

Modelos fisiológicos para la estimación del crecimiento, la floración y la producción del aceite de palma

Physiological models to estimate oil palm growth, flowering and production

AUTOR



Ian E. Henson

Dirección: 7 Richmond Dale,
Clifton, Bristol BS8 2UB,
United Kingdom.
email: iehenson@hotmail.com.

Palabras CLAVE

Modelado de simulación mecanística,
palma de aceite, floración,
crecimiento, producción.

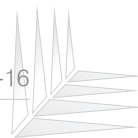
Mechanistic simulation modeling, oil
palm, flowering, growth, production

Resumen

Una de las formas de recopilar y utilizar los resultados de la investigación y la experiencia obtenida en el cultivo de la palma de aceite es la construcción de modelos de simulación mecanísticos, los cuales permiten rápidamente incorporar los resultados y realizar una evaluación y exploración de su trascendencia. Este trabajo describe algunos modelos de simulación que se han construido recientemente, que cubren varios aspectos relacionados con el crecimiento, la fisiología y el cultivo de la palma de aceite, y se comparan los datos obtenidos mediante el modelo con los resultados observados en el cultivo.

Abstract

One way to collect and use research results and the experience gained in the cultivation of oil palm is the construction of mechanistic simulation models, which allows for the results to be quickly incorporated and for assessing and exploring their significance. This paper describes some recent simulation models, covering various aspects related to growth, physiology and cultivation of oil palm, and compares the data obtained by the model with the results observed in the crop.



Introducción

Con mucho esfuerzo, diversos investigadores han recopilado amplia información acerca del crecimiento y la fisiología de la palma de aceite. Sin embargo, con sorpresa encontramos que muy poca de esta información ha sido aprovechada de manera sistemática. Una de las formas de recopilar y utilizar los resultados de la investigación y la experiencia obtenida en el cultivo de la palma de aceite es la construcción de modelos de simulación mecánicos, los cuales permiten rápidamente incorporar los resultados y realizar una evaluación y exploración de su trascendencia.

Los modelos no solo se utilizan para sistematizar y relacionar la información existente, sino que cada vez más también se utilizan en la investigación científica para ayudar a desarrollar nuevas hipótesis para la experimentación. Los modelos carecen de muchas de las restricciones que limitan el trabajo experimental y permiten el examen de una amplia gama de posibilidades con un mínimo de esfuerzo. Gracias a ello, el modelado se ha convertido en un ejercicio muy popular para los científicos de cultivos, y es particularmente útil en el caso de cultivos perennes como la palma de aceite, donde realizar pruebas es un ejercicio costoso y que toma mucho tiempo.

Si bien los modelos no obvian la necesidad de realizar pruebas, pueden ser muy útiles como complemento, ya que se pueden utilizar para diseñar, realizar e interpretar las pruebas. Este trabajo describe algunos modelos de simulación que se han construido recientemente¹, que cubren varios aspectos relacionados con el crecimiento, la fisiología y el cultivo de la palma de aceite y se comparan los datos obtenidos mediante el modelo con los resultados observados en el cultivo.

Modelos de simulación para la palma de aceite

El primer modelo mecánico detallado para la palma de aceite fue el OPSIM, basado en modelos de producción anteriores desarrollados por el Departamento de Teoría de la Ecología de la Producción de la Universidad Agrícola de Wageningen (van Kraalingen, 1985; van Kraalingen *et al.*, 1989). El OPSIM se clasificó como un modelo de “producción nivel 1”, puesto que asume que la única limitante sobre el crecimiento del cultivo es la radiación solar.

Los elementos del OPSIM fueron luego recopilados en un programa simple tipo GWBASIC (Henson, 1989), y debido a que se enfocaba sobre la asimilación bruta de carbono, se denominó GPHOT. Posteriormente, se amplió para incorporar los efectos sobre la producción de material seco de palma de aceite y la producción de otras condiciones externas como el déficit en la presión de vapor atmosférico (VPD por su sigla en inglés), temperatura del aire y suministro de agua en el suelo (Henson, 2000).

Dufrene (1989) desarrolló un modelo similar al OPSIM, pero su uso es un tanto limitado porque requiere de mediciones previas directas sobre la vegetación. Sin embargo, sí simulaba el efecto de la temperatura además de la radiación solar. Conocido luego como el SIMPALM (Bonnot, 1995), este modelo ha sido aplicado en por lo menos dos estudios adicionales sobre la palma de aceite (Lamade y Setiyo, 1996; Caliman y Southworth, 1999).

Dichos modelos se centraban en la simulación de la producción de palma de aceite con base anual, estaban en lo fundamental enfocados en las fuentes y no consideraban las restricciones del efecto sumidero y factores estacionales que generan variaciones de producción dentro del año. Para poder explorar la variación estacional se requiere poder modelar los ciclos de floración de la palma de aceite. Gerritsma (1988) desarrolló un modelo de producción estacional, pero que dependía de registros preexistentes sobre relación de sexo (la proporción de inflorescencias femeninas y masculinas). Posteriormente, Jones (1997) desarrolló un método para simular la relación de sexo (1997). Su modelo sirvió de base para los modelos tipo OPFLSIM (simuladores de floración de palma de aceite), que se explican más adelante.

El modelo GPHOT luego evolucionó en el modelo OPRODSIM (simulador de producción de palma de

1. Ver una explicación de los términos en el Anexo.

aceite; Henson, 2005). El desarrollo de rutinas de programación adicionales sobre el OPRODSIM ayudó a crear el modelo OPCABSIM (simulador de presupuesto de carbono de la palma de aceite)².

Características de los nuevos modelos

OPFLSIM

Se han producido tres versiones del OPFLSIM (Henson y Jones, 2005a, b; Henson, 2006b), las cuales representan mejoras sucesivas en cuanto al alcance y la capacidad del modelo. OPFLSIM1 es un modelo de floración estacional basado en el modelo original de Jones (1997), el cual se puede utilizar para examinar los efectos relativos de factores internos y tratamientos relacionados con la manipulación de la determinación de sexo, y los patrones y duración de los ciclos de floración. Genera datos de resultado para nodos individuales pero no toma en cuenta los cambios en las tasas de producción de los nodos debido a la edad de las palmas. Por tanto, se ajusta mejor a la fase madura y estable del ciclo de vida de la palma de aceite, cuando la tasa anual de producción de hojas es relativamente constante, de alrededor de 24 hojas por palma.

OPFLSIM2 es un modelo de floración estacional que además simula la producción y considera los cambios relacionados con la edad de la palma, con resultados para cada mes y año, así como para cada nodo desde el momento de siembra hasta el fin del cultivo.

OPFLSIM3 es otro modelo de floración estacional y producción basado en el OPFLSIM2 que además contempla los principales factores tanto externos como internos que afectan los ciclos de floración y producción. Este modelo genera archivos que sirven para alimentar el OPRODSIM.

OPRODSIM

Este es principalmente un modelo de producción pero también genera una extensa serie de variables asociadas sobre crecimiento y fisiología. Más que en nodos, se basa en el tiempo y genera datos diarios, mensuales y anuales. Es sensible al clima y permite seleccionar varias opciones climáticas representativas

de las principales regiones cultivadoras de palma de aceite. También permite al usuario ingresar datos climáticos específicos para su localidad. Además de permitir pruebas sobre parámetros fisiológicos y climáticos, incluye una serie de opciones de manejo de cultivos y algunas funcionalidades preliminares sobre enfermedades y plagas. Cambios climáticos, tales como los asociados con el calentamiento global, el fenómeno de *El Niño*, o periodos de bruma, también están contemplados.

