

# EcoPalm: un nuevo modelo de simulación de la variación estacional del rendimiento de la palma de aceite

Ecopalm: a new simulation model of the seasonal variation of oil palm yield

AUTORES



**J.C. Combres;**  
**Mialet-Serra;**  
**V. Bonnal;**  
**J.C. Soulié;**  
**L. Rouan;**  
**S. Braconnier;**  
**M. Dingkuhn**

Cirad, France.  
isabelle.mialet-serra@cirad.fr

## Palabras CLAVE

EcoPalm, modelo de simulación, variación estacional, palma de aceite

EcoPalm, simulation model, seasonal variation, oil palm

## Resumen

Entender, simular y predecir las variaciones estacionales de producción de racimos en las plantaciones de palma de aceite es un reto científico que ha evolucionado durante la última década. El modelo EcoPalm presentado aquí trata de explicar esas variaciones para el material L2T x D10D en el ambiente de Costa de Marfil, y determinar las diferentes fases sensibles. Este nuevo y simple modelo de palma de aceite introduce varias hipótesis sobre las causas fenológicas y fisiológicas de los ritmos interanuales de producción y variación de la producción. Tales hipótesis parecen tener el potencial de avanzar de forma significativa en la elaboración de modelos y en el entendimiento de este complejo cultivo.

## Abstract

Understanding, simulating and predicting seasonal variations in bunch production of oil palm plantations is a scientific challenge that has evolved over the last decade. The EcoPalm model presented here attempts to explain these variations for L2T x D10D material in the Ivory Coast environment, and determine the different sensitive phases. This new and simple model of oil palm introduces several hypotheses on the phenological and physiological causes of the interannual frequencies of production and production variation. Such hypotheses appear to have the potential to make significant progress in modeling and understanding of this complex crop.



## Introducción

Un importante reto científico que ha evolucionado durante la última década es entender, simular y predecir las variaciones estacionales de producción de racimos en las plantaciones de palma de aceite. En Costa de Marfil, el rendimiento mensual de racimos de fruta fresca (RFF) varía entre 0,05 y 0,2 t/ha/mes en julio, agosto y septiembre, y 2,5 y 6,6 t/ha/mes en marzo y abril para material L2T x D10D. El nivel relativo de máxima producción mensual tiene varias consecuencias para la industria palmera y la organización de las plantaciones. Esto motivó a numerosos autores a tratar de simular la producción de acuerdo con el medio ambiente y el clima.

Los primeros intentos de modelización simulaban la producción anual de RFF, que fluctuaba entre 9 y 22 t/RFF/ha/año en Costa de Marfil, y entre 6 y 26 t/RFF/ha/año en Indonesia, usando modelos estadísticos (Ong 1982, 1983). Dufour *et al.* (1988), mostraron la importancia de estrés hídrico en diferentes etapas de sensibilidad entre 1 y 45 meses antes de la cosecha, y eficiente radiación solar.

La segunda generación está representada por modelos de asimilación de dosel. El modelo OPSIM fue implementado por Van Kraalingen (1985), van Kraalingen, Breure y Spitters (1989) con base en el modelo SUCROS (van Keulen 1982). OPSIM se ejecuta bajo una situación ideal, sin estrés y sin módulo de balance hídrico. Dufrière (1989) introdujo un balance hídrico semi-empírico en el desarrollo de SIMPROD. En este modelo, la tasa de crecimiento de diferentes partes vegetativas puede variar independientemente. Para estos dos modelos, la fotosíntesis, el crecimiento y la respiración de mantenimiento, lo mismo que el balance de carbono están bien cuantificados. Los coeficientes de partición se deducen a partir de observaciones. El exceso de asimilados, después de la partición a crecimiento vegetativo, forma un grupo de carbohidratos que al final del año se convierte en producción de RFF.

Se han hecho varios intentos para modificar estos modelos para incluir intervalos mensuales (Henson 1997) y para explorar mecanismos alternativos que expliquen la variación estacional (Henson 1999). Sin embargo, las variaciones estacionales permanecen en gran medida sin explicación (Henson 2004).

La determinación de la estacionalidad de la producción en palma de aceite es muy compleja. La variación de los componentes del balance de carbono puede ser menos importante que los componentes de fenología y desarrollo de inflorescencias. La principal causa de la variación en producción de RFF es el número de racimos (escala 1 a 30). En palmas adultas también existe variación estacional en el promedio de peso de racimo (escala 1 a 3).

## Hipótesis fundamental del modelo EcoPalm

El modelo EcoPalm presentado aquí trata de explicar estas variaciones para el material L2T x D10D en el ambiente de Costa de Marfil, y determinar las diferentes fases sensibles. Divide el desarrollo de fitómeros, que tarda más de tres años, en diferentes fases fenológicas durante las cuales los componentes del rendimiento pasan por procesos específicos (sexualización, aborto, dimensionamiento y llenado de racimos). Estos procesos constituyen etapas ambientales sensibles afectadas por el fotoperiodo o la disponibilidad de asimilados. Debido a que muchos fitómeros se desarrollan al tiempo, pero todos en diferentes estados de desarrollo en un momento dado, el modelo de fitómero unitario simple se traduce en un sistema complejo a nivel de agregado. Estos son los componentes innovadores de EcoPalm. El balance de carbono, que es similar a modelos anteriores, y el balance hídrico simple del modelo SARRA-H (Dingkuhn *et al.* 2003) no se presentan aquí.

En EcoPalm se asume que las plantaciones de palmas adultas (10 a 20 años) tienen un índice de área foliar (IAF) constante y un promedio anual de producción de materia seca vegetal (PMSV) constante. Pero la PMSV mensual puede ser reducida por estrés hídrico. La emisión anual de hojas está influenciada por factores térmicos y es más o menos constante en zonas de clima húmedo tropical, pero depende del genotipo. La demanda por asimilados para el llenado individual de racimos se ajusta en varias etapas durante el desarrollo de fitómeros, pero se asume que el proceso de llenado ocurre durante el mes anterior a la cosecha (madurez del racimo). Esto es una simplificación, porque los racimos crecen durante 10 meses, aunque en el último mes se presenta la demanda más fuerte debido a la síntesis del aceite.



*Sensibilidad al fotoperiodo:* EcoPalm simula el número potencial de racimos, asumiendo una proporción femenina del 100% y ausencia de abortos. El número potencial de racimos por mes depende de la frecuencia de iniciación de hojas, correspondiente a 1 plastocrono. Se asume que el plastocrono es constante en términos de tiempo térmico y se convierte en filocrono constante (tiempo que transcurre entre la aparición de dos hojas sucesivas). De hecho, esto es una simplificación porque se sabe que las sequías demoran la aparición y expansión de las hojas, un efecto que es luego compensado durante la recuperación.

