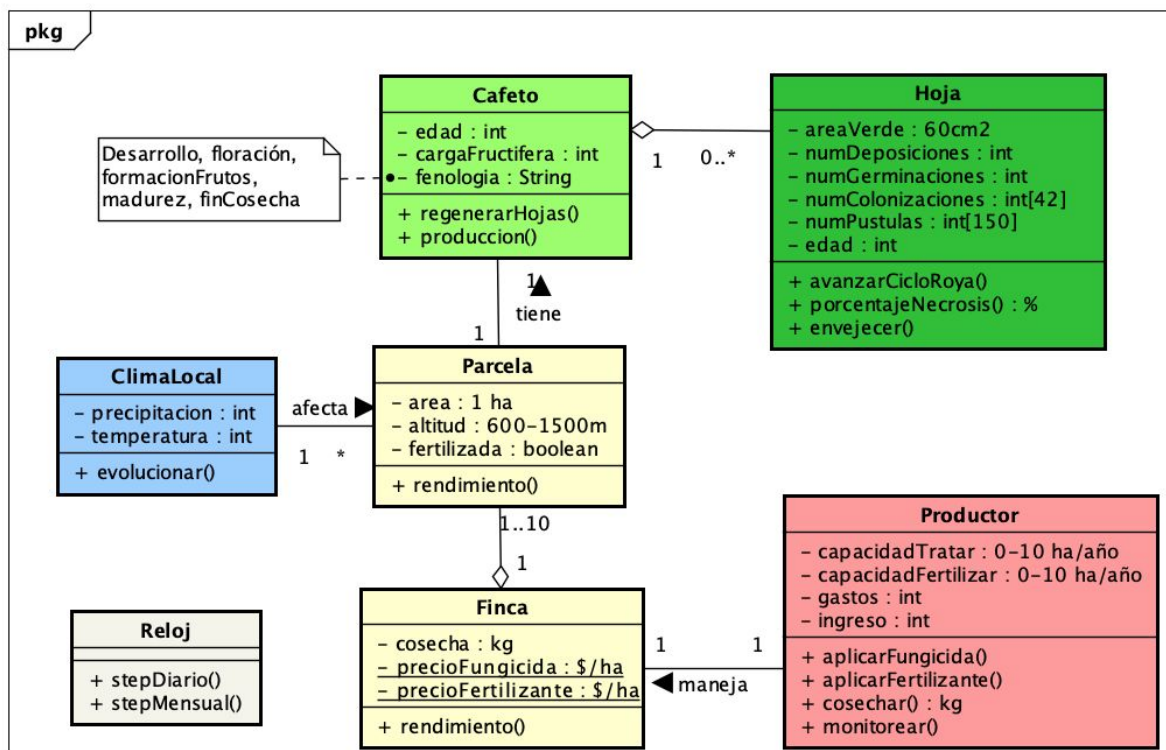


Fig. 4: Diagrama de clase UML del modelo implementado

# Dinámicas del modelo

## Tiempo

En la versión actual, el paso de tiempo (step) es igual a **una semana** (stepSemanal). Pero de hecho, la granularidad mínima es el día (stepDiario). Por lo tanto, el paso semanal ejecuta 7 veces un paso diario.

Este diagrama de secuencia representa la activación de la roya diariamente:

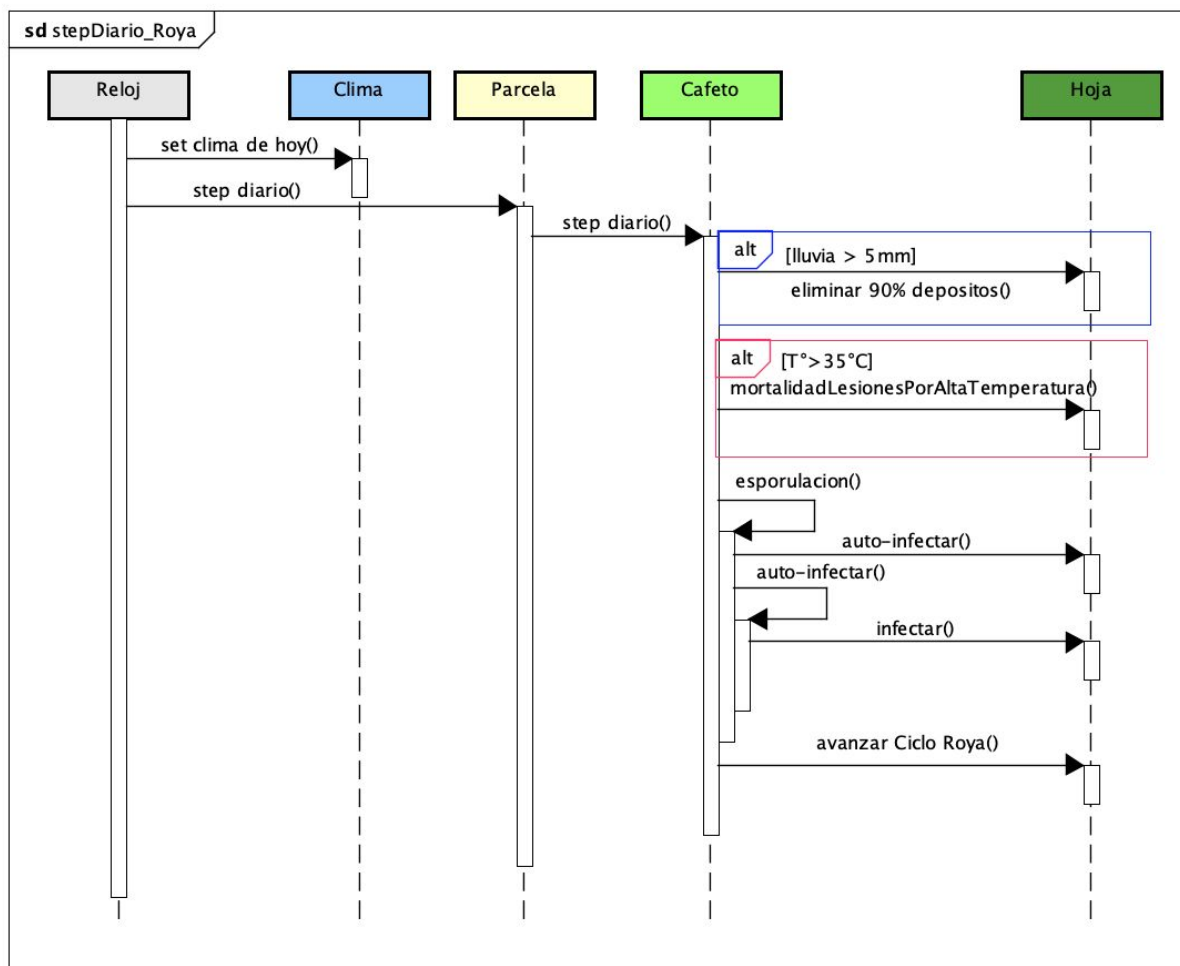


Fig. 5: Diagrama de secuencia UML del modelo (step diario) para la activación de la roya.

Este diagrama muestra que cada día la lluvia puede lavar las esporas depositadas en las hojas (si la precipitación es superior a 5mm), luego las altas temperaturas ( $> 35^{\circ}\text{C}$ ) eliminan algunas de las lesiones, las lesiones esporulantes infectan las hojas donde se encuentran (auto-infección) y las otras hojas del cafeto, y finalmente se ejecuta el ciclo de vida de la roya (para avanzar en las etapas de las esporas).

## Ciclo de vida de la roya

El siguiente diagrama de estado-transición (UML) representa el ciclo de vida de la Roya. Los 4 estados son: Espora depositada (en una hoja), Espora Germinada (con su apresorium), Lesión no Esporulante (llamada “Colonización”) y Lesión Esporulante (llamada “Pustula”). Estos dos últimos estados se encuentran dentro de la hoja.

El cambio de estado (la transición) se activa por un evento. En la mayoría de los casos, estas transiciones son activadas por eventos climáticos.