El modelo incluye componentes de análisis de racimos (lo que permite estimar la producción de aceite y palmiste), evaluación del balance de nutrientes del cultivo, respuestas al suministro de agua en el suelo y eficiencia de la polinización, así como los efectos del fenotipo de la palma de aceite. Aunque está principalmente basado en la fuente, el modelo ofrece una funcionalidad para importar datos generados por medio del OPFLSIM, con el fin de permitir que la producción sea calculada con base en el efecto sumidero o una combinación de efectos de sumidero y de fuente.

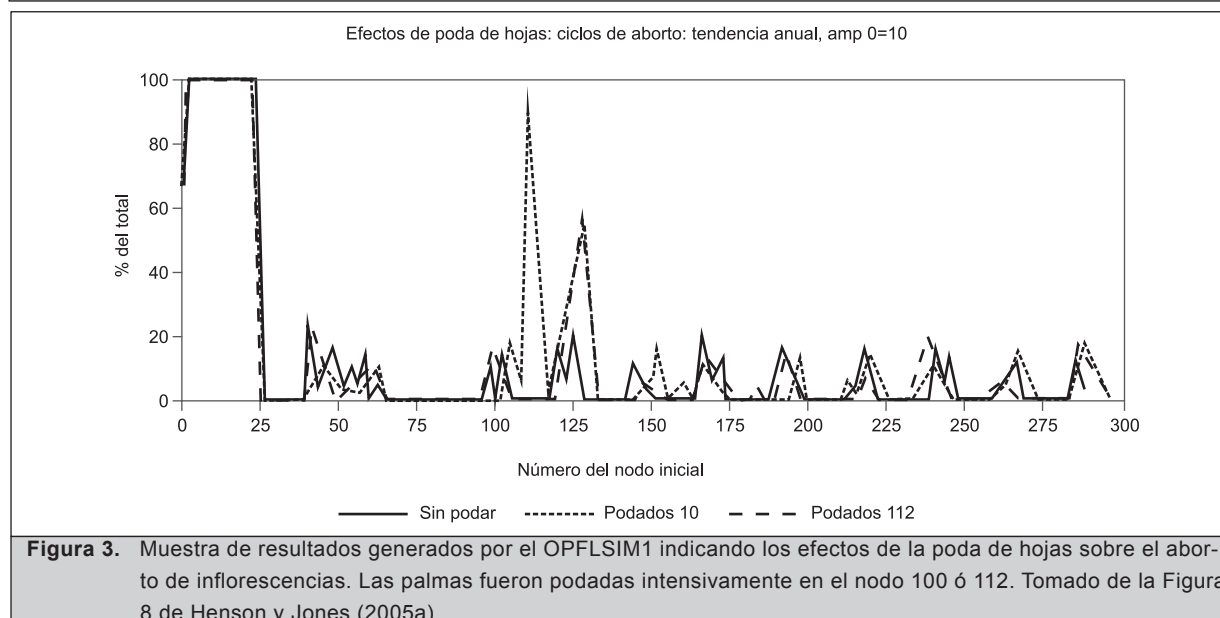
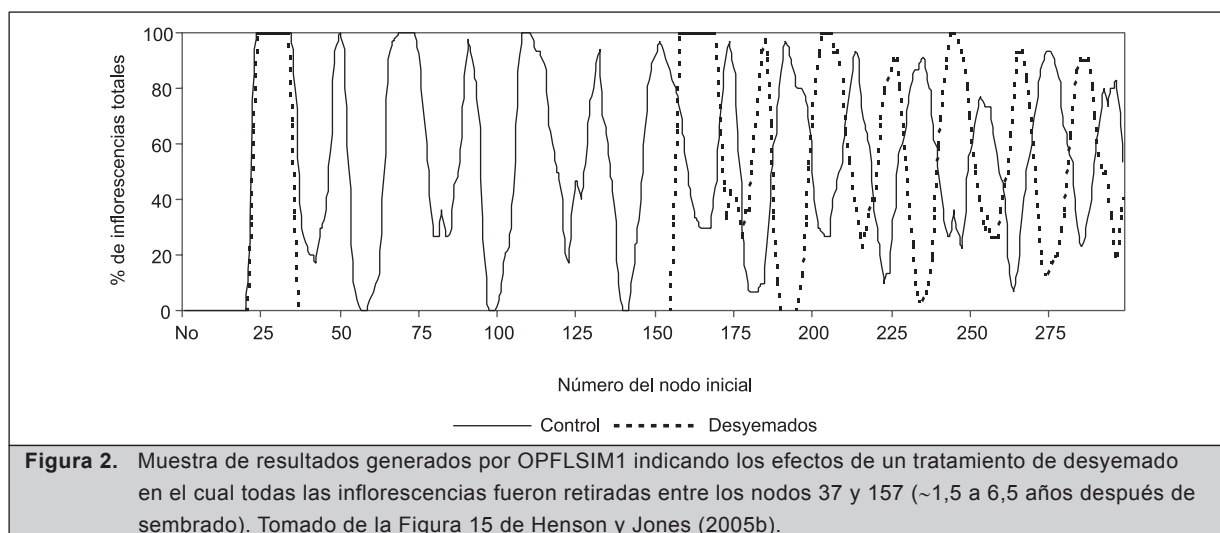
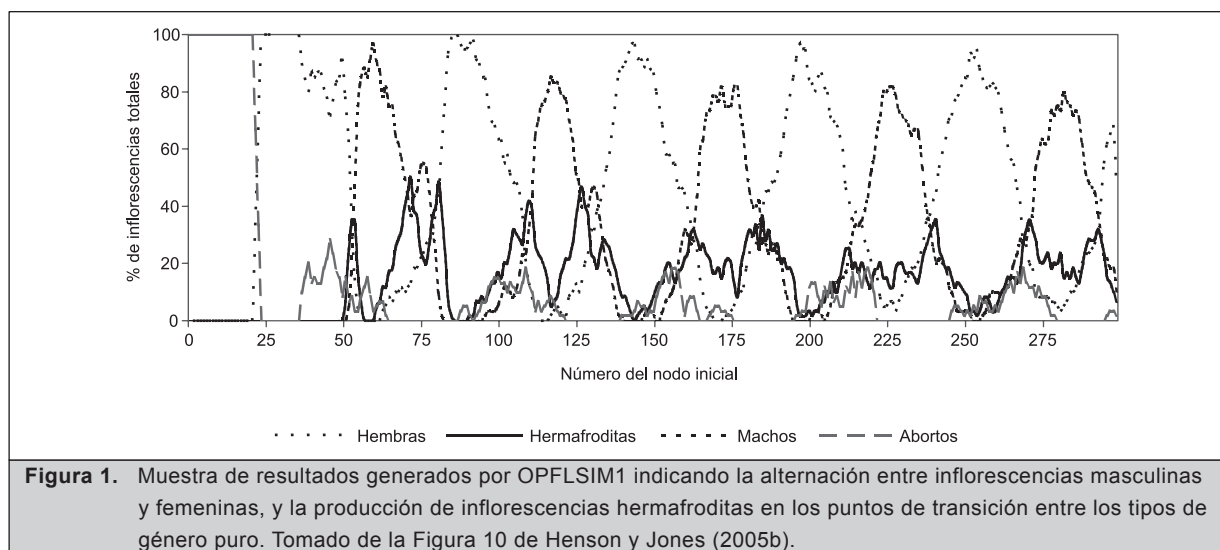
Pruebas sobre el desempeño de los modelos

OPFLSIM1

Al igual que el modelo de Jones (1997), OPFLSIM1 únicamente simula la floración de la palma de aceite y se encuentra restringido a la fase *estable* de crecimiento de mediano plazo de la palma de aceite, cuando las palmas producen un promedio de 24 hojas por año. Las características de comportamiento de la palma de aceite que son reproducidas en términos cualitativos por el modelo incluyen: la alternación de ciclos de machos y hembras; la ocurrencia de inflorescencias hermafroditas durante la transición entre ciclos de machos y hembras (Williams y Thomas, 1970) (Figura 1); los cambios de fase entre floración y producción que ocurren luego de retoñar (Figura 2), y la inducción de picos abortivos luego de podas intensivas de hojas (Figura 3).