Asumiendo que la tasa de producción de órganos es una medida de la tasa de desarrollo, es posible concluir, a partir de Henry (1957), que la temperatura base ( $T_{base}$ ) es  $16,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pero Ferwerda (1977) mostró que la  $T_{base}$  puede ser menor, de tal manera que los valores se buscan por optimización. El tiempo térmico entre las iniciaciones de dos fitómeros sucesivos (plastocrono) se calibra con base en el promedio anual de emisiones de hojas observado y el tiempo térmico calculado a partir del clima y las temperaturas cardinales, como se describió anteriormente. Se encontró un plastocrono de 234 grados días (edad foliar). La variación estacional de temperatura induce una pequeña variación en el número mensual de iniciación de hojas.

Se desconoce el tiempo exacto de la iniciación de la hoja, pero ocurre antes del promordio de la hoja más joven, visible por disección y microscopio electrónico. Ocurre en el rango -50 y -60, correspondiente a 50 a 60 plastocronos antes de la aparición de la hoja (Corley & Tinker, 2003). Por tanto, se puede estimar que la iniciación de la hoja ocurre en promedio entre 48 y 50 meses antes de la cosecha.

El número de racimos cosechados por mes es a veces mucho más grande que el número máximo de hojas (o fitómeros) que pueden ser iniciadas por mes. Este fenómeno se puede explicar por una fase sensible al fotoperiodo (FSF) durante el desarrollo de la inflorescencia, que retarda la iniciación floral si la duración del día no es favorable. Esta sensibilidad operaría a nivel de fitómero y no a de planta. Por tanto, la duración total entre la iniciación de la hoja y la floración en el mismo fitómero variaría de acuerdo con la duración del día durante la etapa de sensibilidad al fotoperiodo (FSF).

De manera que, en un momento dado, el número de inflorescencias en floración puede ser menor o mayor que el número de fitómeros desarrollados por mes, pero estas diferencias se nivelan a escala anual (principio del acordeón). De hecho, durante los períodos máximos de madurez de racimo (5-6 meses después de la floración), varios racimos de diferente rango se pueden cosechar en un mes. El mismo fenómeno se observa en cereales sensibles al fotoperiodo cuando se siembran en diferentes fechas pero florecen al mismo tiempo (Dingkuhn *et al.*, 2008). Estudios de campo realizados por Legros *et al.* (2009) confirmaron este concepto en palma de aceite. Los picos de cosecha inducidos por el efecto acordeón se observaron en abril y marzo en el hemisferio norte, y en octubre y noviembre en el hemisferio sur, lo que concuerda con la suposición del fotoperiodo.

**El número de racimos cosechados por mes es a veces mucho más grande que el número máximo de hojas (o fitómeros) que pueden ser iniciadas por mes.**

*El índice de competencia interna ( $I_c$ )* entre todos los componentes que compiten por una fuente común, caracteriza el estado trófico de la planta. Induce sexualización de las inflorescencias y su aborto facultativo en una etapa posterior. Los conceptos generales de EcoPalm son similares a los conceptos descritos para el modelo EcoMeristem (Luquet *et al.*, 2006) desarrollado para cereales, que simula procesos órgano-genéticos y su interacción con el suministro de asimilados. En EcoPalm, los diferentes componentes son respiración de mantenimiento ( $R_m$ ), crecimiento vegetativo y respiración de crecimiento asociada ( $R_g$ ), el crecimiento de inflorescencias y racimos y la  $R_g$ ; esta última es particularmente alta durante la síntesis de aceite. La proporción entre suministro de asimilados/demanda de agregados se mide con una variable llamada *índice de competencia interna ( $I_c$ )*.

Los valores de competencia interna inferiores a 1 activan ajustes adaptativos en la organogénesis y morfogénesis de las plantas, dando como resultado una plasticidad fenotípica. En EcoPalm se asume que solo las inflorescencias y los racimos son plásticos. Tres tipos de ajustes pueden ocurrir con la deficiencia de asimilación: (1) disminución de la proporción inicial de sexos, lo que da por resultado mayor cantidad de inflorescencias masculinas improductivas; (2) aborto de inflorescencias durante las etapas de sensibilidad, y (3) el peso individual de racimos puede estar por debajo de su potencial, y en casos extremos puede causar que no se produzcan racimos.

*Almacenamiento de asimilados.* Cuando el índice de competencia interna es mayor que 1, el exceso de asimilados se almacena como reserva. A su vez, la deficiencia de asimilados (*índice de competencia interna* < 1) es parcialmente compensada por la movilización de reservas asociada con un coeficiente de costo para movilización de transporte.

*La demanda potencial por crecimiento reproductivo* es el producto del peso potencial de racimo con el número de racimos que se forman en un mes. Si existe una deficiencia de asimilados durante el llenado del fruto, la movilización de reservas compensa parte del déficit pero el rendimiento de racimos disminuye hasta cierto punto, dependiendo de la selección de coeficientes para el manejo de las reservas de carbono.

## Descripción del modelo EcoPalm

El modelo funciona en dos escalas de tiempo, diaria y mensual. El balance hídrico y el balance de carbono se implementan diariamente usando datos meteorológicos diarios. La iniciación de fitómeros y la fenología también se simulan diariamente. Para todos los otros procesos, o sea, el crecimiento de órganos y la dinámica de las reservas de carbono, el modelo funciona con agregados mensuales (sumas o promedios). El modelo se ejecuta entre dos fechas de simulación que deben estar muchos años aparte y deben estar dentro de la fase adulta de una población. Se necesitan seis años de datos meteorológicos anteriores al periodo que se va a simular porque el modelo, con sus muchas retroalimentaciones internas, debe lograr un equilibrio antes de que las simulaciones de rendimiento puedan ser significativas.

