

Brechas de rendimiento en el cultivo de palma de aceite: una revisión cuantitativa de factores determinantes*

Yield Gaps in Oil Palm: A Quantitative Review of Contributing Factors

CITACIÓN: Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2018). Brechas de rendimiento en el cultivo de palma de aceite: una revisión cuantitativa de factores determinantes (Carlos Arenas, trad.). *Palmas*, 39(1), 16-68.

PALABRAS CLAVE: aceite de palma, perenne, rendimiento, intensificación, fisiología, manejo.

KEYWORDS: Palm oil, perennial, yield, intensification, physiology, management.

* Artículo traducido y editado a partir del original *Yield Gaps in Oil Palm: A Quantitative Review of Contributing Factors*, publicado en la revista *European Journal of Agronomy* Número 83 de 2017, disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>.

Se publica con autorización de los autores, la revista *European Journal of Agronomy* y la casa editorial Elsevier, de acuerdo con los términos de la licencia CC BY 4.0 de Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

LOTTE S. WOITTEZ
Wageningen University, Países Bajos
lotte.woittiez@wur.nl

MARK T. VAN WIJK
International Livestock Research
Institute (ILRI), Kenia

MAJA SLINGERLAND
Wageningen University, Países Bajos

MEINE VAN NOORDWIJK
Wageningen University, Países Bajos
World Agroforestry Centre (ICRAF).
Oficina Regional para el Sudeste
Asiático, Indonesia

KEN E. GILLER
Wageningen University, Países Bajos

Resumen

La palma de aceite, actualmente el principal cultivo oleaginoso del mundo, se caracteriza por su alta productividad y un prolongado ciclo de vida (≥ 25 años). Este cultivo ha alcanzado picos de rendimiento de 12 t aceite/ha/año en pequeñas plantaciones y su máximo rendimiento teórico (calculado mediante modelos de simulación) es de 18,5 t aceite/ha/año. No obstante, la productividad promedio se ha estancado en aproximadamente 3 t de aceite/ha/año. Considerando la posible expansión de este cultivo hacia zonas ocupadas por valiosos ecosistemas de bosque húmedo tropical, es importante comprender los factores que influyen en la generación de brechas de rendimiento con el fin de abordarlos eficientemente. En este artículo de revisión se presenta una visión general de los datos disponibles sobre los factores que determinan, limitan

y reducen la productividad del cultivo; los efectos de dichos factores sobre el rendimiento del cultivo, de acuerdo con mediciones realizadas en estudios de caso o calculadas mediante modelos de computador; y de los mecanismos fisiológicos subyacentes a esta planta. Para ello, se identifican cuatro niveles de productividad: rendimiento potencial, rendimiento bajo condiciones de déficit hídrico, rendimiento con déficit nutricional y rendimiento real. El rendimiento potencial durante la vida útil del cultivo es determinado por la radiación fotosintéticamente activa (RFA), la temperatura, la concentración de CO₂ atmosférico y el material de siembra (suponiendo condiciones óptimas en el establecimiento del cultivo), la densidad de siembra (120-150 palmas/ha), el manejo de la poda (30-60 hojas, dependiendo de la edad de la planta), la polinización de las inflorescencias y la eficiencia en la etapa de cosecha. Lo resultados de esta revisión indican que la productividad en entornos con déficit hídrico de > 400 mm/año puede ser menor a un tercio del rendimiento potencial, dependiendo de factores adicionales tales como la temperatura, la velocidad del viento y la textura y la profundidad de los suelos. Además, la literatura ha reportado disminuciones de 50 % en el rendimiento potencial del cultivo cuando no se realiza la aplicación de nitrógeno y/o potasio. Así mismo, se advierte que el rendimiento real del cultivo de palma se ve limitado por factores tales como la presencia de vegetación no apta para el cultivo, la incidencia de plagas y enfermedades, las cuales pueden reducir las cifras de productividad a cero en casos severos de afectación fitosanitaria. Adicionalmente, la literatura señala que los pequeños productores se enfrentan a limitantes particulares, tales como el uso de semillas falsificadas y problemas con el uso de fertilizantes. Se concluye de la información analizada que el cierre de las brechas de productividad en los cultivos ya establecidos podría incrementar la producción mundial a razón de 15-20 millones de toneladas de aceite por año, lo cual mitigaría la necesidad de ampliar el área sembrada a nivel mundial. Sin embargo, lograr incrementos en la productividad actual y futura bajo parámetros de sostenibilidad, supone la correcta comprensión y abordaje de todos los factores que determinan la eficiencia de este cultivo.