Infortunadamente no se han encontrado ejemplos lo suficientemente bien documentados en la literatura

2. Este modelo utiliza sub-modelos sobre crecimiento y eco-fisiología de cultivos que se utilizan en OPRODSIM para calcular los inventarios y flujos de carbono, y generar proyecciones cuantitativas sobre el balance de carbono y el impacto sobre el calentamiento global de la producción de palma de aceite. Puesto que su intención primordial es calcular balances de C, no se hacen menciones adicionales sobre él en este trabajo.



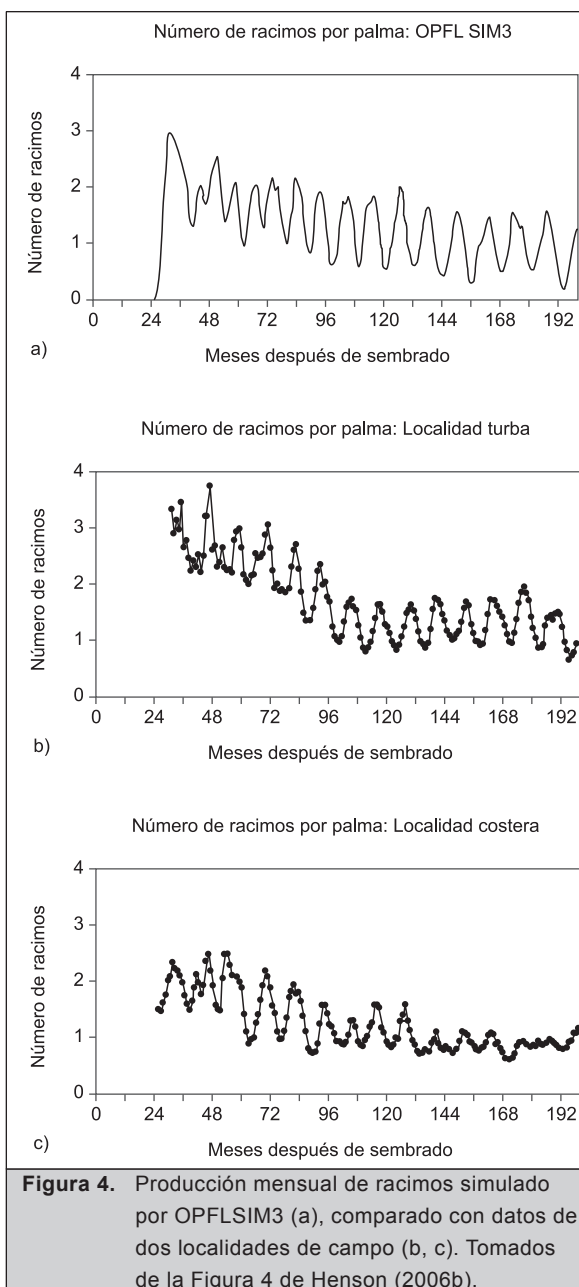
como para realizar un comparativo riguroso de los resultados del modelo OPFLSIM1. Sin embargo, los resultados sobre poda de hojas en general respaldan los de Jones (1997), quien recopiló datos de campo que parcialmente concuerdan con los resultados de su modelo.

OPFLSIM 2 y 3

Ambos modelos simulan la producción de racimos, y se pueden sacar resultados por nodo, mes o año, según se requiera. Dado que existen muchos ejemplos que muestran la variación mensual de la producción, es la información más fácil de obtener para comparar con los resultados del modelo. Aun así, los periodos que cubren los registros de campo para un cultivo en particular tienden a ser de duración limitada, de forma tal que la validación no se puede realizar extensivamente.

El problema de simular datos reales con los modelos es que la mayoría de los valores de los parámetros de campo que se requieren para correr los modelos (por ejemplo la fase de determinación de sexo y tasas de desarrollo de inflorescencia) son desconocidos o tienden a variar a lo largo del tiempo. Para lograr la concordancia entre los datos modelados y los observados, es necesario determinar estos valores por ensayo y error. Este método es poco satisfactorio en el mejor de los casos, pero ante la ausencia de alternativas sí ofrece un medio (Ludlow, 1993) para generar valores probables de los parámetros, los cuales posteriormente pueden ser investigados de manera experimental para verificar que sean cercanos a los esperados.

Con este enfoque se simularon los ciclos mensuales tanto de número de racimos como de producción total y se compararon con los datos de dos localidades de campo donde el déficit de agua en el suelo, lo que es frecuentemente la principal limitante externa a la producción, debería tener un efecto mínimo debido a la presencia de niveles freáticos permanentes (Figuras 4 y 5). Si bien los valores calculados por el modelo sobre los componentes de producción de racimos, es decir el número de racimos y el peso promedio de los racimos (los cuales, multiplicados, dan la producción total de racimos) fueron diferentes a los valores de campo, la producción total de raci-



mos de la localidad costera fue muy similar al valor calculado por el modelo (Tabla 1). Esto fue producto de la relación inversa entre el número de racimos y los pesos de los racimos individuales. Asimismo, el número de picos en el número racimos y la producción, y por tanto la duración de los ciclos, ofrecían buena congruencia en todos los casos. Como se indica en la Figura 6, la producción anual ofrece una mejor simulación que la producción mensual (Henson y Jones, 2005b).

Los resultados del OPFLSIM3 son iguales a los del OPFLSIM2 cuando se utilizan únicamente las opcio-

nes básicas. Sin embargo, el OPFLSIM3 ofrece varias opciones adicionales a las del OPFLSIM2 (Henson, 2006b), y una de ellas es la opción para simular la polinización y generar datos sobre formación de frutos. La Figura 7 muestra un comparativo entre los datos observados y modelados de formación de frutos. El nivel de congruencia fue bueno en dos de los casos, pero pobre en el tercero [Ver Henson (2007b) para detalles adicionales].

OPRODSIM

Este modelo permite simular el crecimiento y la producción de palma de aceite en una variedad de condiciones. Su capacidad para simular la producción anual de material vegetal seco, la producción de racimos y la producción de material seco total se puso a prueba con datos de tres localidades de campo utilizando los parámetros y opciones que se consideraban adecuados para cada localidad. Los resultados de estas pruebas se indican en las figuras 8, 9 y 10. En general hubo buena concordancia entre los datos reales y los simulados.