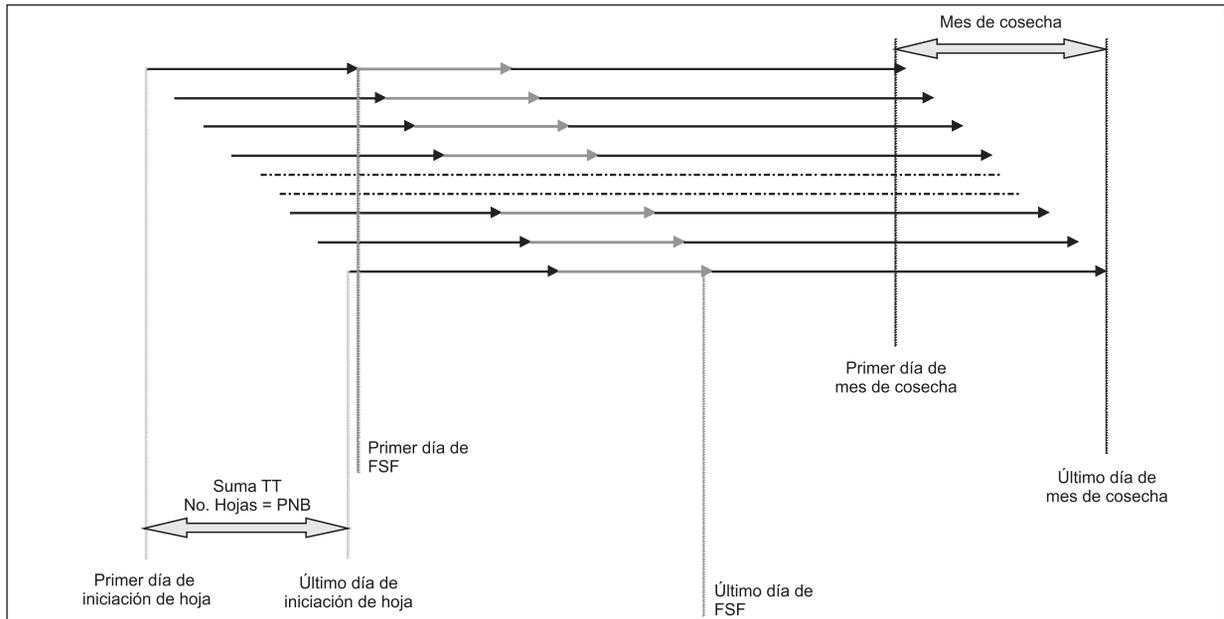
En una versión previa del modelo (Combres *et al.*, 2006), todas las fases sensibles de la competencia interna del desarrollo del fitómero tenían una duración fija de un mes y el índice de competencia interna se calculaba mes a mes. En la versión del modelo presentado aquí (EcoPalm V3), los periodos de sensibilidad pueden comenzar y terminar cualquier día y los promedios del índice de competencia interna se calculan entre estas dos fechas (Figura 1). La duración del periodo de sensibilidad depende de la duración del día incluyendo el crepúsculo civil. Todos los demás procesos de desarrollo dependen del tiempo térmico.

## Fenología

El tiempo entre la iniciación de la hoja y la cosecha del racimo asociado es de aproximadamente cuatro años. Durante este periodo, el posicionamiento de las fases de sensibilidad al fotoperiodo para ajustes de los componentes del rendimiento es poco conocido, aunque Legros *et al.* (2009abc) recientemente proporcionaron alguna información y también citaron otros autores para pruebas circunstanciales.

Se asume que la fase de sensibilidad al fotoperiodo (FSF), comienza cuando el tiempo térmico acumulado desde la iniciación de la hoja alcanza un valor crítico (PrePPTT). En la misma forma, la duración a partir del final de la fase de sensibilidad al fotoperiodo al tiempo de cosecha (madurez de racimo) se establece por otro valor crítico del tiempo térmico acumulado (PostPPTT). Para calcular la duración de la fase de sensibilidad fotoperiodo el modelo usa un sub-modelo muy simple desarrollado para plantas de día corto. Cada día, si la duración del día es superior a una duración crítica (CritPP), se calcula en fotoperiodo efectivo (PPeff) como  $PPeff = \text{Max}[0.0001; f(DL) - f(\text{CritPP})]$  la velocidad de desarrollo (V) es el recíproco del fotoperiodo efectivo  $V = \frac{1}{PPeff}$ .

El final de la fase de sensibilidad al fotoperiodo (correspondiente a la iniciación panicular en cereales) surge cuando la acumulación de velocidades diarias alcanza un umbral (PPTthreshold). El cálculo de la fase de sensibilidad al fotoperiodo tiene cuatro parámetros que deben ser calibrados: PrePPTT, CritPP, PPTthreshold, PostPPTT.



**Figura 1.** Determinación de las fechas de comienzo y final de cada fase sensible para cada día de simulación. La fecha de inicio se calcula a partir de la fecha de iniciación si  $I_c$  es antes de FSF y a partir de la fecha de terminación de la FSF, si es posterior.

En una pre-ejecución, el modelo asume cada día de la simulación como un día de iniciación de hoja (escala de parcela) y calcula para cada uno las fechas de comienzo y final de la fase de sensibilidad al fotoperiodo y la fecha potencial de cosecha (para inflorescencias femeninas). Todo se agrupa por mes de cosecha. Para cada mes de cosecha el modelo determina la iniciación del período desde la primera hasta la última fecha de iniciación de hoja y la duración de la fase de sensibilidad al fotoperiodo desde el primer día hasta el último (Figura 1).

El tiempo térmico acumulado durante el período de iniciación dividido por el plastocrono da el número de hojas por hectárea (de acuerdo con la densidad de siembra de las palmas) capaz de llegar a la fase de cosecha en el mismo mes. Es el número potencial de racimos si todas las inflorescencias fueran femeninas y no hubiera abortos.

En la misma forma, el modelo calcula las fechas de comienzo y final de cada fase sensible a la competencia interna. Cada una se caracteriza por dos umbrales de tiempo térmico acumulado (1) desde la iniciación de la hoja (o final de la fase sensible a fotoperiodo, si posterior) al comienzo de la fase ( $I_{ci}$  DDS) (2) del comienzo al final de la fase ( $I_{ci}$  TTD). Como para la fase de sensibilidad al fotoperiodo, todas las fechas se

agrupan para un mes de cosecha y el modelo selecciona la primera fecha de comienzo de la fase y la última fecha del final de la fase. El índice de competencia interna ( $I_c$ ) se calcula entre estas dos fechas.

Se pueden simular cuatro fases sensibles de desarrollo de inflorescencias y racimos. La primera determina la proporción inicial de sexos. Las otras tres reducen aún más la proporción de sexos o causan abortos de inflorescencias femeninas si el suministro de carbohidratos durante la fase de sensibilidad no es adecuado (bajo índice de competencia interna). Es importante anotar que las fases sensibles se implementan específicamente para muchos fitómeros que se desarrollan al mismo tiempo, pero con diferentes estados de desarrollo; y que los ajustes inducidos por la competencia interna de los componentes del rendimiento durante las fases sensibles afectan la demanda por asimilados mucho después en la época de llenado.