Abstract

Oil palm, currently the world's main vegetable oil crop, is characterized by a large productivity and a long life span (≥ 25 years). Peak oil yields of 12 t ha/yr have been achieved in small plantations, and maximum theoretical yields as calculated with simulation models are 18.5 t oil ha/yr, yet average productivity worldwide has stagnated around 3 t oil ha/yr. Considering the threat of expansion into valuable rainforests, it is important that the factors underlying these existing yield gaps are understood and, where feasible, addressed. In this review, we present an overview of the available data on yield-determining, yield-limiting, and yield-reducing factors in oil palm; the effects of these factors on yield, as measured in case studies or calculated using computer models; and the underlying plant-physiological mechanisms. We distinguish four production levels: the potential, water-limited, nutrient-limited, and the actual yield. The potential yield over a plantation lifetime is determined by incoming photosynthetically active radiation (PAR), temperature, atmospheric CO₂ concentration and planting material, assuming optimum plantation establishment, planting density (120-150 palms per hectares), canopy management (30-60 leaves depending on palm age), pollination, and harvesting. Water-limited yields in environments with water deficits > 400 mm/yr can be less than one-third of the potential yield, depending on additional factors such as temperature, wind speed, soil texture, and soil depth. Nutrient-limited yields of less than 50% of the potential yield have been recorded when nitrogen or potassium were not applied. Actual yields are influenced by yield-reducing factors such as unsuitable ground vegetation, pests, and diseases, and may be close to zero in case of severe infestations. Smallholders face particular constraints such as the use of counterfeit seed and insufficient fertilizer application. Closing yield gaps in existing plantations could increase global production by 15-20 Mt oil/yr, which would limit the drive for further area expansion at a global scale. To increase yields in existing and future plantations in a sustainable way, all production factors mentioned need to be understood and addressed.

Introducción

La palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) es originaria de las tierras bajas de África occidental. La presencia de esta planta es poco común en bosques primarios, pero crece de manera exuberante en entornos húmedos como pantanos y rondas de ríos, donde la luz del sol es abundante y hay disponibilidad de agua durante todo el año (Zeven, 1967). La palma de aceite hace parte de la familia de palmas monocotiledóneas (*Areaceae*). Su tronco contiene un único punto terminal de crecimiento del cual aparecen hojas en doble espiral y en intervalos regulares (Rees, 1964). Cada hoja soporta solo una inflorescencia, la cual puede ser masculina o femenina. El producto cosechado es un racimo de fruto compuesto por entre 1.500 y 2.000 frutos. El aceite de palma crudo se extrae del mesocarpio de dichos frutos, mientras que el aceite de palmiste se obtiene de la almendra del fruto.

Durante los últimos 100 años la palma de aceite pasó de ser un cultivo agroforestal de pequeños productores a convertirse en el cultivo agroindustrial de aceite vegetal más importante del mundo. Se estima que la producción mundial de aceite de palma crudo (APC) es de 63 millones de toneladas por año, lo que equivale a 36 % de la producción mundial de aceites vegetales (USDA, 2014). Por otro lado, la expansión de este cultivo ha sido asociada como factor determinante de la tasa de deforestación de países como Indonesia (Carlson *et al.*, 2012; Stibig *et al.*, 2014) y Malasia (Miettinen *et al.*, 2011; Stibig *et al.*, 2014); aunque factores como la tala de bosques también ha jugado un papel importante (Lambin *et al.*, 2001; Laurance, 2007). Sobre el tema, es probable que la creciente demanda mundial de aceite de palma durante las próximas décadas sea cubierta tanto con una expansión del área sembrada como a través de incrementos en la productividad (Carter *et al.*, 2007; Corley, 2009).