Una prueba más desafiante para el modelo consistió en simular condiciones ambientales, crecimiento del cultivo y producción para una localidad con estaciones secas en la zona peninsular norte de Malasia (Henson *et al.*, 2007). Esto involucraba también simular el suministro de agua en el suelo a largo plazo (Figura 11), junto con la evapotranspiración, produciendo estimados del crecimiento vegetal y producción de palma de aceite como se indica en la Tabla 2 y en la Figura 12.

Otros resultados de OPRODSIM se compararon con datos publicados durante el desarrollo y documentación del modelo, cuyos resultados se pueden consultar en otras fuentes (como Henson, 2006a, 2006c, 2007a, 2007b). En general, el OPRODSIM ofrece ma-

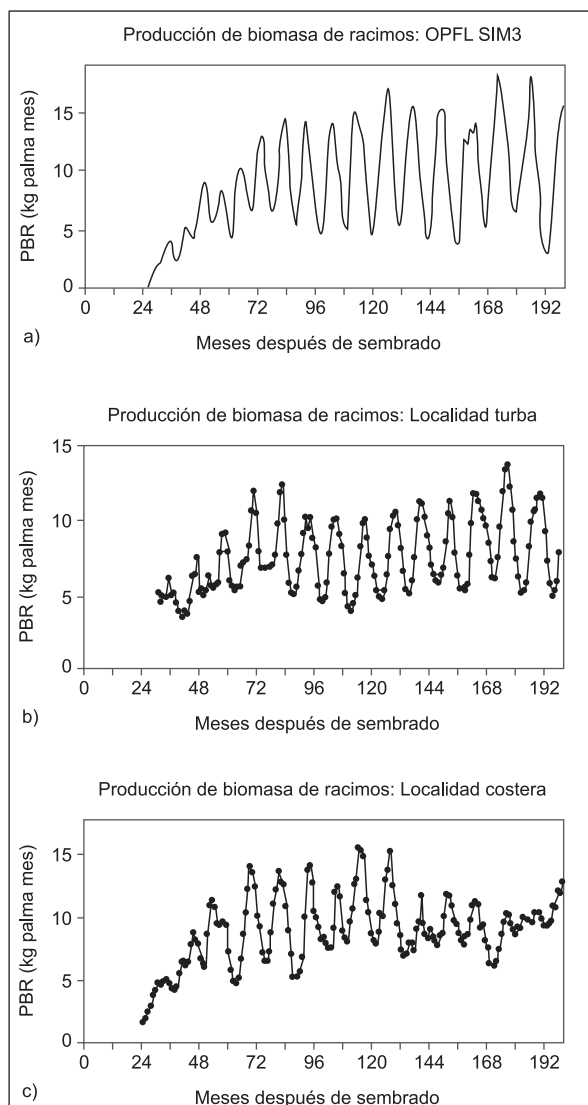
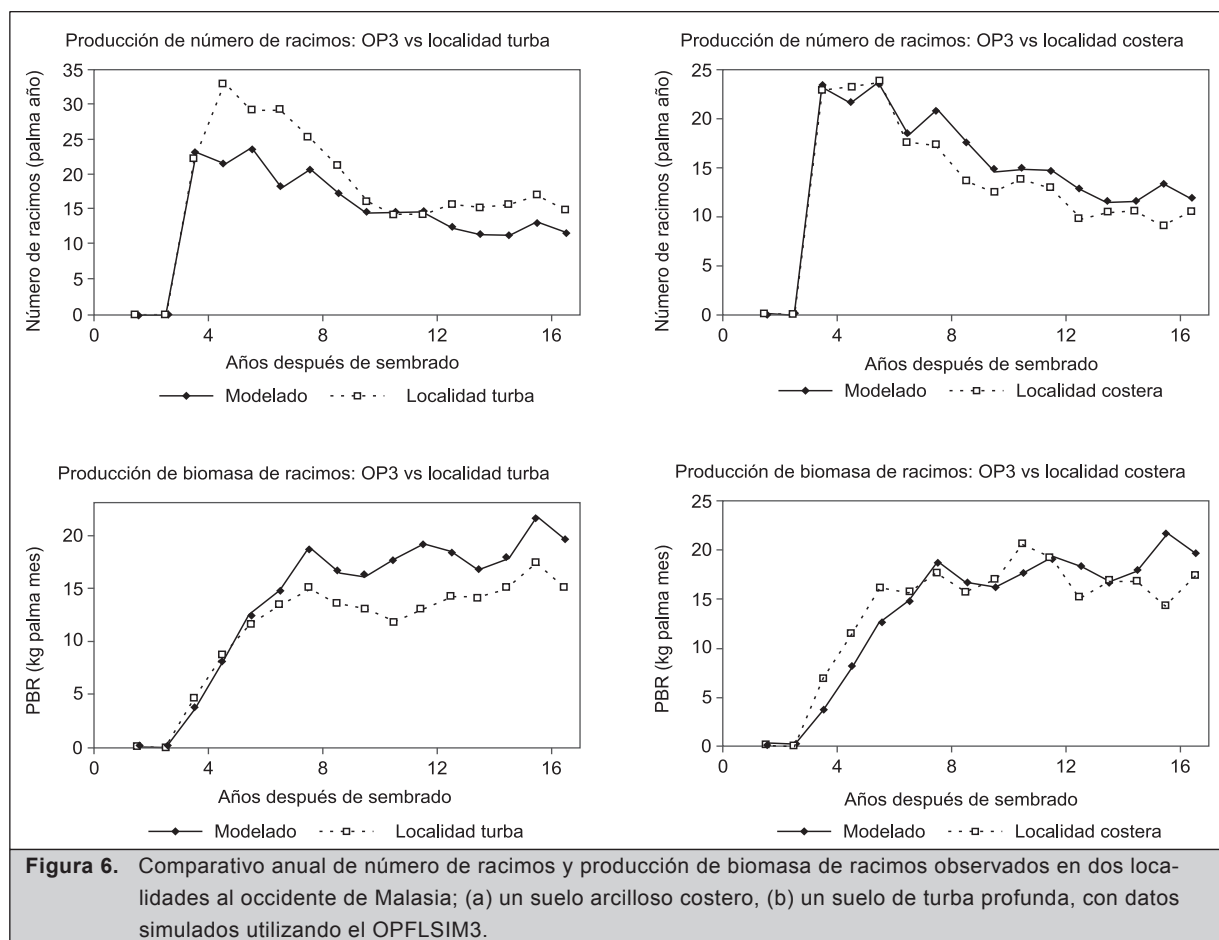


Figura 5. Producción mensual de biomasa por racimo simulado por OPFLSIM3 (a), comparado con datos de dos localidades de campo (b, c). Tomado de la Figura 5 de Henson (2006b).

Tabla 1. Comparativo de los componentes de la producción de racimos, la producción de racimos y la frecuencia de los ciclos de producción simulados utilizando el OPFLSIM3, con los resultados obtenidos en dos localidades de campo en Malasia¹

Caso	Número de racimos	Peso promedio de racimos	Producción de RFF (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Número de ciclos en:	
	(palma ⁻¹ año ⁻¹)	(kg)		Número de racimos	Producción de RFF
Modelo	16,2	14,63	30,9	15,5	15,5
Costero	14,4	16,77	30,6	15,0	15,0
Turba	20,4	9,27	25,1	15,0	15,5

1. Los datos son tomados de las figuras 4 y 5, y hacen referencia al periodo entre el mes 31 hasta el 200 después de sembrado.



por confiabilidad que los modelos OPFLSIM, debido a que los resultados del primero dependen menos de la información sobre las fechas de los procesos de desarrollo.