Desde el primer día de la simulación hasta casi cuatro años, el modelo no puede simular el número potencial de racimos porque los fitómeros tardan casi cuatro años para terminar su desarrollo. Pero es necesario hacer una aproximación al número potencial de producción de racimos para calcular el índice de competencia interna (problema del huevo y la gallina). Por esta razón, las simulaciones deben comenzar

seis años antes del período de estudio, inicialmente utilizando valores predefinidos para la información faltante, permitiendo que el proceso de simulación gradualmente genere un equilibrio fisiológico y una respuesta apropiada a la variación climática. Este inconveniente es natural en un sistema que tiene ciclos internos de retroalimentación que involucran largas demoras (plurianuales).

### Algoritmos para impactos de competencia interna en los componentes del rendimiento

Estudios comparativos de desempeño de diferentes algoritmos indican que el índice de competencia interna ( $Ic$ ) no debe afectar proporcionalmente un proceso (Ej.,  $Ic = 0.5$  causando 50% de abortos) o mediante el modelo de "bastón roto", sino por medio de una ley de poder (usando el parámetro  $Ic_{iWF}$  como exponente) que pueda asumir respuestas cóncavas, lineales o convexas, dependiendo del valor del parámetro. Cada fase sensible tiene un nuevo parámetro  $Ic_{iWF}$ .

La proporción inicial de sexos (ISR) se puede disminuir ( $Ic_1 < 1$ ) o aumentar ( $Ic_1 > 1$ ) de un valor promedio ( $Ic_1 = 1$ ). Se simula como  $ISR = A * Ic_1^{Ic_{iWF}} + B$

ISR, multiplicado por el número potencial de racimos (PNB) para el mes, establece el número inicial de inflorescencias femeninas. De allí en adelante, durante las otras tres fases sensibles a la competencia interna, el número de inflorescencias femeninas efectivas se reduce aún más aplicando un coeficiente dependiente de  $Ic$  menor que 1, calculado usando un principio similar. La tasa de supervivencia ( $S_i$ ) es  $S_i = \min(1, Ic_i^{Ic_{iWF}})$  y la tasa de abortos es  $AR_i = 1 - S_i$

El número final de racimos (NB) cosechados en un mes dado es, por tanto:

$$[NB = PNB * ISR * S_2 * S_3 * S_4]_{mes}$$

### Componentes de $Ic$

$Ic$  tiene cuatro componentes: el suministro bruto (GS) de fotosíntesis, la demanda por respiración de mantenimiento (MR), la demanda por crecimiento vegetativo (GD) que incluye  $R_g$ , y la demanda reproductiva (RD) incluyendo  $R_g$ . Todos se expresan en  $kg\ CH_2O/ha/día$ . En el proceso de simulación los datos para estos cuatro componentes se almacenan para cada

día. Esto permite calcular la demanda por asimilados durante el llenado de los racimos a partir de la historia de los fitómeros usando la siguiente ecuación

$$Ic_i = \frac{\sum_{beginningdate}^{enddate} GS}{\sum_{beginningdate}^{enddate} MR + \sum_{beginningdate}^{enddate} GD + \sum_{beginningdate}^{enddate} RD}$$

GS se calcula a partir de la radiación solar ( $R_s$ ) convertida en radiación fotosintéticamente activa (PAR). La absorción PAR se calcula a partir de la Ley de Beer con índice constante de área foliar (LAI) y el coeficiente de extinción de Dufrene (1989). Esta PAR absorbida se convierte en  $kg\ CH_2O$  con un coeficiente de conversión (ConvRate). Este potencial GS se ajusta hacia abajo en condiciones de déficit de agua usando un coeficiente calculado (cstr), que es una función de la fracción del agua transpirable del suelo (FTSW). GS así:

$$GS = 0.48 * R_s * (1 - \exp(-0.41 * LAI)) * ConvRate * cstr$$

Se asume que MR es constante a  $25\ ^\circ C$  (MaintResp). Se calcula a partir de la biomasa en pie y la composición de la biomasa de acuerdo con Penning de Vries (1989). La corrección diaria de MaintResp con temperatura promedio (Tmean) usa la ley  $Q_{10} = 2$

$$MR = MaintResp * 2^{(Tmean-25)/10}$$

GD se calcula a partir del promedio de las hojas en crecimiento (MGF) usando valores empíricos para la masa foliar final y duración de expansión, e información similar de crecimiento de tronco y raíces (Legros et al., 2009abc). Las hojas crecen durante siete meses (de 20 a 14 mbh). El crecimiento de las hojas con un peso seco final de FrondDW requiere  $1.45\ kg\ CH_2O$  por  $kg$ . Las hojas constituyen el 52% del crecimiento vegetativo total (I. Mialet-Serra, comunicación personal). Por tanto:

$$GD = MGF * FrondDW * 1.45 / 0.52$$

RD se calcula a partir del número de racimos (NB) el peso potencial de los racimos de fruta fresca (PotBunchFW), contenido de agua (BunchWC) y el coeficiente de conversión de DW a  $CH_2O$  ( $TxGrResp$ ) es particularmente alto debido al alto contenido de aceite de los frutos.



$$RD = NB * PotBunchFW * BunchWC * TxGrResp$$

## Datos experimentales

Los datos de producción vienen de la parcela experimental E70 del Centro de Investigación de La Mé (Costa de Marfil) (5.3 °N). La situación climática y edáfica de esta parcela fue descrita por Dufrêne *et al.* (1993). Los datos son valores promedios de 655 palmas de la progenie testigo, LM2T X D10D de julio de 1983 a junio de 1992.

La parcela tenía una densidad de población de 143 palmas/ha a la fecha de siembra en 1973. Debido a la subjetividad de la fecha de cosecha, los datos se ajustaron usando promedios flotantes. El método de ajuste fue  $Mes = (0.5 Mes_{-1} + Mes + 0.5 Mes_{+1}) / 2$ . Los datos meteorológicos se midieron en la estación meteorológica central de La Mé y la lluvia se midió cerca a la parcela E70. Existen datos disponibles desde 01/01/1973 hasta 30/06/1992.

## Método de calibración

La plataforma de simulación EcoTrop que implementa EcoPalm está ligada al software R (R Development Core Team, 2005) usando el paquete Rgenoud (Genetic Optimization Using Derivative) para optimización estadística de parámetros (W. Mebbane y J. Sekhon, 2009).

La interfaz de optimización permite seleccionar parámetros para optimizar y fijar límites para variables y parámetros críticos (Ej.: fitómero máximo y duración mínima de inicio a cosecha). Estas limitaciones son leídas por R y usadas por Rgenoud. Cada individuo de la población de valores de parámetros generados por Rgenoud es un vector de nuevos valores de parámetros seleccionados y es enviado a Ecopalm. Ecopalm ejecuta una simulación y envía los resultados a Rgenoud que calcula la función de costo usada para evaluación. Entre 30.000 y 50.000 simulaciones son necesarias para encontrar una solución apropiada y reproducible, lo que requiere gran cantidad de tiempo de cálculo y energía.