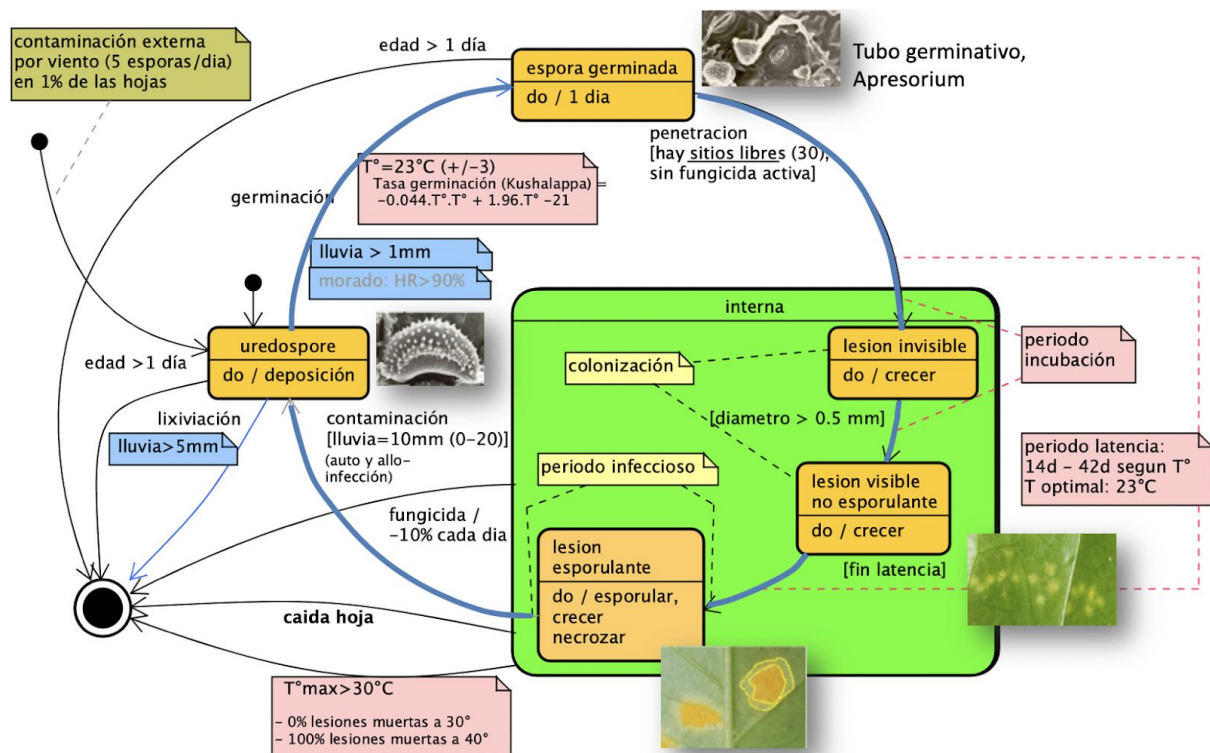


Fig. 6: Diagrama de estado-transición UML del ciclo de la roya

Como se explicó anteriormente, no hay instancias de Hongos, pero hay 4 variables: *numDeposiciones*, *numGerminaciones*, *numColonizaciones* y *numPustulas*. La traducción del diagrama de estado-transición en implementación de la roya se explica de acuerdo con el siguiente esquema:

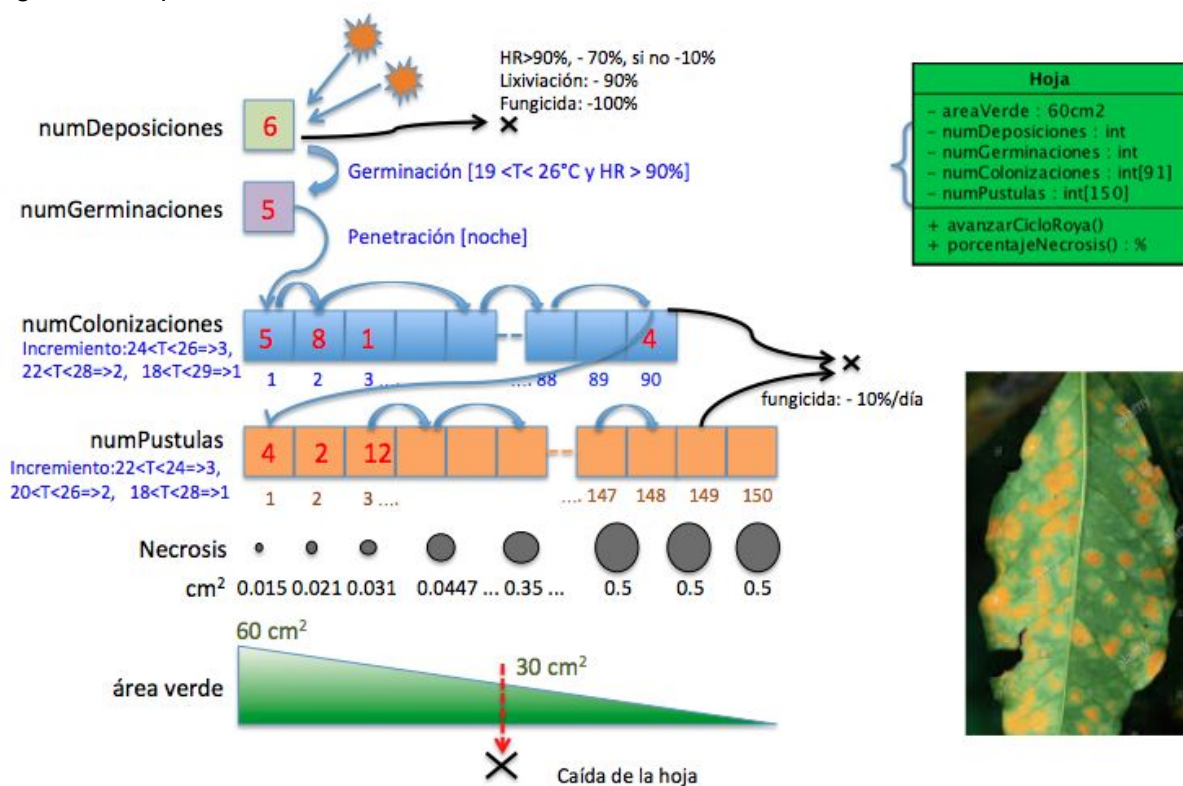


Fig. 7: La evolución de la roya sobre y dentro de la hoja



Todas las esporas que se depositan en una hoja son representadas por un número: *numDeposiciones*. Cuando las condiciones climáticas lo permiten, una parte de estas esporas van a germinar. En este caso, el valor de *numDeposiciones* se reduce a favor de la variable *numGerminaciones*. Si las condiciones lo permiten, el contenido de la variable *numGerminaciones* se transfiere y se acumula a la primera célula del vector *numColonizaciones*. En función del clima, se calcula un índice de crecimiento de las colonias. Este índice (llamado *diasDeAvanzo*) permite avanzar cada elemento del vector de 1 a 3 casillas dependiendo del clima: 3 *diasDeAvanzo* cuando la temperatura está cerca de un óptimo (23°C); 2, 1 o 0 cuanto más lejos del óptimo (cf. Fig. 3).

En siguiente, la lista de los eventos presentados en el ciclo de vida (Fig. 6) se detallan.

### Lixiviación

En la versión actual, se considera solamente sistema sin sombra.

Cuando hay mucha lluvia (parámetro Cafeto *umbralLixiviacion* = 5 mm/día), se elimina 90% de las esporas depositadas en todas las hojas (parámetro Hongo *perdidasPorLixiviacion* = 0.9).

### Contaminación

Las esporas depositadas en una hoja provienen de 3 fuentes de infección: la auto-infección por la misma hoja, la alo-infección del mismo árbol y la alo-infección por viento.

#### *Auto-infección por la misma hoja*

Una hoja con lesiones esporulantes se auto-infecta. Se considera 58000 esporas emitidas por cm<sup>2</sup> de lesión esporulante (Merle et al. 2019). La mitad de la superficie de una lesión es efectivamente esporulante. Por otro lado, el 35% de las esporas liberadas son viables.

Además, el 1% se deposita efectivamente en el envés de la hoja (las esporas germinadas penetran a través de los estomas de la hoja, que sólo están en la parte interna). Entonces, 1 cm<sup>2</sup> de lesión esporulante puede depositar hasta 200 esporas :

$$\text{número de esporas depositadas / cm}^2 \text{ de lesión} = 58000 * 0.35 * 0.01 = 200.$$

Además, los depósitos también dependen de la lluvia. Si la precipitación del día es mayor a 20 mm, las esporas son eliminadas. Entre 10 y 20 mm de precipitación, la proporción de depósito es óptima a 10 mm de la precipitación y es cero a 0 y 20 mm. Entre estos valores se aplica una relación lineal.