Aplicación de los modelos

La intención original de los modelos era la de servir como herramientas de investigación, para ofrecer un medio para sistematizar los conocimientos existentes, integrar los resultados de las investigaciones y señalar vacíos de información que se deben llenar por medio de investigaciones adicionales. Como tal, se pueden utilizar como guía y ayuda para el diseño e implementación de nuevos experimentos. En el caso de OPRODSIM, el modelo también ofrece un medio para establecer "ideotipos" de palma de aceite, es decir, palmas que presentan una combinación específica de características que se espera maximicen la producción (p.ej. Tabla 3). La especificación de ideotipos puede ser útil para los enfoques tanto

convencionales como biotecnológicos para el mejoramiento de cultivos.

Obviamente existe una necesidad de modelos que ofrezcan aplicaciones más comerciales. Algunas compañías de cultivos utilizan en la actualidad software de gestión para facilitar la toma de decisiones y la operación de los cultivos. También existen modelos agronómicos que ayudan a mejorar el manejo de nutrientes y aumentar la productividad (por ejemplo: Kee *et al.*, 1994). Sin embargo, aún estos modelos *prácticos* se deben utilizar e interpretar con precaución debido a que se deben contemplar tanto la historia del cultivo como las características de cada localidad.

Mediante la incorporación de parámetros específicos de la localidad, los modelos OPFLSIM3 y OPRODSIM permiten en algunos casos predecir la producción con una precisión razonable (Ej.: figuras 6d, 9a, 9b, 9c y 11). Sin embargo, no es realista suponer

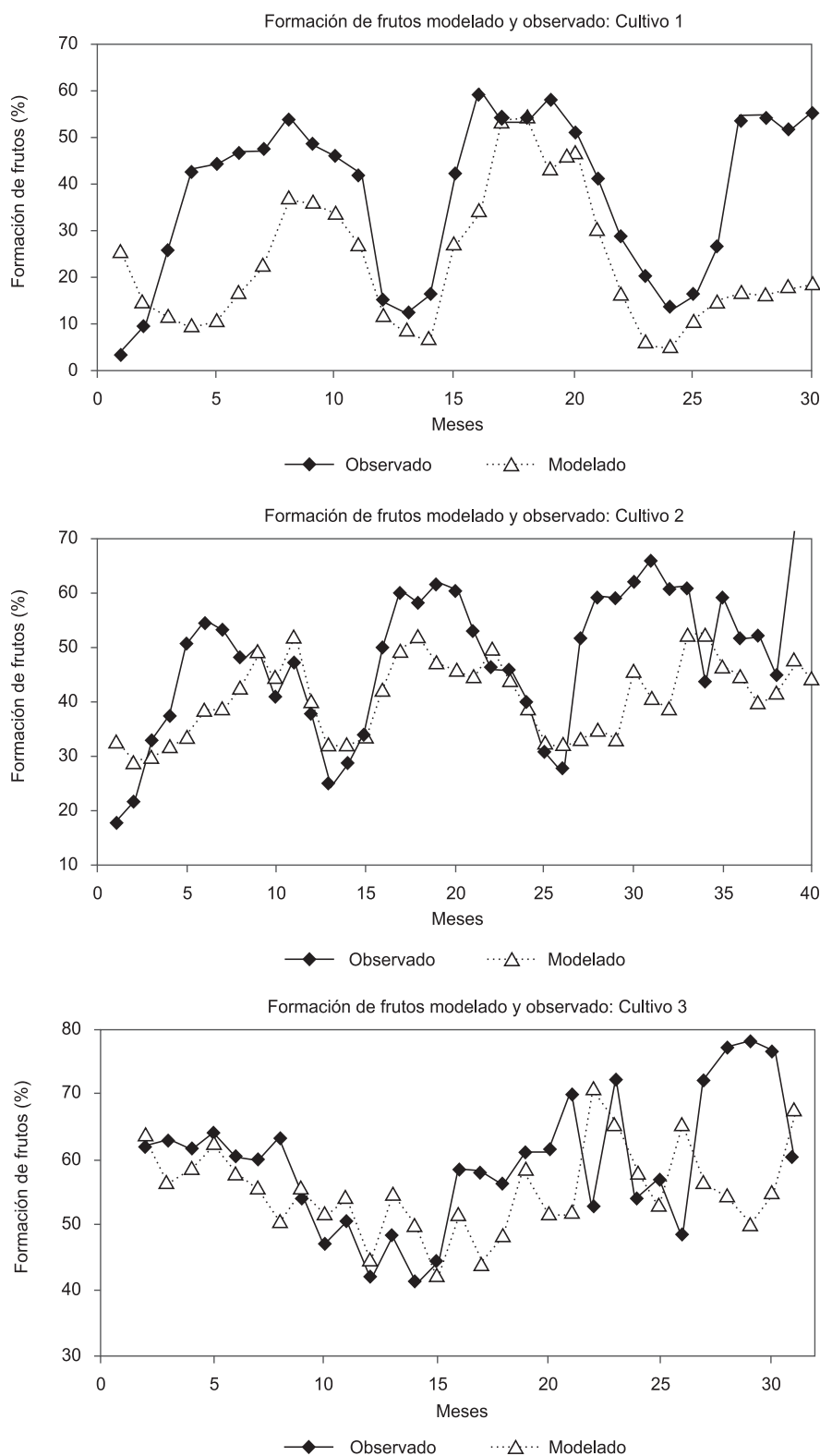
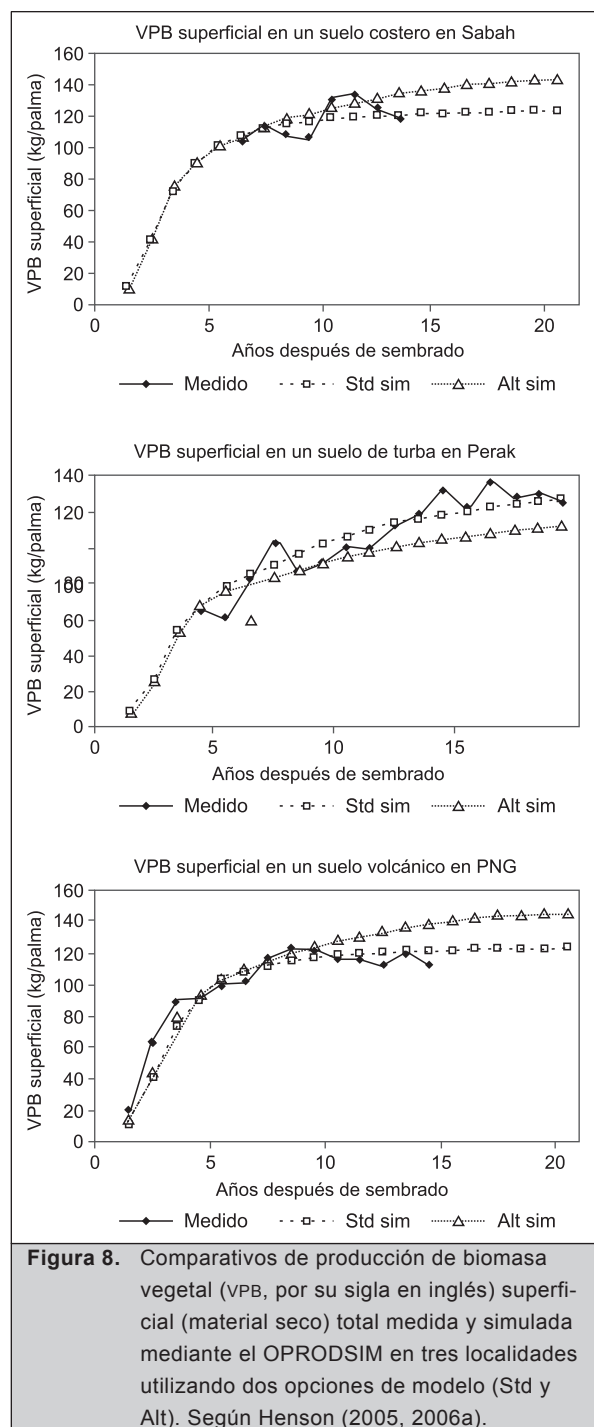
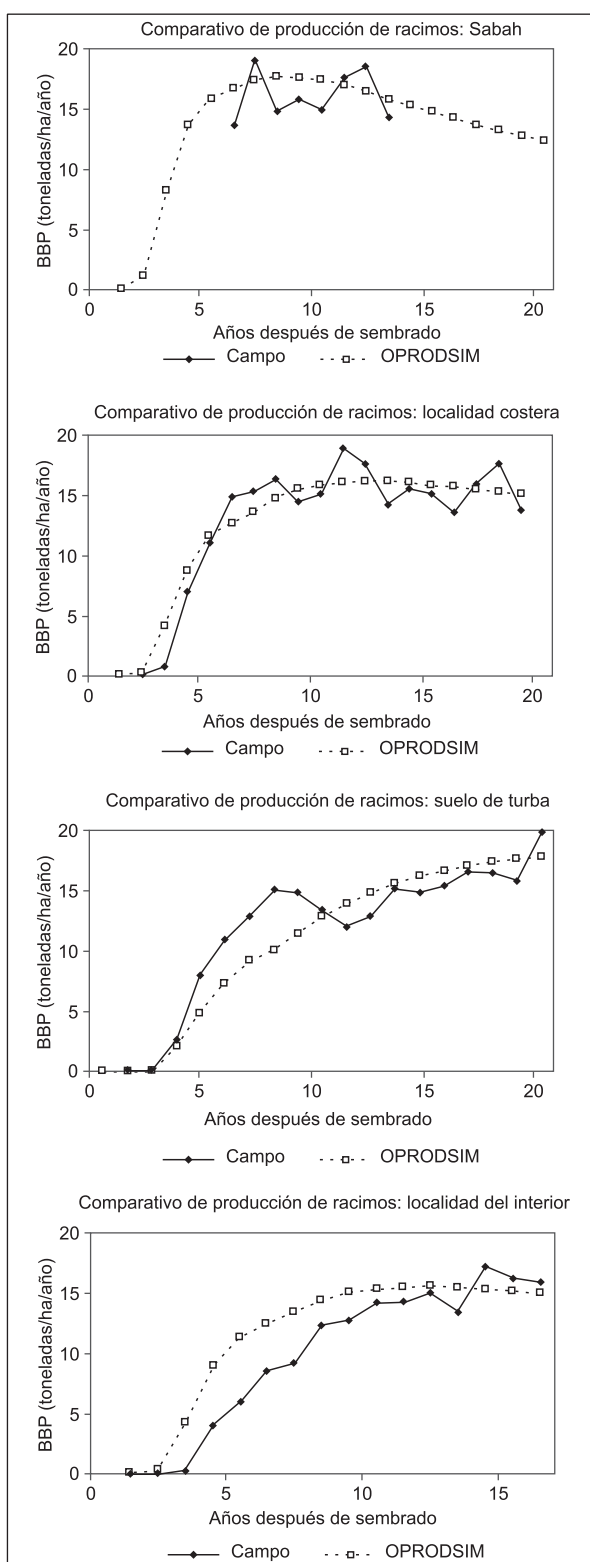