Se utilizan cinco variables para optimizar: número mensual de racimos, número anual de racimos, peso promedio mensual de racimos, rendimiento mensual y rendimiento anual. Debido a la diferente magnitud

de estas variables, el costo para cada una es el error cuadrático medio normalizado (ECMN), según Kumar *et al.* (1999). Rgenoud minimiza el promedio de los cinco ECMN. Se hicieron optimizaciones contra datos de producción real. Los resultados optimizados de la simulación se compararon con datos reales y ajustados.

*Los dos pasos de optimización para sensibilidad al fotoperiodo y fases sensibles.* El modelo contiene parámetros que no tienen efecto inicial en las fases sensibles ( $I_{ci} = 1$ ) y una proporción inicial de sexos del 100%. El número inicial simulado de racimos es igual a PNB. Una primera optimización se hace únicamente con cuatro parámetros de sensibilidad al fotoperiodo y las cuatro temperaturas cardinales.

Después de la optimización de parámetros fenológicos, el modelo se parametriza para que tenga acción libre de  $I_c$ . La segunda optimización busca los parámetros para la época e intensidad de los impactos de  $I_c$  en los componentes del rendimiento.

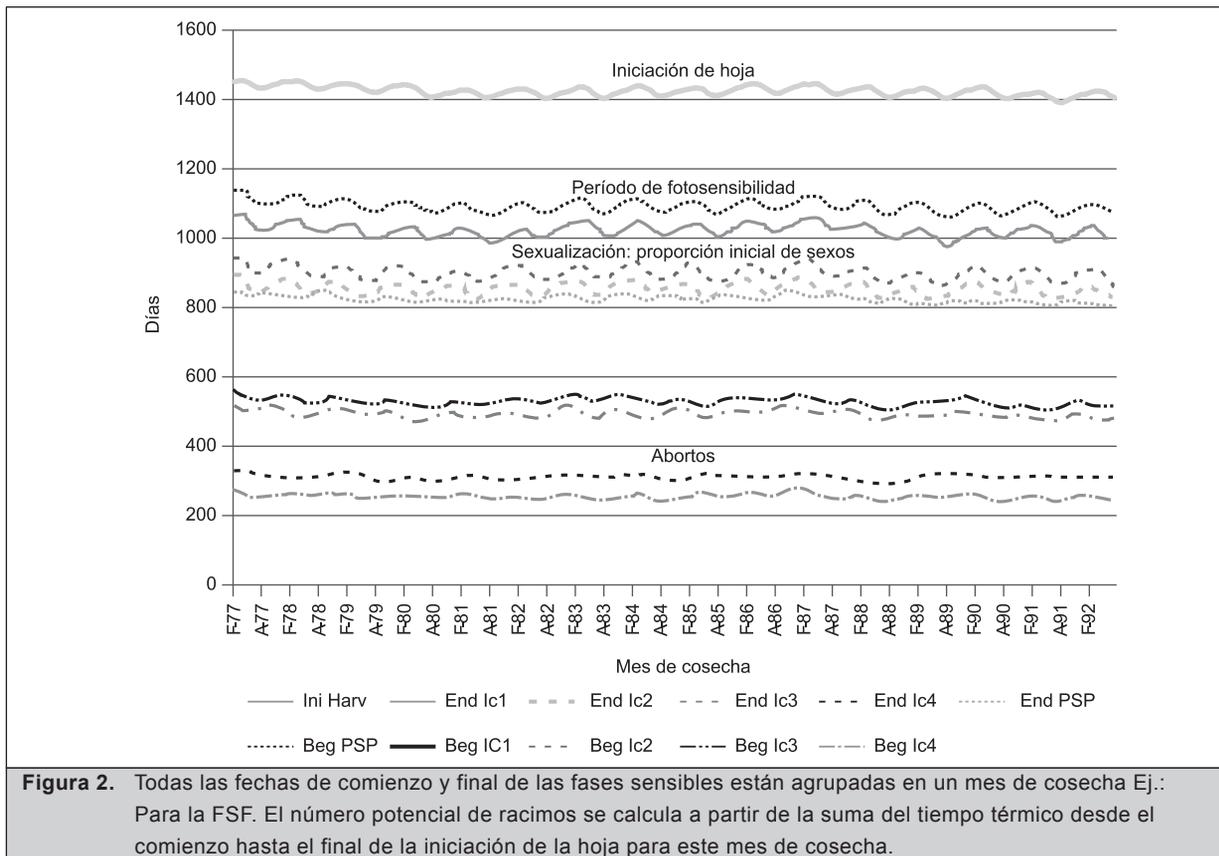
## Resultados y discusión

### Posicionamiento de FSF

La optimización de parámetros para fenología dio los siguientes valores:  $PP_{crit} = 10.87$  h;  $PP_{threshold} = 854$ ;  $PrePPTT = 4188$  grados día;  $PostPPTT = 10345$  grados día;  $T_{base} = 13.1$ ;  $TOpt1 = 27.9$ ;  $TOpt2 = 34.7$ ;  $T_{lim} = 46.8$  °C. El promedio de FSF comienza 1.095 días antes de la cosecha o 36 meses antes de la cosecha aproximadamente 4 meses después de la iniciación del meristemo de la inflorescencia y termina 826 días antes de la cosecha, alrededor de 28 meses antes de la cosecha (Figura 2). Su duración causada por la variación de la duración estacional del día fluctúa entre 275 y 320 días.

### Época de diferenciación sexual y otras fases sensibles

Se encontró que la época de la diferenciación sexual inicial ocurre durante la FSF. Comienza 34 meses antes de la cosecha, 2 meses después del comienzo de la FSF y termina 28 meses antes de la cosecha como FSF (Figura 2). Al final de la fase de sexualización se incluye una segunda fase sensible  $I_{c2}$  reduciendo el número de inflorescencias femeninas. Esta fase termina con la fase  $I_{c1}$  y FSF. Estas dos fases de sexualización duran-



te la FSF resaltan la complejidad de la diferenciación sexual en palma de aceite.

Se trató de convertir el término convencional de la industria ‘rango’ en unidades de tiempo térmico usando plastocronos, asumiendo un rango promedio de cosecha de 28. Esto fue un valor promedio usado para simplicidad debido a que la cosecha de racimos en Costa de Marfil ocurre entre el rango 24 y el rango 32.

También se intentó validar los resultados obtenidos de optimización fenológica con disecciones y observaciones con microscopio electrónico (Adam *et al.*, 2005) realizadas en Costa Rica en otro genotipo. La fase de diferenciación de proporción inicial de sexos comienza en el rango -27 con la individualización del meristema de la inflorescencia, y termina en el rango -17. La segunda fase comienza en el rango -20 con la iniciación de las brácteas de la espiguilla.