Teniendo en cuenta estos conceptos, el número de esporas depositadas y susceptibles de infectar la hoja se calcula de forma estocástica como sigue:

$$\text{número de esporas depositadas} = \text{random entre: 1 y:} \\ (\text{proporción\_por\_luvia} \times 200 \times \text{area de pustulas}).$$

#### *Alo-infección por las hojas vecinas del mismo árbol*

Para la propagación de las esporas de una hoja a otra del árbol, se utilizó una ley de probabilidad de La Place. Bullock et al., (2006)<sup>1</sup> explican que “El Laplace resulta de los propágulos que se mueven aleatoriamente y tienen una cierta probabilidad de asentamiento

---

<sup>1</sup> Bullock, J. M., Shea, K., & Skarpaas, O. (2006). Measuring plant dispersal: an introduction to field methods and experimental design. *Plant Ecology*, 186(2), 217-234.

por unidad de tiempo. [...] Estas funciones de densidad de probabilidad describen la densidad de los propágulos a una distancia x de una fuente” :

$$P(x) = \text{coef\_LaPlace} \cdot 1/2b \cdot \exp(-|x-a|/b)$$

con  $b = 2$ ,  $a = 0$ ,  $\text{coef\_LaPlace} = 0.125$ , obtenemos las siguientes probabilidades:

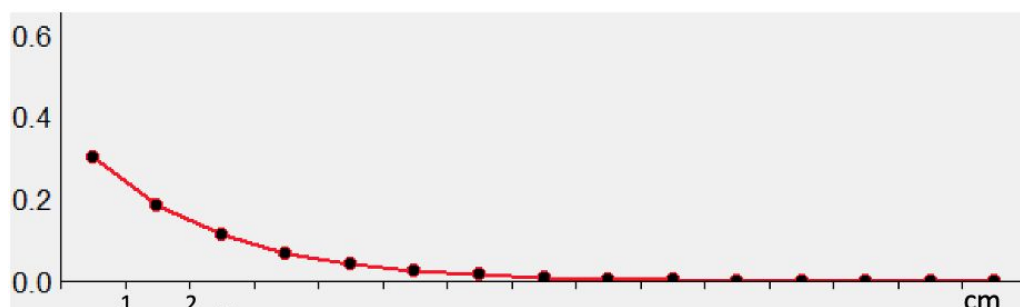


Fig. 8: Ley de probabilidad de La Place

Esta probabilidad también se multiplica por la proporción debida a la lluvia, misma proporción del cálculo utilizado anteriormente, con un depósito óptimo a 10 mm de la precipitación.

#### *Alo-infección externa por viento*

Además de estos dos procesos, cada día, hay 10% de chance (Hongo  $\text{probaInfeccionViento} = 10\%$ ) que 1% (Hongo  $\text{proporcionHojasViento}$ ) de las hojas (seleccionadas al azar) reciben 5 esporas del exterior (Hongo  $\text{numDeposicionPorHoja} = 5$ ). Esto representa el ruido de fondo difuso de las esporas en el aire.

#### Germinación

En el laboratorio, la viabilidad de las esporas es muy baja después de 15 días de almacenamiento. En condiciones naturales, este tiempo se reduce aún más. Una vez depositada, la espora tiene muy poco tiempo para germinar y penetrar. Si las condiciones son húmedas, lo hace en 48 horas, siempre que haya agua abierta. Si las condiciones no son buenas para la germinación y la penetración (es decir, menos de 6 horas de humedad), la espora comienza a germinar pero no completa el proceso y se muere.

Según Kushalappa, el porcentaje de germinación es una función cuadrática de la temperatura (T):

$$\% \text{ germinacion} = a.T^2 + b.T + c = -0.044087.T^2 + 1.964224.T - 21.016217$$

Para tener en cuenta la humedad, consideramos que esta ecuación sólo es aplicable si la precipitación es superior a 1 mm.

#### Penetración

La penetración dura de 1 a 5 horas en la noche, pero no todas las esporas germinadas pueden entrar. Sólo se dispone de 30 sitios de infección por hoja. Entonces la integración de nuevas lesiones en la hoja se limita al número de sitios disponibles, sabiendo que cada lesión (no esporulante y esporulante) ocupa 1 sitio.

#### Período de latencia y de esporulación

Como se explicó anteriormente, en función del clima, se calcula un índice de crecimiento de las colonias. Este índice (llamado *díasDeAvanzo*) permite avanzar cada elemento del vector



de 1 a 3 casillas dependiendo del clima: 3 *díasDeAvanzo* cuando la temperatura está cerca de un óptimo (23°C); 2, 1 o 0 cuanto más lejos del óptimo (cf. Fig. 3).

### Esporulación

Para salir del estado “no esporulante” al estado “esporulante” (o pústula), las lesiones tienen que esperar entre 14 hasta 42 días de acuerdo con las condiciones climáticas. Durante este período, ellas no afectan la hoja (no es el caso en realidad).

A 23°C (temperatura ideal), cada lesión salta 3 días de avance. Con esta temperatura, necesita de 14 días para entrar en el estado pústula. Cuando la temperatura es menor de 18°C o mayor de 28°C, necesita de 42 días para convertirse en pústula.

Una hoja que contenga una o más lesiones esporulantes puede autoinfectarse e infectar otras hojas del cafeto (como se describe en el párrafo anterior “Contaminación”).

### Duración de la lesión esporulante

El proceso de avanzar en los días de lesión esporulante es parecido a lo de lesión no esporulante, excepto que la duración puede ser más grande (hasta 150 días). Entonces, cuando la temperatura es menor de 18° o mayor de 28°, una lesión esporulante puede vivir hasta 150 días.

### Mortalidad por alta temperatura

El exceso de temperatura mata las lesiones. El modelo considera que una temperatura máxima del aire por encima de los 35°C (*Hongo tempMinMortalidad*) es excesiva. A 40°C durante 4 días, todas las lesiones de una hoja mueren. Entre estas dos temperaturas, la tasa de mortalidad es una función lineal de la temperatura (mortalidad = 0% a 35° - 100% a 40°C) durante 4 días (Ribeiro et al., 1978)<sup>2</sup>.

Como el step es de un día (y no de 4 días), el modelo utiliza la siguiente función (se utiliza la T° máxima del aire):

Si  $t_{Max} \geq 40^\circ$ , eliminar el 75% de las lesiones (*Hongo propMortalidadTmax* = 40°C).

Si  $35 < t_{Max} < 40^\circ$ , entonces eliminar una proporción de las lesiones.

## Dinamica del Cafeto

En su versión anterior, el modelo MiRoya proponía un mecanismo simplista de crecimiento de las hojas (ver el anexo “[Dinamica del Cafeto en MiRoya sin DynaCof](#)”). Pero los análisis mostraron que la dinámica del huésped juega un papel muy importante en el sistema huésped-parásito.

Por esta razón se decidió acoplar MiRoya con un modelo de crecimiento del cafeto de probada eficacia: el modelo DynaCof (Vezy et al., 2019)<sup>3</sup>.

DynACof calcula la Productividad Primaria Neta a escala de parcela, la asignación de Carbono, el crecimiento, el rendimiento, la energía y el balance hídrico del cafeto. El modelo también utiliza cohortes de flores y de frutas para el desarrollo reproductivo a fin de representar mejor la distribución de la demanda de C de las frutas a lo largo del año.

DynACof está basado en la ley del mínimo entre la oferta y la demanda de C, en el siguiente orden:

---

<sup>2</sup> Ribeiro et al. (1978), Efeito de alta temperatura no desenvolvimento de Hemileia Vastatrix em cafee suscetível. Bragantia, Revista Científica do Instituto Agronomico do Estado de São Paulo

<sup>3</sup> Vezy R., le Maire G., Christina M., Georgiou S., Imbach P., Hidalgo H., Alfaro E., Blitz-Frayret C., Charbonnier F., Lehner P., Loustau D. & Rouspard O. (2019). « DynACof: a process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems ». 10.5281/zenodo.3246268.