Figura 7. Niveles mensuales de formación de frutos observados en tres cultivos en Sabah, comparado con la formación de frutos simulada por la rutina de polinización en OPFLSIM3. Según la Figura 25 de Henson (2007b).



que un solo modelo pueda adaptarse adecuadamente a la enorme variedad de condiciones que se encuentran en las zonas cultivadoras de palma de aceite, inclusive dentro de un mismo cultivo, a pesar de que se incluyan factores específicos de la localidad y otras opciones como las que ofrece el OPRODSIM. Por tanto, es necesario ajustar el mode-



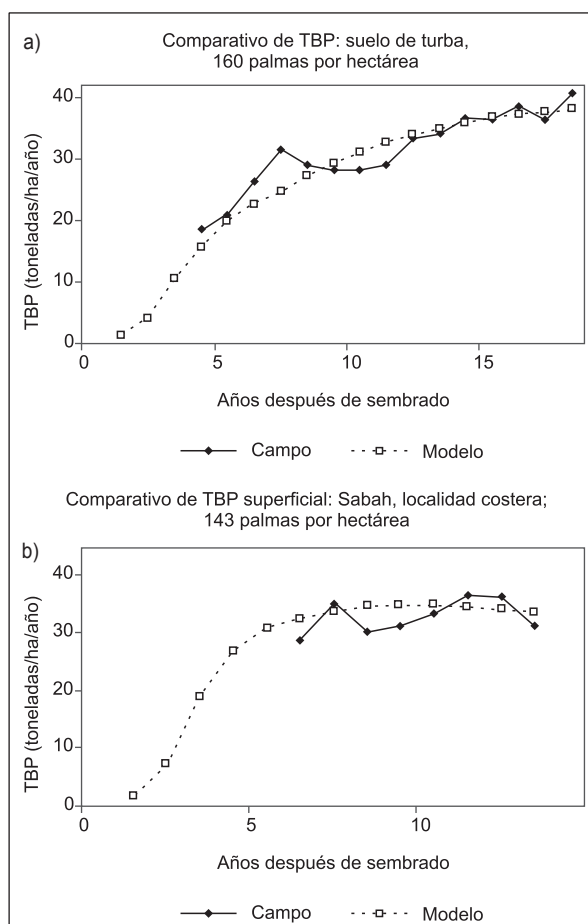
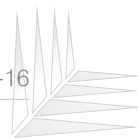


Figura 10. Comparativo de curvas de TBP para una localidad con suelo de turba (a) y de TBP superficial para una localidad costera en Sabah (b), medidos en el campo y simulados con OPRODSIM utilizando el método por defecto (Std) del modelo. Según Henson (2005).

lo a las condiciones específicas, lo cual requiere de algunos datos preliminares para ajustar las opciones del modelo.

Requerimientos futuros de datos

Se ha mencionado que uno de los beneficios del modelado es revelar la naturaleza y la importancia relativa de los vacíos y las incertidumbres en la información que se encuentra actualmente disponible. Cuando falta la información, es necesario utilizar supuestos que no siempre serán válidos, pero que se podrán corregir en versiones posteriores del modelo una vez se conozca la nueva información. Pero para obtener estos datos se requiere de nuevos experimentos.