Según los resultados de la optimización, ocurre una tercera fase sensible que actúa en el aborto de la inflorescencia entre el rango -2 y 0. Esta Ic3 probablemente

representa el efecto del déficit de agua si ocurre antes de la emergencia de la hoja.

La cuarta fase sensible identificada mediante la optimización del modelo es la bien conocida fase de aborto 10 meses antes de la cosecha (Legros *et al.*, 2009abc). Comienza en el rango 10, cuando la inflorescencia empieza a crecer, y termina en el rango 12 cuando el crecimiento se vuelve lineal. Las fases de crecimiento con división celular muy activa son muy sensibles al medio ambiente, traducido en nuestro modelo como variable Ic4, y causa plasticidad fenotípica.

### Resultados y desempeño del modelo

Si se toma en cuenta el hecho de que los parámetros fenológicos y los parámetros de época de fases sensibles para los componentes del rendimiento se optimizaron independientemente y sin forzamiento preconcebido, los resultados son sorprendentemente coherentes con el conocimiento (limitado) que tenemos hoy sobre la fisiología y fenología de la palma de aceite.



El número de días entre fases sensibles y el comienzo del mes de cosecha no es constante debido a los cambios de temperatura (Figura 2). La variación puede ser hasta de dos meses para fases después de la FSF y cinco meses para las fases antes de la FSF (Ej. iniciación). Esto explica parcialmente la variabilidad de los resultados bibliográficos expresados en meses antes de la cosecha.

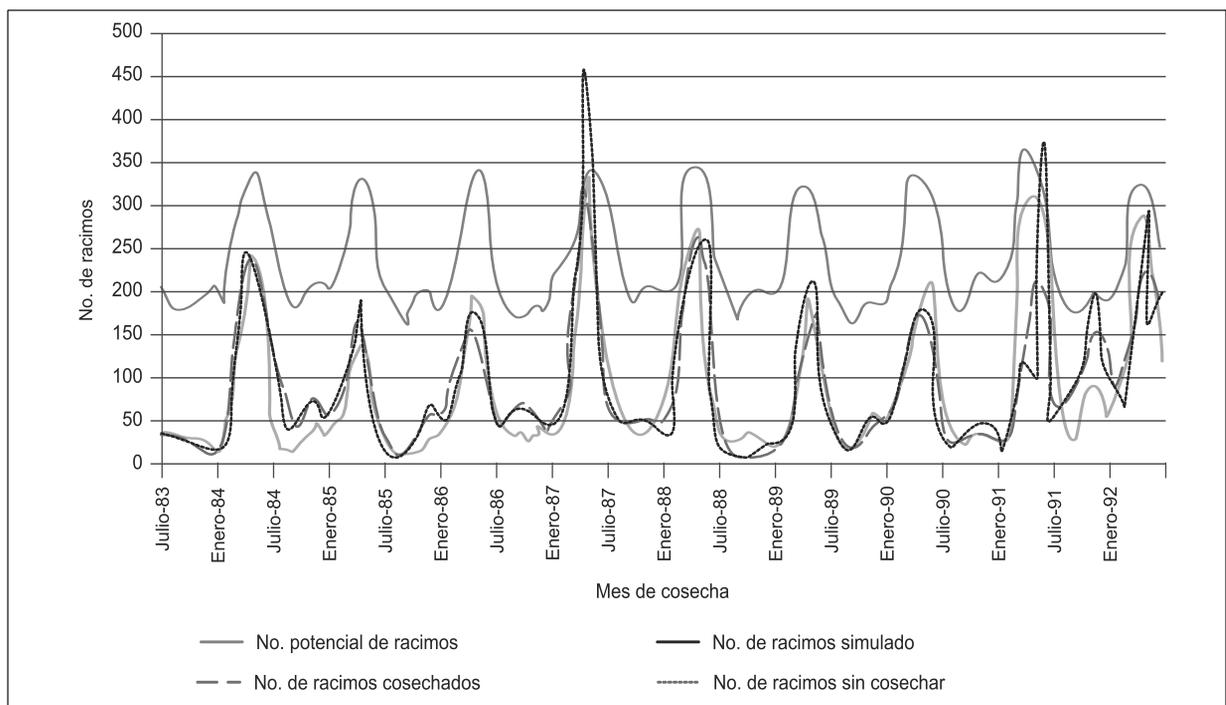
El número potencial de racimos simulado (Figura 3) fue más bajo que el número real de racimos cosechados únicamente durante 2 de los 108 meses (abril de 1987 y mayo de 1991). El número potencial de racimos proyectado en todos los meses fue más alto que los valores observados y ajustados. Probablemente los dos casos de subestimación aparente del número potencial de racimos se debieron a datos poco precisos del rendimiento mensual, dando por resultado cambios en fechas de cosecha de un mes al siguiente, por las limitaciones organizacionales que ocurren con frecuencia en las plantaciones. En abril de 1987 la parcela E70 produjo un número mayor de racimos que las parcelas vecinas similares. En 1991, abril presentó la observación más baja en los nueve años, y mayo la más alta. Por tanto, en los dos casos, es probable que la culpa sea más de los métodos de

muestreo que del modelo. De hecho, mayo no es normalmente el mes de máxima producción en Costa de Marfil (abril). La proporción de sexos inicial mostró grandes variaciones y debe ser casi 1 en abril de 1987 para asegurar este máximo (Figura 4).