1. La madera de crecimiento, las ramas y las raíces grandes se alimentan primero.
2. Los botones florales están alimentados. Se iniciaron durante el año anterior (adaptado del modelo Rodriguez et al., 2011), en función de la relación entre los nodos y el **LAI (Leaves Area Index = índice de área foliar)** y la  $T^\circ$ .
3. Frutos: se alimentan según un % de frutos maduros y según el número de botones florales. Los frutos provienen de flores que crecen en cohortes de acuerdo a una función logística.
4. Hojas: producen la oferta de C. (mortalidad y/o regeneración)
5. Raíces finas.
6. El resto de C recarga las reservas. C de reservas contribuye al cálculo de la oferta de C en el siguiente ciclo.

Este modelo incorpora numerosos factores que pueden agruparse en tres partes: el suelo, el café y los árboles de sombra, como se muestra en la siguiente figura :

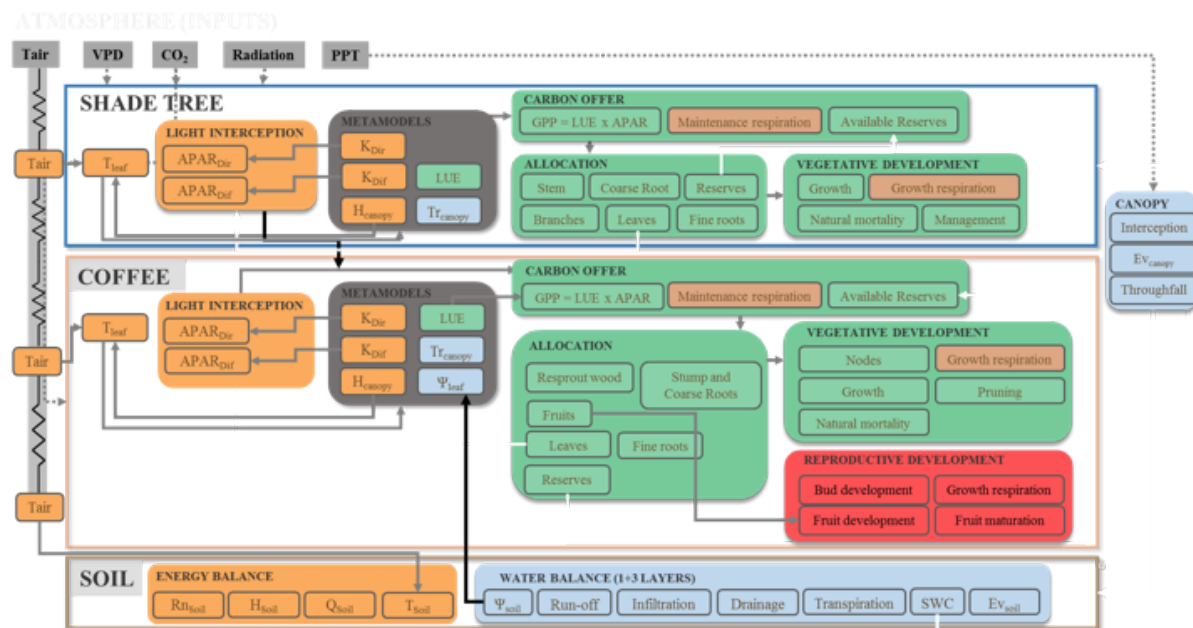


Fig. 9: Organización general de DynaCof

La lista de los parámetros y de las variables de salida de DynaCof está disponible en anexo "[Parámetros y salidas de DynaCof](#)".

Para una descripción más completa del modelo, ver Vezy et al. (2019).

### Caída de la hoja por la roya (relación estadística)

A diferencia de la versión inicial, la actual utiliza una relación estadística para determinar la caída de las hojas por la roya. Esta relación estadística está tomada a partir de las observaciones realizadas por Jacques Avelino (no publicado).

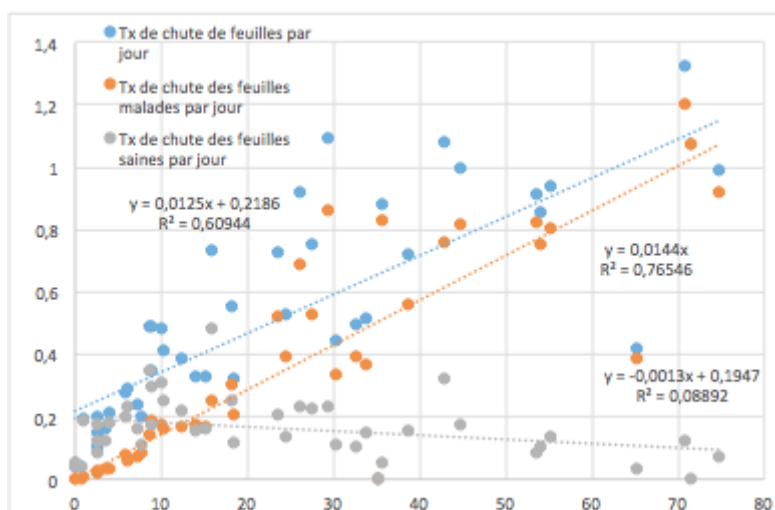


Fig. 10: Relación estadística entre la tasa de caída de las hojas y la incidencia de la roya

Este gráfico muestra el porcentaje de hojas que caen cada día en función de la incidencia de la roya (eje de abscisas). Aquí la incidencia se calcula sobre el número total de lesiones (esporulantes y no esporulantes). Si sólo se consideran las hojas infectadas, se observa una relación lineal

$$y (\% \text{ de hojas que caen/día}) = 0.0144 \times \text{incidencia}$$

Esta ecuación se utiliza para eliminar las hojas con más lesiones esporulantes (si el cafeto no tiene lesiones esporulantes, no se elimina ninguna hoja). Nota que la mortalidad natural de las hojas (así como por poda) está determinada por DynaCof.

## Implementación del modelo

Como anteriormente se explicó, MiRoya-DynaCof se compone de dos submodelos: *MiRoya*, implementado en la plataforma Cormas (<http://cormas.cirad.fr>) y codificado en Smalltalk), y *DynaCof*, implementado en R. Dynacof se encarga del crecimiento de las hojas y MiRoya se encarga del ciclo de vida de la roya y sus efectos en la caída de las hojas.

El paso temporal de Dynacof y MiRoya es el día. Pero como los intercambios entre los dos modelos son lentos, las interacciones ocurren cada semana. Como se describe en la figura 11, un ciclo completo de una semana consta de 6 pasos:

1. R roda 7 días de DynACof qui calcula (entre otras cosas) el crecimiento foliar,
2. R llama Cormas con nuevo valor de LAI (índice de área foliar)
3. MiRoya adapta el número de hojas según LAI
4. Cormas roda 7 días de MiRoya: ciclo de vida de los hongos,
5. MiRoya determina las pérdidas de hojas por roya
6. Cormas retorna un valor de LAI a DynACof. La masa de carbono ( $CM_{leaf} = \text{leaf C mass}$ , en  $g/m^2/d$ ) se modifica calculando la diferencia de LAI en el tiempo  $t$  y en el tiempo  $t - 7$ :

$$CM_{leaf}(t) \leftarrow CM_{leaf}(t) \cdot [LAI(t) - LAI(t-7) / LAI(t-7)]$$

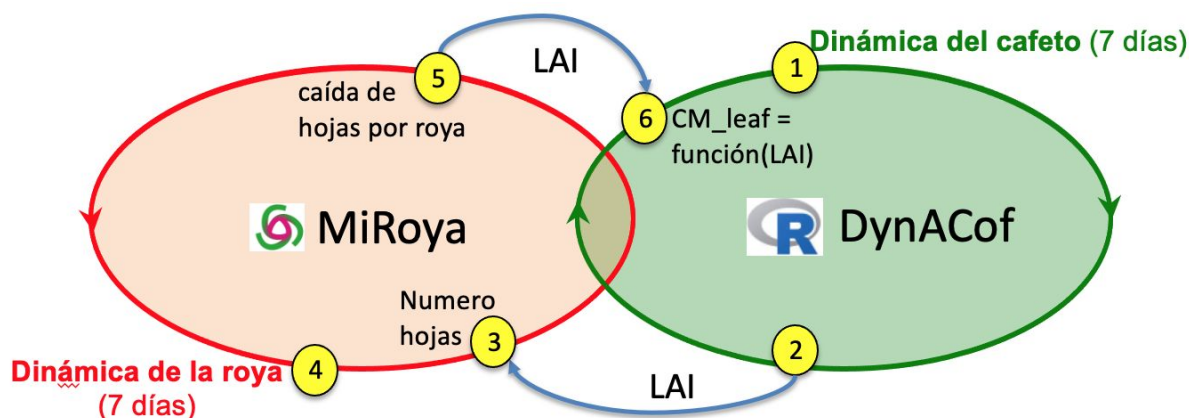


Fig. 11: Acoplamiento de las dinámicas entre DynaCof y MiRoya

De manera más formal, el siguiente diagrama de actividades UML describe la organización de un step semanal completo:

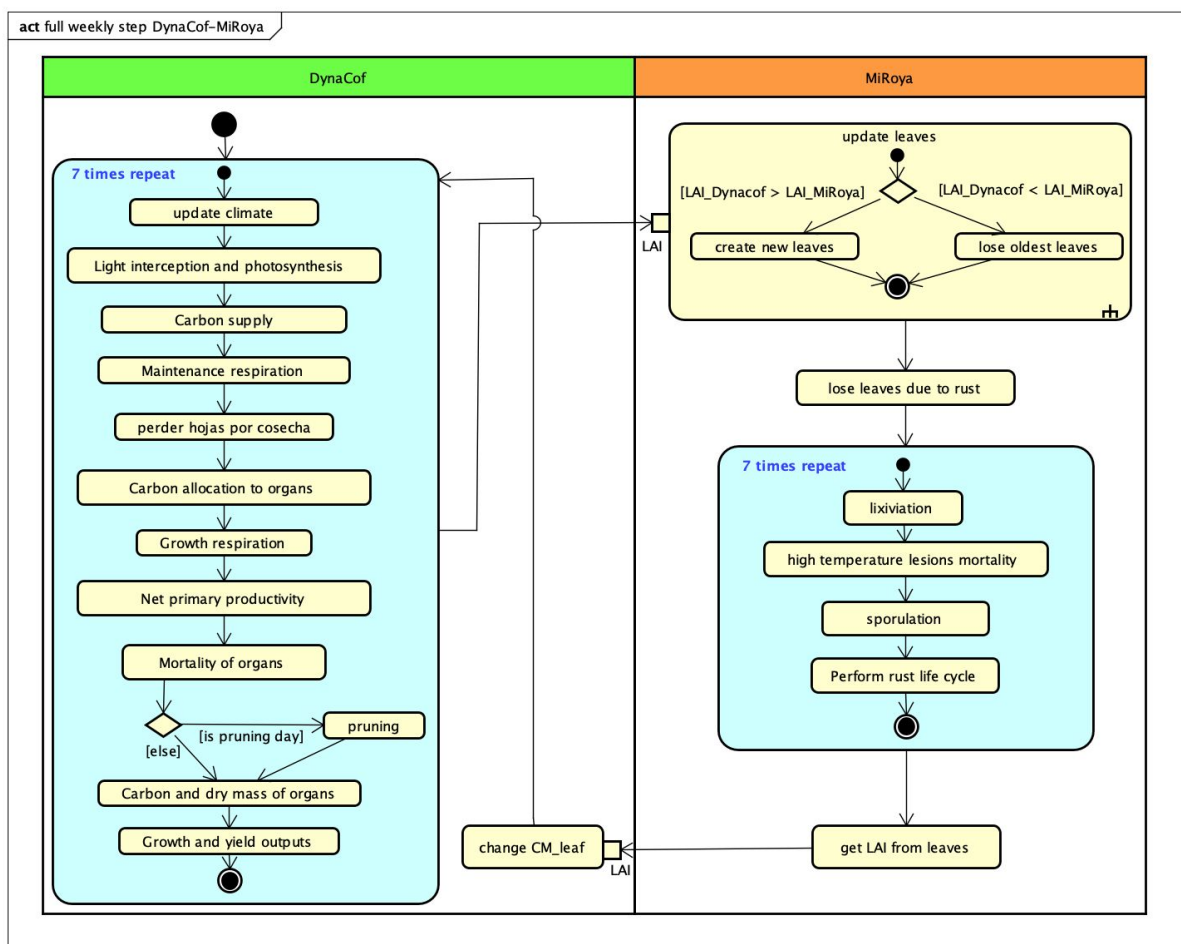


Fig. 12: Diagrama de actividades de un step (1 semana) entre DynaCof y MiRoya

El uso del modelo MiRoya-DynaCof se describe en el documento Guía de usuario del modelo MiRoya.pdf

## Anexo: Parámetros y salidas de DynaCof

Lista de todas las variables de salidas. Instrucción = names(sim\$Sim)

```
> names(S$Sim)
[1] "Cycle"                "Plot_Age"                "Plot_Age_num"
[4] "LAI"                  "LAIplot"                 "CM_Shoot"
[7] "CM_FRoot"             "Harvest_Maturity"       "SM"
[10] "CM_Fruit"             "Demand_Fruit"           "CM_SCR"
[13] "Rm"                   "CM_RE"                   "CM_Leaf"
[16] "SC"                   "Maturation_duration"

"CM_Fruit_Cohort_remain"
[19] "CM_Fruit_Cohort"      "NPP_Fruit_Cohort"       "Alloc_Fruit_Cohort"
[22] "BudBreak_cohort"     "Bud_available"          "BudBreak"
[25] "Budinit"             "pbreak"                 "DegreeDays_Tcan"
[28] "Mprun_Shoot"         "Mnat_SCR"               "Mact_SCR"
[31] "DM_RE"               "DM_Fruit_Cohort"        "DM_SCR"
[34] "DM_Fruit"            "DM_Shoot"               "DM_FRoot"
[37] "DM_Leaf"             "Temp_cor_Bud"           "Cbalance"
[40] "NPP"                 "Ra"                     "Rg"
[43] "Rm_FRoot"            "Mortality_FRoot"        "Mprun_FRoot"
[46] "Mnat_FRoot"          "Rg_FRoot"               "NPP_FRoot"
[49] "Alloc_FRoot"         "Supply_FRoot"           "Demand_FRoot"
[52] "Rm_Leaf"             "Mortality_Leaf"         "Mprun_Leaf"
[55] "MnatALS_Leaf"        "M ALS"                  "Mnat_Leaf"
[58] "Rg_Leaf"             "NPP_Leaf"               "Alloc_Leaf"
[61] "Supply_Leaf"         "Rm_Fruit"               "Harvest_Fruit"
[64] "Rg_Fruit"            "NPP_Fruit"              "Overripped_Fruit"
[67] "Alloc_Fruit"         "Supply_Fruit"           "ratioNodestoLAI"
[70] "Harvest_Maturity_Pot" "Mortality_SCR"          "Rm_SCR"
[73] "Rg_SCR"              "NPP_SCR"                "Alloc_SCR"
[76] "lambdaSCRage"        "Rm_Shoot"               "Mortality_Shoot"
[79] "Mnat_Shoot"          "Rg_Shoot"               "NPP_Shoot"
[82] "Alloc_Shoot"         "Carbon_Lack_Mortality"  "Supply"
[85] "Consumption_RE"     "K_Dir"                  "K_Dif"
[88] "GPP"                 "lue"                    "NPP_RE"
[91] "Tcan_Diurnal_Cof_deg" "BudInitPeriod"          "Date_harvest"
[94] "Rn_tot"              "Rn_Soil_SW"             "LE_Coffee"
[97] "Rn_Coffee"           "H_Coffee"               "SWD"
[100] "ETR"                 "RootWaterExtract_3"     "RootWaterExtract_2"
[103] "RootWaterExtract_1"  "T_tot"                  "T_Coffee"
[106] "IntercMax"           "AEu"                    "PSIL"
[109] "SoilWaterPot"        "PAR_Trans"              "PAR_Trans_Tree"
[112] "PAR_Soil"            "APAR"                   "APAR_Dif"
[115] "TairCanopy"          "WindSpeed_Coffee"       "TSoil"
[118] "Tleaf_Coffee"        "Diff_T"                 "LE_tot"
[121] "H_tot"               "LE_Tree"                "Rn_Soil"
[124] "Q_Soil"              "H_Soil"                  "LE_Soil"
[127] "LE_Plot"             "E_Soil"                  "REW_tot"
[130] "EW_tot"              "REW_3"                   "EW_3"
[133] "REW_2"               "EW_2"                    "REW_1"
[136] "EW_1"                "Drain_3"                 "Drain_2"
[139] "Drain_1"             "Infiltration"            "InfilCapa"
[142] "TotSuperficialRunoff" "SuperficialRunoff"       "ExcessRunoff"
[145] "IntercRevapor"       "Throughfall"             "W_1"
[148] "W_2"                 "W_3"                     "W_tot"
[151] "CanopyHumect"        "WSurfaceRes"             "Height_Tree"
[154] "H_Tree"              "Rn_Tree"                 "T_Tree"
[157] "APAR_Tree"           "LAI_Tree"                "TairCanopy_Tree"
[160] "Stocking_Tree"       "Height_Canopy"           "ALS"
[163] "Date"
```