Algunos aspectos son más importantes que otros, como lo muestran las pruebas de sensibilidad que se mencionaron anteriormente. Algunos, como ciertos parámetros de fotosíntesis, son muy difíciles de cuantificar debido a su variabilidad temporal y espacial y su alto grado de dependencia sobre factores ambientales. El espacio no nos permite realizar una discusión completa en esta oportunidad, aunque las necesidades más obvias son las de obtener mayores datos sobre los procesos de desarrollo, como la etapa de desarrollo de la determinación del sexo y las tasas de desarrollo de inflorescencia y la manera como estas varían según la edad y el genotipo de las palmas. La utilización de los modelos puede servir de guía para este proceso.

Tabla 2. Producción total de racimos de frutos frescos (RFF) registrados en una localidad con estaciones secas en Malasia durante los primeros seis años después de sembrado, comparada con la producción simulada por medio de OPRODSIM 1

	Tiempo de rezago ²	AWHC ³	Producción de RFF acumulada	
		mm	t ha ⁻¹	% de producción real
Medido	-	111	39,85	100,0
Modelado	Ninguno	111	31,65	79,4
		167	35,51	89,1
	1 año	111	33,83	84,9
		167	37,86	95,0
	2 años	111	39,17	98,3
		167	43,38	108,9

Notas: 1. Datos tomados de Henson *et al.* (2007).

2. El tiempo de rezago es el intervalo entre el cambio en las condiciones climáticas y su impacto sobre la producción en el modelo.

3. Capacidad disponible para retener agua en el suelo (una medida de almacenamiento de agua en el suelo, ya sea medida o supuesta).

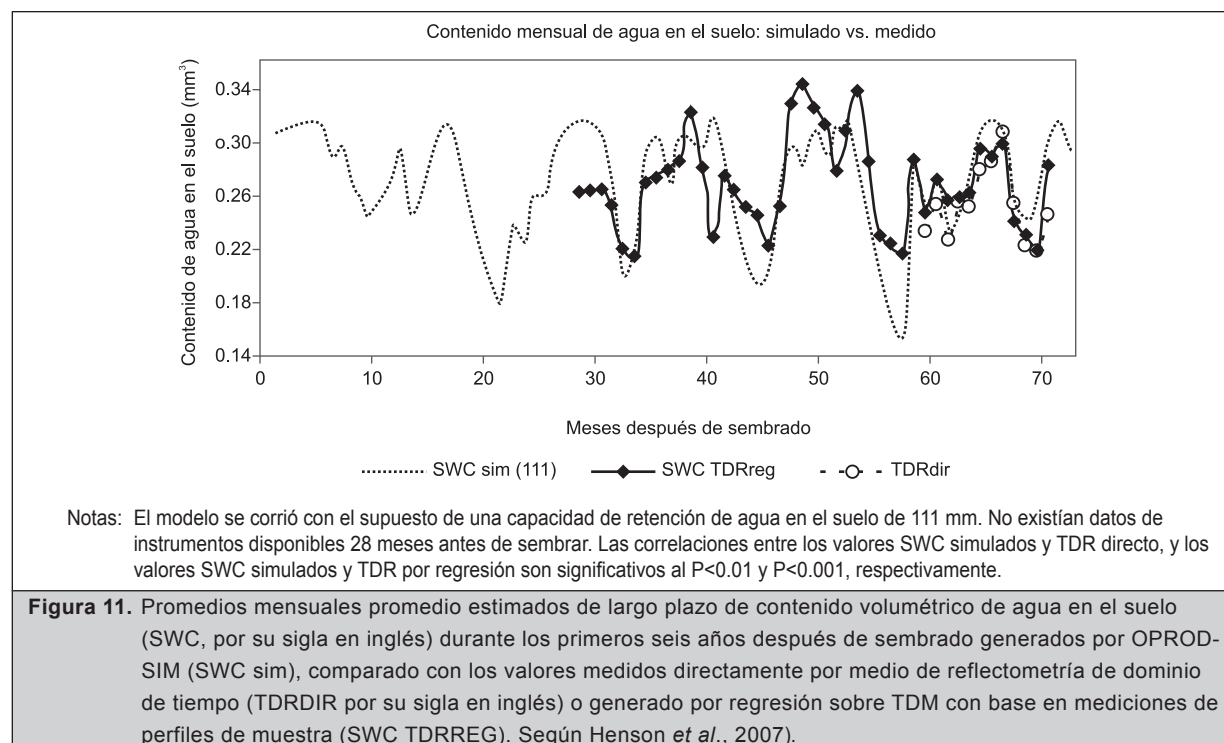


Tabla 3. Resumen de la importancia relativa de algunos factores morfológicos y fisiológicos para la producción de racimos según se determina mediante la utilización de OPROD-SIM¹

Impacto relativo sobre la producción ²	Factor principal	Sub-factor ³
Positivo y also (cambio >15%)	Captura de radiación	Área específica de la hoja (m ² kg ⁻¹) (método alternativo)
	Parámetros de fotosíntesis	Cantidad específica producida (mmol CO ₂ E ⁻¹)
		AMAX ⁴
	Biomasa de la hoja	Partición a las (método estándar)
Positivo - medio (>5%, <15%)	Captura de radiación	Peso de una hoja seca (método alternativo)
		Área específica de la hoja (m ² kg ⁻¹) (método estándar)
	Biomasa de la hoja	Coefficiente de extinción de copas (k)
		Peso de una hoja seca (método estándar)
Positivo – bajo (<5%)	Biomasa de la hoja	Número de hojas por palma
		Tasa de producción de hojas
	Biomasa de la raíz	Rotación de raíces (método estándar)
Neutral o negativo	Biomasa de la raíz	Rotación de raíces (método alternativo)
		Partición a las raíces
	Biomasa del tronco	Partición al tronco
	Crecimiento del racimo	Tiempo de desarrollo del racimo (días)

1. Adaptado de la Tabla 13 de Henson (2007a).

2. Los cambios de producción son aquellos inducidos por un incremento del 10% en cada factor sobre un valor por defecto.

3. Los términos “método alternativo” y “método estándar” hacen referencia a las dos principales opciones para la simulación de producción de material vegetal seco (Henson, 2006a).

4. Tasa máxima de asimilación fotosintética.

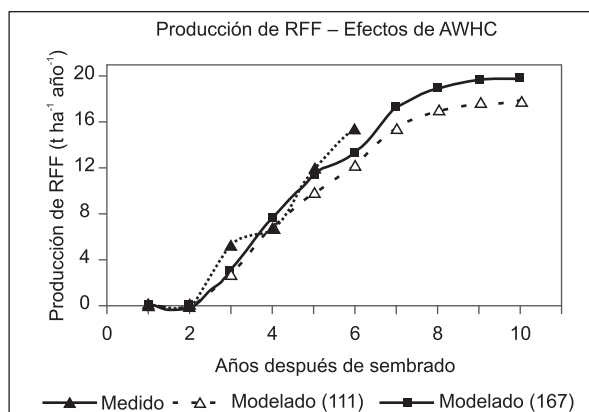


Figura 12. Comparativos de racimos de fruto fresco (RFF) reales (medidos) producidos y las producciones proyectadas en una localidad con estaciones secas con dos niveles de capacidad de retención de agua del suelo (AWHC, por su sigla en inglés). Tomado de Henson *et al.* (2007).

Agradecimientos

Nuestros agradecimientos para el Instituto de Investigación de la Palma de Aceite de Malasia y la Junta de Palma de Aceite de Malasia por su apoyo financiero.