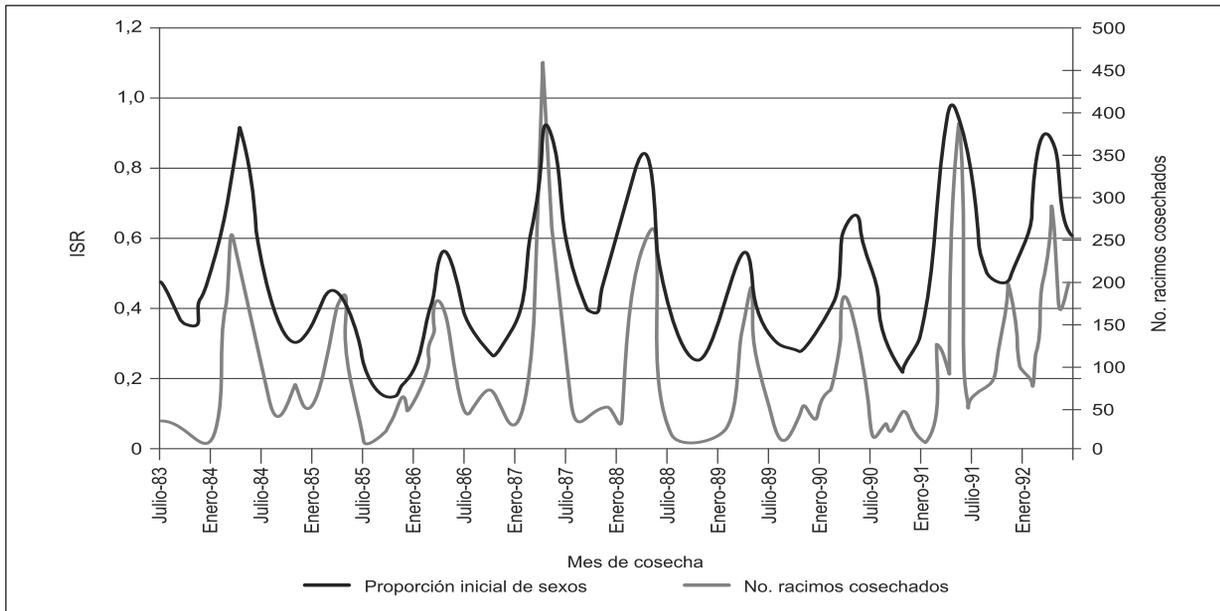
Las simulaciones del modelo mostraron buena concordancia con las observaciones de número de racimos cosechados mensualmente (Figura 3). Las amplitudes de la variación entre meses fueron por lo general bien simuladas. Sin embargo, hubo una tendencia a subestimar el número de racimos al comienzo de la simulación, y a sobrestimar el número en los últimos tres años. Tal vez la producción de palmas de 19 años comenzó a declinar debido a la edad. Esta tendencia es particularmente clara cuando se comparan datos interanuales de 12 meses acumulados con la correspondiente producción simulada (Figura 5).

## Discusión

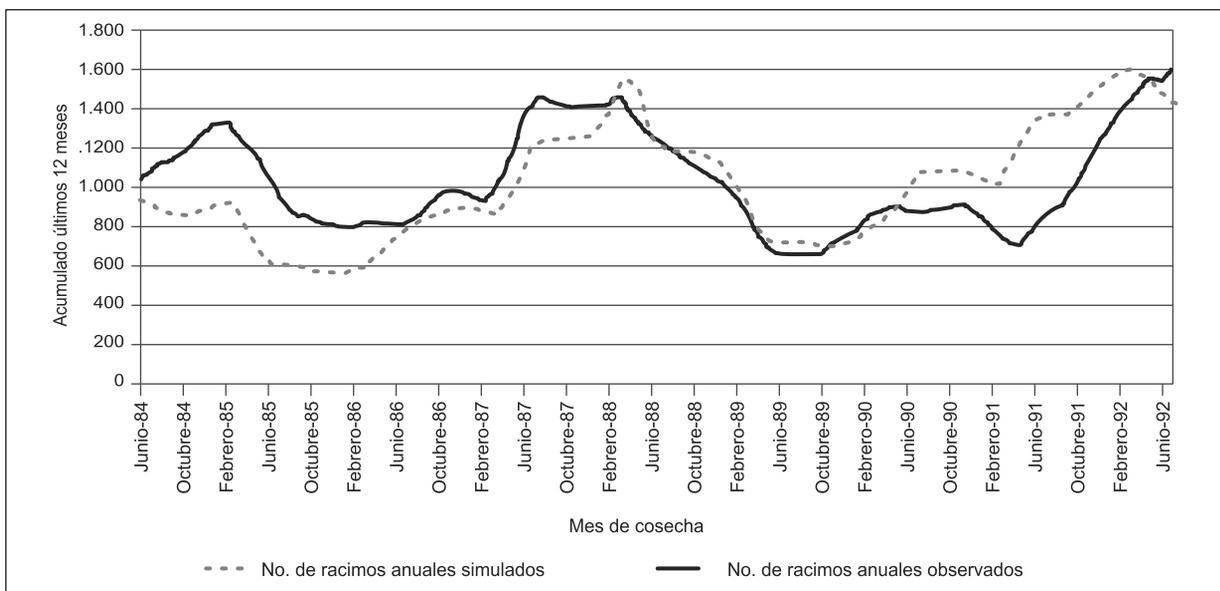
A pesar de las muchas simplificaciones (Ej., índice de área foliar constante y llenado de fruto en un mes) la simulación de la variación mensual y anual del número de racimos cosechados fue coherente con los datos observados. Aunque el modelo debe ser



**Figura 3.** Evolución de la proporción inicial de sexos (ISR) y número de racimos cosechados.



**Figura 4.** Número potencial de racimos (gris) número de racimos simulados (negra) número de racimos cosechados (líneas punteadas gris y negra).



**Figura 5.** Producción de 12 meses de racimos simulados y observados.

validado con datos independientes (que son difíciles de conseguir para un genotipo idéntico), la habilidad del modelo para simular con precisión tendencias intra- e interanuales de producción de racimos es un resultado importante no logrado anteriormente con otros modelos.

La nueva hipótesis de sensibilidad al fotoperiodo de la floración en palma de aceite contribuyó mucho a este logro. Investigaciones experimentales relacionadas

publicadas por Legros *et al.* (2009abc) proporcionaron soporte adicional a esta hipótesis con base en diferentes ambientes en Indonesia.

Los procesos fisiológicos involucrados en las relaciones fuente-componente y competencia entre componentes por carbohidratos son complejos. La variable  $I_c$  de nuestro modelo parece ser un enfoque adecuado y simple al mismo tiempo. Sin embargo, involucra simplificaciones que no son necesariamente



precisas; por ejemplo, la suposición de que en una planta grande y compleja como la palma de aceite la reserva diaria de asimilados actúa como un grupo simple, sin destinos preferenciales causados por la proximidad topológica. Pero parece que nuestra hipótesis de restricciones de asimilados (ya sean causadas por sequía, radiación solar variable o períodos de alta demanda interna) actuando en los componentes del rendimiento funciona bien. Esto fue demostrado por la identificación de épocas razonables de fases sensibles para la determinación del sexo y abortos, mediante un proceso neutral de optimización.

El modelo proporciona un mejor entendimiento de la compleja fenología y determinación del sexo de las palmas. También es interesante ver cómo un estrés ambiental puede afectar la producción muchos meses después, debido a las largas demoras de desarrollo en los ciclos fisiológicos. De nuevo, esto concuerda con Legros *et al.* (2009abc). Esta observación puede abrir oportunidades para aplicaciones de predicción del modelo porque el rendimiento es en parte pre-determinado por la historia del crecimiento (principio de memoria estructural en plantas perennes que puede ser simulado).