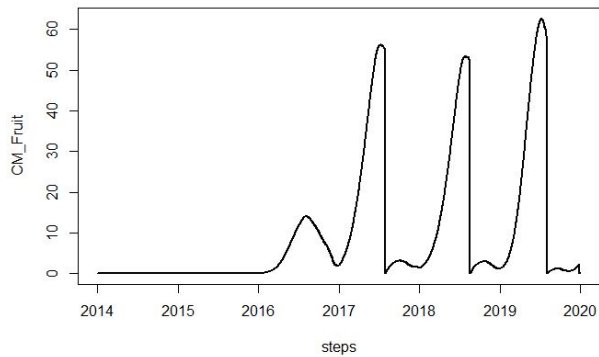
La descripción de las variables se encuentra en el archivo 2-main.R :

<https://github.com/VEZY/DynACof/blob/master/R/2-main.R>

|       |                  |  |
|-------|------------------|--|
| CM_x  | \tab gC m-2 d-1  | \tab Organ C mass                      |
| NPP_x | \tab gC m-2 d-1  | \tab Net primary productivity at organ |
| scale |                  |  |
| DM_x  | \tab gDM m-2 d-1 | \tab Organ dry mass                    |

Así, para trazar la variable CM\_Fruit (C mass of Fruits, in gC m-2 d-1) :

```
var <- "CM_Fruit"
plot(S2[["Sim"]][[var]]~ S2$Meteo$Date,
type="l",col="black",lwd=2,xlab="steps",ylab=var)
```



## ***Anexo: Dinamica del Cafeto en MiRoya sin Dynacof***

En la versión actual, no se tiene en cuenta el crecimiento del cafeto. Sólo se consideran los cafetos adultos. Sólo se tiene en cuenta la generación (y caída) de hojas y frutos.



## Diagrama de actividad del cafeto

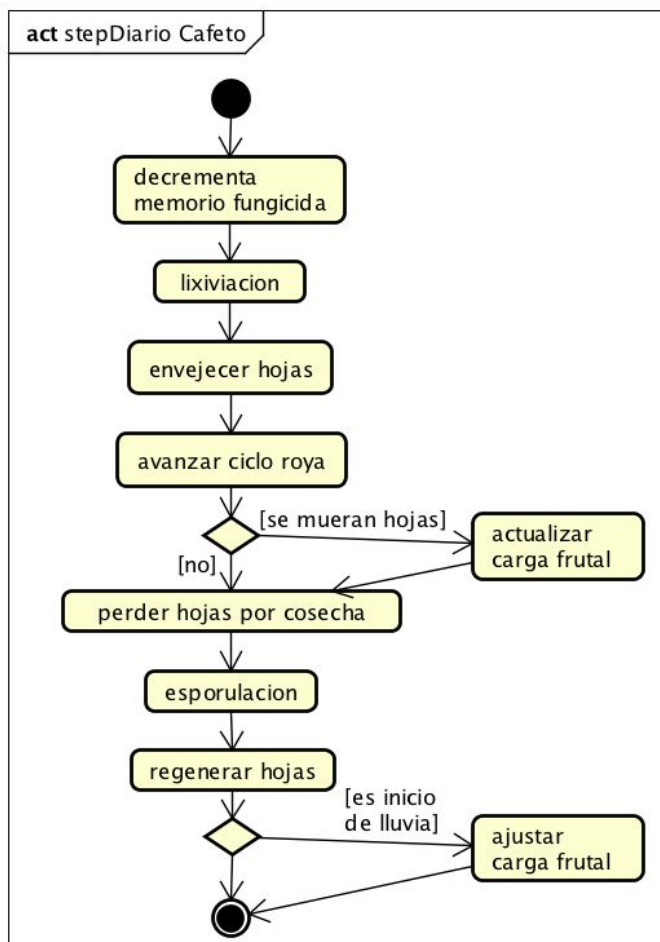
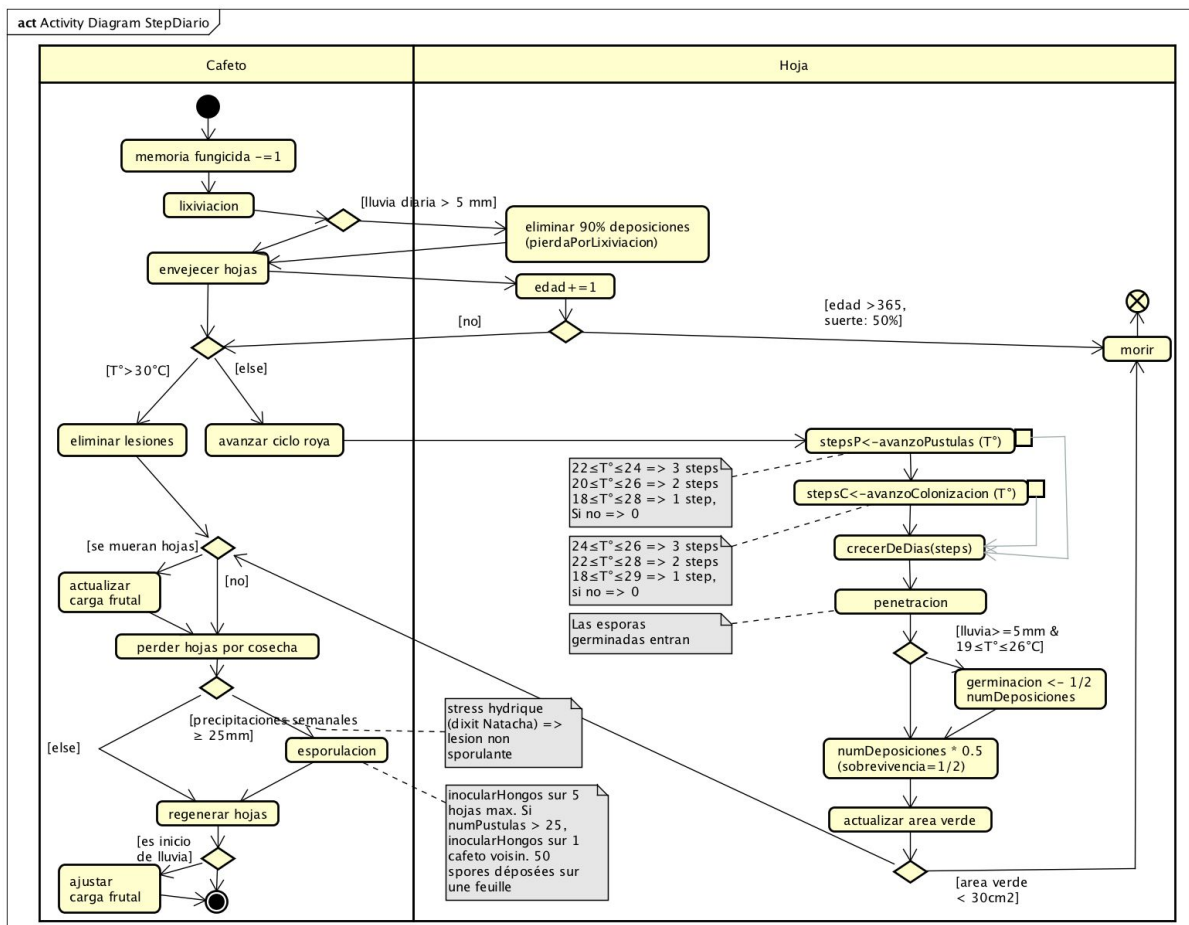