Bibliografía

- Bonnot, F. 1995. Logiciel SIMPALM, note technique. Internal note, Cirad-cp, Biom 9/95-FB/GC. 7 pp. (Mencionado por Lamade y Setiyo, 1996).
- Caliman, JP.; Southworth, A. 1999. Effect of drought y haze on the performance of oil palm. In: Jatmika, A., *et al.* (editors) *Proceedings of 1998 International Oil Palm Conference: Commodity of the past, today y the future*. Iopri y Gapki, Bali, Indonesia. Pp 250-274.
- Dufrene, E. 1989. *Photosynthese, consommation en eau et modelisation de la production chez le palmier a huile* (Elaeis guineensis Jacq.). Doctoral Thesis, Universite de Paris-Sud Centre d'Orsay. 154 p.
- Gerritsma, W. 1988. *Simulation of oil palm yield*. Department of Theoretical Production Ecology, Wageningen Agricultural University. Report. 36 p.
- Henson, IE. 1989. Modelling gas exchange, yield y conversion efficiency. Paper presented at: *Workshop on Productivity of Oil Palm*. Porim, Bangi, Selangor, Malaysia. 27th May 1989. p.
- Henson, IE. 2000. Modelling the effects of 'haze' on oil palm productivity y yield. *Journal of Oil Palm Research*, 12: 123-134.
- Henson, IE. 2005. OPRODSIM, a versatile, mechanistic simulation model of oil palm dry matter production y yield. In: *Proceedings of PIPOC 2005 Agriculture, Biotechnology y Sustainability Conference*. Malaysian Palm Oil Board, Kuala Lumpur. 801-832.
- Henson, IE. 2006a. Modelling vegetative dry matter production of oil palm. *Oil Palm Bulletin*. 52: 25-47.
- Henson, IE. 2006b. OPFLSIM3 – an improved oil palm seasonal flowering y yield simulation model. *Oil Palm Bulletin* 53, 1-24.
- Henson, IE. 2006c. Measuring & modelling oil palm trunk growth. *Oil Palm Bulletin* 52: 1-24.
- Henson, IE. 2007^a. Modelling the effects of physiological & morphological characters on oil palm growth y productivity. *Oil Palm Bulletin* 54: 1-26.
- Henson, IE. 2007b. Modelling oil palm yield based on source y sink. *Oil Palm Bulletin*, 54: 27-51.
- Henson, IE.; Jones, L.H. 2005^a. OPFLSIM1 & 2: Seasonal oil palm flowering models based on endogenous mechanisms. In: *Proceedings of PIPOC 2005 Agriculture, Biotechnology y Sustainability Conference*. Malaysian Palm Oil Board, Kuala Lumpur. 772-800.
- Henson, IE.; Jones, L.H. 2005b. *Modelling flowering and seasonal yield cycles of oil palm. Simulation models for teaching and research*. Technical Manual. MPOB, 97 p.
- Henson, IE.; Zuraidah, Y.; Mohd Roslan, MN.; Mohd Haniff, H.; Tarmizi AM. 2007. Predicting soil water status, evapotranspiration, growth y yield of young oil palm in a seasonally dry region of Malaysia. *Journal of Oil Palm Research* 19: 398-415.
- Jones, L.H. 1997. The effects of leaf pruning and other stresses on sex determination in the oil palm and their representation by a computer simulation. *Journal of Theoretical Biology* 187: 241-260.
- Kee, KK.; Goh, KJ.; Chef, PS.; Tey, SH. 1994. An integrated site specific fertiliser recommendation system (INFERS) for high productivity in mature oil palms. In: *Management for enhanced profitability in plantations*. (ed K H Chee). Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur. 83-100.
- Lamade, E.; Setiyo, IE. 1996. Test of Dufrene's production model on two contrasting families of oil palm in North Sumatra. In: *Proceedings of 1996 PORIM International Palm Oil Congress. Agricultural Conference*. Palm Oil research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur. 427-435.
- Ludlow, AR. 1993. Modelling as a tool for oil palm research. In: *Proceedings of 1991 PORIM International Palm Oil Conference – Module 1. Agriculture*. Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur. 273-289.
- van Kraalingen, DWG. 1985. *Simulation of oil palm growth y yield*. Doctoral thesis. Wageningen Agricultural University. 106 p.
- van Kraalingen, DWG.; Breure, C.J.; Spitters, CJT. 1989. Simulation of oil palm growth y yield. *Agricultural & Forest Meteorology* 46: 227-244.
- Williams, CN.; Thomas, RL. 1970. Observations on sex differentiation in the oil palm, *Elaeis guineensis* L. *Annals of Botany* 34: 957-963.

Anexo

Algunos términos y definiciones

Aunque existen diversos tipos de modelos, en general se pueden clasificar en dos grupos: estadísticos y mecanísticos. Los modelos que se exponen en este documento son *mecanísticos* o de *procesos* y su intención es reflejar y *simular* procesos reales, ya sean físicos o fisiológicos, que ocurren en la naturaleza, y utilizar los resultados para predecir la producción de los cultivos u otras variables. En cambio, los modelos *estadísticos*, si bien se utilizan también para predecir la producción, lo hacen utilizando ecuaciones puramente empíricas donde se relaciona una variable con otra sin que exista necesariamente una relación de causalidad entre ellas. La medida en la que las predicciones reflejan la realidad puede variar, lo que genera la necesidad de realizar *pruebas de verificación* con el fin de comparar el desempeño del modelo con los datos observados.

Existen dos causas principales para la falta de coincidencia entre los datos modelados y los observados. O los valores o la naturaleza de los parámetros de entrada son incorrectos o la estructura del modelo es defectuosa. Es posible que se tenga que modificar uno o ambos para obtener un desempeño aceptable. La importancia relativa de los diversos parámetros de entrada se puede analizar por medio del *análisis de sensibilidad*. Este evalúa la medida en que los cambios en los parámetros de entrada individuales afectan un resultado seleccionado. Los parámetros que generan cambios relativamente grandes como

resultado de cambios pequeños en sus valores deben ser definidos con mayor precisión (al igual que los mecanismos asociados con ellos) que los que tienen efectos pequeños o insignificantes.

Los modelos mecanísticos pueden ser de tipo *determinista*, en cuyo caso el resultado de una serie de valores de entrada será el mismo cada vez que se corre el modelo, o *estocástico*, en cuyo caso cada corrida, a pesar de que usa los mismos valores de entrada, genera un resultado diferente debido al uso de procedimientos de aleatorización dentro del modelo. Los modelos OPFLSIM son estocásticos, mientras que el OPRODSIM es determinista.

Los modelos de producción de cultivos pueden estar *basados en la fuente* –en cuyo caso la producción depende únicamente de la disponibilidad de los productos asimilados por medio de los tejidos fotosintéticos (la fuente)– o *basados en el efecto sumidero*, donde la producción depende del número y capacidad de asimilación de los sumideros (órganos que principalmente reciben pero que no producen ellos mismos asimilaciones). Los modelos más realistas seguramente son los que combinan ambos aspectos. OPSIM, SIMPALM, GPHOT y las primeras versiones de OPRODSIM eran modelos basados en fuentes, mientras que los modelos OPFLSIM están basados en efecto sumidero. La última versión de OPRODSIM permite determinar la producción tanto por medio de capacidad de sumidero y de fuente.