Aquí no presentamos otras calibraciones del modelo para diferentes materiales biológicos, que muestran gran variación genética en valores de parámetros que pueden ser de interés para los fitomejoradores.

Más adelante vendrán otros documentos que presentan la capacidad de EcoPalm para simular el rendimiento de aceite, los efectos de la sequía en la fenología y el rendimiento, y la diversidad genética en valores de parámetros. También se ha planeado investigación y desarrollo adicional del modelo para capturar fenología a largo plazo del cultivo, incluyendo el estado juvenil y la reducción en producción en palmas viejas. Se requiere más investigación acerca del tiempo térmico, modo de acción de la duración del día y sensibilidad a lc.

## Conclusión

Este nuevo y simple modelo de palma de aceite introduce varias hipótesis sobre las causas fenológicas y fisiológicas de los ritmos interanuales de producción y variación de la producción. Tales hipótesis parecen tener el potencial de avanzar significativamente en la elaboración de modelos y en el entendimiento de este complejo cultivo. La disponibilidad de datos tanto ambientales (incluyendo el clima) como del cultivo mismo, son una limitante importante en esta investigación.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a PT Smart Tbk., en particular al Smart Research Institute (Smartri) por el apoyo económico, logístico y técnico sin el cual este estudio no hubiera podido realizarse.

## Bibliografía

- Adam, H.; Jouanic, S.; Escoute, J.; Duval, Y.; Verdeil, J.L.; Tregear, J.W. 2005. Reproductive developmental complexity in the African oil palm. *American Journal of Botany* 92: 1836-1852.
- Combes, J-C.; Mialet-Serra, I.; Bonnal, V.; Flori, A.; Dingkuhn, M. 2006. EcoPalm: A simple, physiological model to simulate monthly variation of fruit production of an adult Oil Palm plantation. *In: Proceedings of ATP Reserve (n° 11/02) final meeting. 9-10 novembre 2006. Montpellier.* p 103-114.
- Corley, R.H.V.; Tinker, P.B. 2003. The Oil Palm. Fourth edition. Blackwell Publishing.
- Dingkuhn, M.; Baron, C.; Bonnal, V.; Maraux, F.; Sarr, B.; Sultan, B.; Clopes, A.; Forest, F. 2003. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. *In: Decision support tools for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa – A practical guide (Eds TE Struif Bontekes, MCS Wopereis)* p. 127-139
- Dingkuhn, M.; Kouressy, M.; Vaksman, M.; Clerget, B.; Chantereau, J. 2008. Applying to sorghum photoperiodism the concept of threshold-lowering during prolonged appetence. *European Journal of Agronomy* 28: 74-89.



- Dufour, O.; Frere J.L.; Caliman, J.P.; Hornus, P. 1988. Description of a simplified method of production forecasting in oil palm plantations based on climatology. *Oleagineux* 43 (7): 271-282
- Dufrêne, E. 1989. Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile. *Doctoral Thesis. Univ. Paris Sud. Orsay*. 156 p.
- Dufrêne, E.; Dubos, B.; Rey, H.; Quencez, P.; Saugier, B. 1993. Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guineensis* Jacq.) exposed to seasonal soil water deficits. *Oleagineux* 48(3): 105-120
- Henson, I.E. 1997. Analysis of oil palm productivity. I. The estimation of seasonal trends in bunch dry matter production. *Elaeis* 9(2): 69-77
- Henson, I.E. 1999. Notes on oil palm productivity. V. Evaluation of alternative mechanisms for supporting seasonal variation in dry matter production. *Journal of Oil Palm Research* 11(1): 41-52
- Henson, I.E., 2004. Seasonal variation in oil palm fruit bunch production: its origins and extent. *Planter* 80 (937): 201-212
- Kumar, A.; Bellam, N.K.; Sud, A. 1999. Performance of an Industrial Source Model: Predicting Long-Term Concentrations in an Urban Area. *Environmental Progress* 18 (2): 93-100
- Legros, S.; Mialet-Serra, I.; Caliman, J.-P.; Siregar, F.A.; Clément-Vidal, A.; Dingkuhn, M. 2009. Phenology and growth adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to photoperiod and climate variability. *Annals of Botany* 104, doi: 10.1093/aob/mcp214.
- Legros, S.; Mialet-Serra, I.; Caliman, J.-P.; Siregar, F.A.; Clément-Vidal, A.; Fabre, D.; Dingkuhn, M. 2009. Phenology, growth and physiological adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to sink limitation induced by fruit pruning. *Annals of Botany* 104, doi: 10.1093/aob/mcp216.
- Legros, S.; Mialet-Serra, I.; Clément-Vidal, A.; Caliman, J.-P.; Siregar, F.A.; Fabre, D.; Dingkuhn, M. 2009. Role of transitory carbon reserves during adjustments to climate variability and sink-source imbalances in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Tree Physiology*, doi : 10.1093/treephys/tpp057.
- Luquet, D.; Dingkuhn, M.; Kim, H.K.; Tambour, L.; Clément-Vidal, A. 2006. EcoMeristem, a model of morphogenesis and competition among sinks in rice. 1. Concept, validation and sensitivity analysis. *Functional Plant Biology* 33: 309-323.
- Mebane Walter, R. Jr., Sekhon Jasjeet, S. 2009. Genetic Optimization Using Derivatives: The rgenoud Package for R. *Journal of Statistical Software*, Forthcoming. URL <http://www.jstatsoft.org/>.
- Ong, H.T. 1981 System approach to the climatology of oil palm. I Identification of rainfall and dry spells aspects *Oleagineux* 37(3): 93-105
- Ong, H.T. 1982 System approach to the climatology of oil palm. II Identification of temperature and sunshine aspects *Oleagineux* 37(10): 443-453
- Ong, H.T. 1983 System approach to the climatology of oil palm. III Interactions of fruit bun loads on development with climate *Oleagineux* 38(8-9): 469-473
- R Development Core Team. 2005. R: A language and environment for statistical computing, reference index version 2.x.x. *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>*.
- Van Keulen, H.; Penning de Vries, F.W.T.; Dress, E.M. 1982. A summary model for plant growth. In : *Penning de Vries F.W.T and Van Laar H.H. (editors) Simulation of Plant Growth and Crop Production. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen*, p 87-94.
- Van Kraalingen, DWG. 1985. Simulation of oil palm growth and yield. *Doctoral Thesis, Dept. of Theoretical Production Ecology, Agricultural University, Wageningen*, 106p
- Van Kraalingen, DWG.; Breure, C.J.; Spitters, C.J.T. 1989. Simulation of oil palm growth and yield. *Agricultural and Forest Meteorology* 46: 227-244