Fig. 12: Diagrama de actividad del cafeto



powered by Astah

Fig. 13: Diagrama de actividad del cafeto y hoja (swimlanes)

## Fenología del cafeto

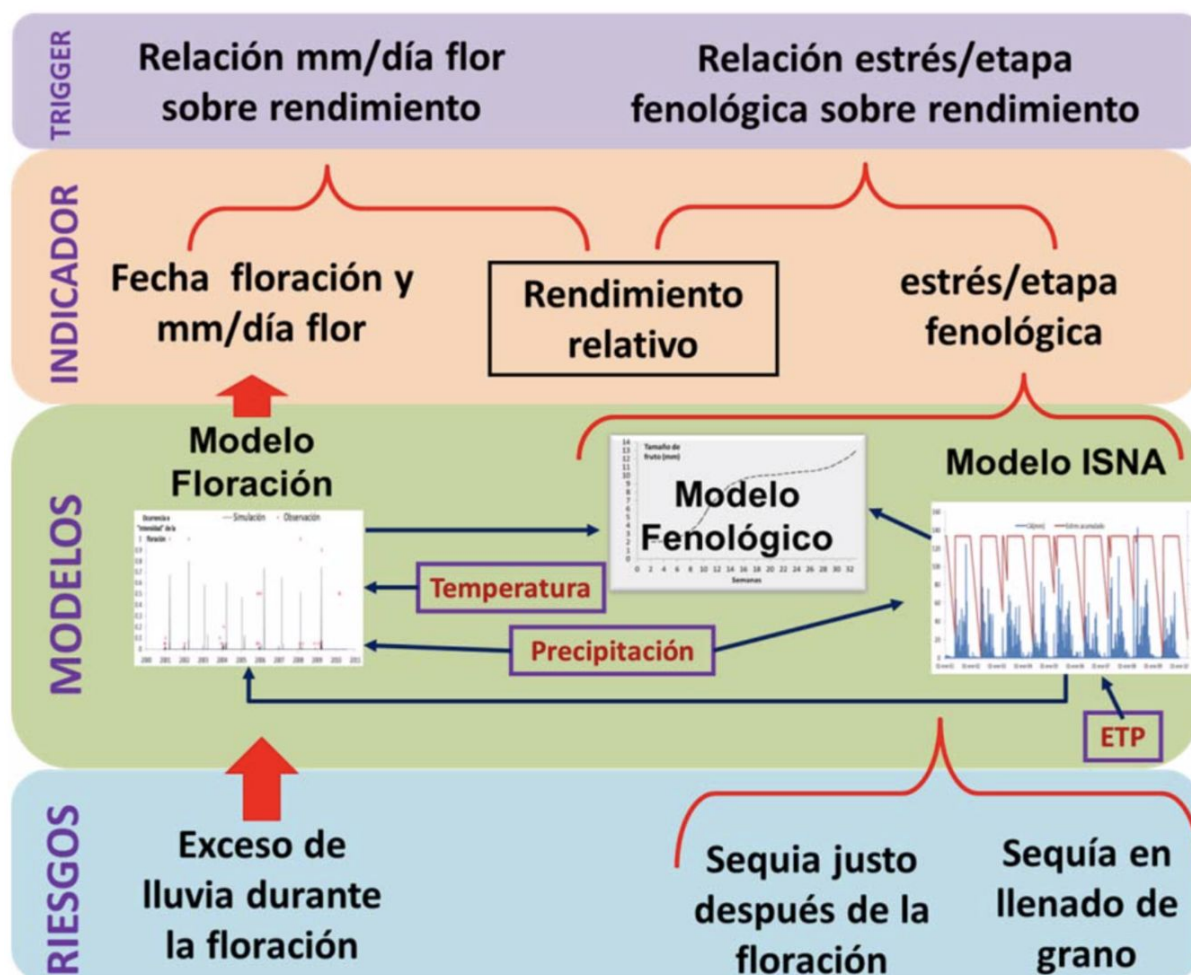
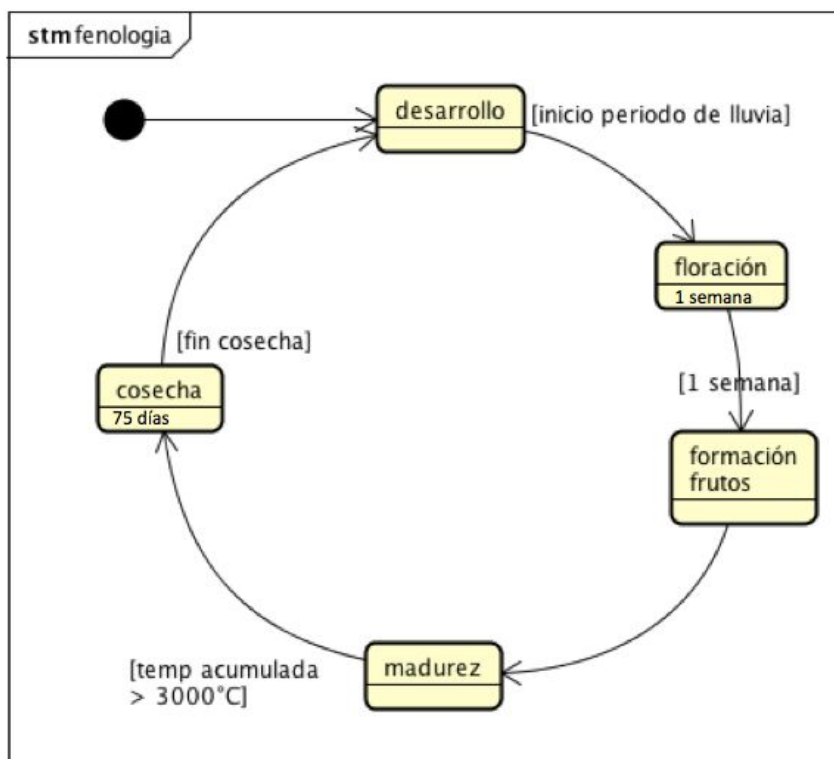


Fig 14: From: Leonel Lara, Bruno Rapidel, Dietmar Stoian, Jessenia Argüello, Thelma Gaitán, Claudia González, 2011. Estudio de factibilidad para la implementación de seguros basados en Índices climáticos en el cultivo de café en Honduras y Nicaragua. Technical Report · May 2011 DOI: 10.13140/RG.2.1.3976.9364

En el modelo, hay 4 estados:

- Floración: durante la primera semana de lluvia. La carga frutal maximal es calculada a este momento (a partir de la área verde del cafeto)
- Madurez: se acumula la temperatura (el  $\Delta T^\circ = T^\circ - 10^\circ\text{C}$ ) hasta la madurez
- Cosecha = cuando  $\text{temperaturaAcumulada} > \text{umbralMadurez}$  ( $3000^\circ\text{C}$ )
- Desarrollo: de la cosecha hasta la floración.



*Fig. 15. Dinámica de la fenología*

En la primera versión, el estado era un atributo del Cafeto. Pero hoy en día, el estado es un atributo de cada hoja porque dependiendo de las localidades y climas, un cafeto puede tener varios estados al mismo tiempo (frutos maduros y flores nuevas) ! Las flores aparecen en los nodos donde las hojas están en estado de desarrollo.

En el momento de la cosecha, sólo las hojas maduras con temperaturaAcumulada > 3000° se consideran "fructíferas", lo que da un porcentaje de la cosecha en relación con un óptimo (100 frutos). Ejemplo de El Salvador :

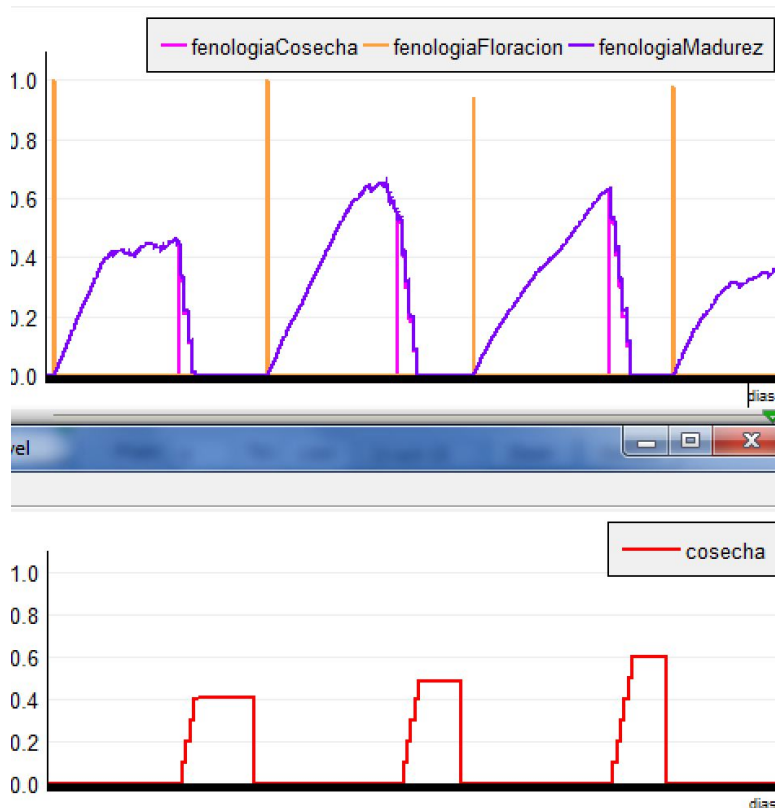


Fig. 16. Dinámica de la fenología y de la cosecha en 3 años de simulación

## Regeneración de hojas

Cuando las precipitaciones semanales son mayores de 50 mm, entonces se generan 20 hojas nuevas.

Entre 20 y 50 mm/semana, se generan 10 hojas.

De lo contrario, sólo se crean 5 hojas por mes.

## Caída de las hojas

### Caída de hojas viejas

La esperanza de vida de una hoja es de 450 días. Más allá de eso, cada hoja tiene un 50% de posibilidades de morir.

### Caída de hojas por cosecha

Cada árbol pierde hojas solamente durante el periodo de la cosecha (oct - dic): 10 hojas / mes.

### Caída de hojas por roya

La Caída de las hojas sigue una simple ecuación estadística que depende de la incidencia de la roya:

$$\text{tasa de defoliación diaria: } y = 0.0144 / \text{dia} / \text{incidencia};$$

Eso es el 10.08 % de las hojas infectadas que mueren cada semana.

El café pierde x hojas, las más afectadas (con lesiones esporulantes o no).

## Acciones de la fungicida

El día del tratamiento, todas las esporas depositadas y germinadas son eliminadas (100%). Los 30 días siguientes, -10% de las lesiones esporulantes y no esporulantes son eliminadas por día, durante la Vida Útil del Fungicida (30 días).

Durante este periodo, no hay esporulación: hay algunas pústulas (disminuyendo) y la incidencia no cae súbitamente, pero no producen esporas.

Comparación de un cafeto en 2 simulaciones: arriba con tratamiento (en  $t=652$ ), abajo sin tratamiento; gráficos a la izquierda: pústulas/cafeto ; a la derecha: pústulas/hoja

- Num Pustulas del cafeto

- Num pustulas por hoja

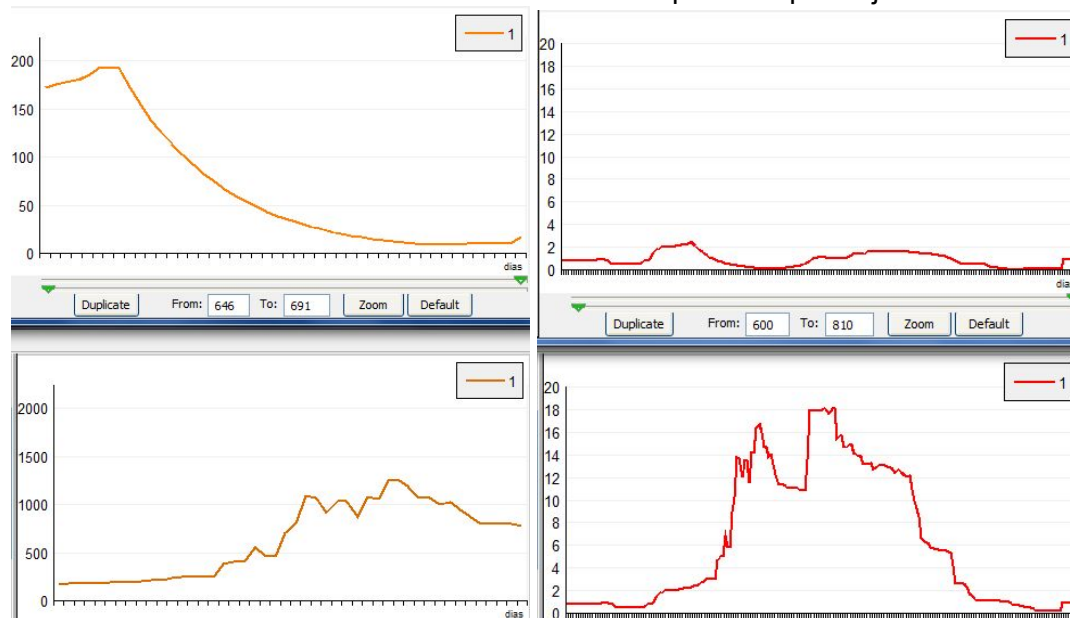


Fig. 17. Números de pústulas por cafeto (izquierda) y por hoja (derecha), con tratamiento (arriba) o sin tratamiento (bajo).

Efecto sobre la incidencia:

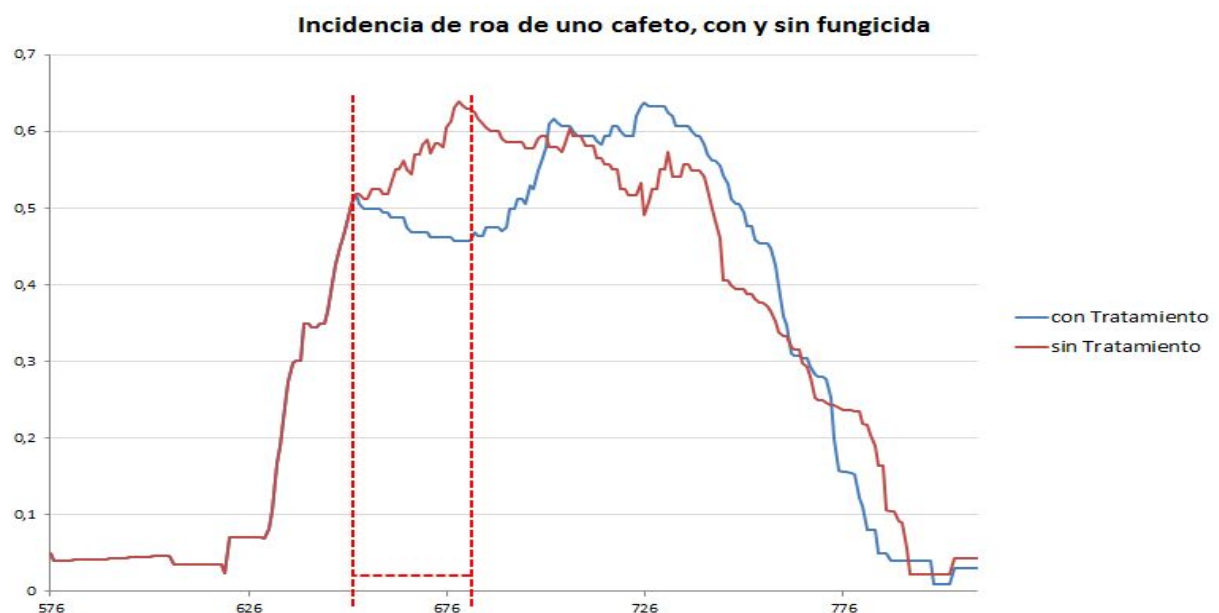


Fig. 18. Dinámica de la incidencia de roya simulada, sin tratamiento y con tratamiento



## **Clima local**

Cada parcela de una finca está situada a una determinada altitud. Además, una estación meteorológica se encuentra en este pequeño territorio. Esta estación no simula el clima, sino que recupera sus datos de un archivo (en formato CSV). Para cada parcela, los datos meteorológicos se calculan según la diferencia de altitud con la estación.

Un archivo debe contener por cada día, la  $T^{\circ}$  diaria,  $T^{\circ}$  min,  $T^{\circ}$  max y las precipitaciones (mm/día). Estas “variables de forzamiento” se adaptan a la altitud de cada parcela.