Considerando que la expansión del cultivo de palma de aceite podría conllevar al desplazamiento de bosques tropicales de gran biodiversidad (Gaveau *et al.*, 2014), las estrategias más convenientes para satisfacer la demanda global de aceite de palma son la obtención de mayores cifras de productividad junto con una expansión del área de siembra hacia zonas previamente degradadas o intervenidas (Fairhurst &

McLaughlin, 2009). Aumentar la productividad del cultivo no lleva, *per se*, a una reducción en las tasas de deforestación, a menos que se implementen políticas de apoyo adecuadas (Angelsen, 2019), por lo que esta medida se convierte además en un paso necesario para reducir la presión que ejerce la palmicultura sobre el suelo. Por lo anterior, se hace urgente contar con una comprensión y cuantificación robusta de los diferentes factores de producción que influyen en la productividad del cultivo, a fin de estimar el alcance de los programas en curso orientados a incrementar la productividad del cultivo y de los proyectos de siembra y renovación de siembras.

El análisis de brechas de productividad se ha utilizado comúnmente como una herramienta para explorar posibilidades de aumentar la eficiencia en el uso del suelo (Lobell *et al.*, 2009; van Ittersum *et al.*, 2013; ver también www.yieldgap.org). Una “brecha de productividad” se define como la diferencia entre el rendimiento potencial y el real (van Ittersum & Rabbinge, 1997), en el que el “rendimiento potencial” es el límite superior de la productividad por hectárea. Dicho rendimiento potencial es el rendimiento teórico esperado bajo condiciones óptimas de temperatura, concentración de CO₂ atmosférico y radiación fotosintética activa (RFA), así como bajo el supuesto de un manejo agronómico adecuado, sin limitantes relacionadas con el suministro de agua y nutrientes, o la incidencia de plagas y/o enfermedades (van Ittersum & Rabinage, 1997).

La literatura reporta la realización de análisis de brechas de productividad para cultivos de ciclo corto como el trigo (Aggarwal & Kalra, 1994; Anderson, 2010; Bell *et al.*, 1995), la yuca (Fermont *et al.*, 2009), el arroz (Laborte *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2008), y en distintos tipos de cereales (Neumann *et al.*, 2010). Además, un número limitado de sistemas de cultivos perennes ha sido sometido a este tipo de análisis, entre los que se incluyen el café (Wairegi & Austen, 2012), el banano (Wairegi *et al.*, 2010) y el cacao (Zuidema *et al.*, 2005).

Los cultivos perennes como la palma de aceite son estructuralmente diferentes a los cultivos de ciclo corto desde múltiples perspectivas. En los cultivos de ciclo corto los productores pueden aprovechar las semillas nuevas en cada temporada de crecimiento. En contraste, el potencial de rendimiento de los cultivos perennes, con una esperanza de vida de hasta

varias décadas, es fijo para cada ciclo de siembra. Ciertos eventos que ocurren temprano en la vida de una plantación, especialmente durante la fase de vivero y siembra, pueden tener efectos considerables sobre el rendimiento del cultivo en los años siguientes, lo cual dificulta la interpretación de información (Breure & Menéndez, 1990). Adicionalmente, los racimos de fruto fresco (RFF) de palma de aceite tardan varios años en desarrollarse, a lo que se suma un retraso de entre 20 y 30 meses entre la ocurrencia de factores de estrés en la palma y su posterior manifestación en la productividad del cultivo. Estas variables dificultan la categorización y cuantificación de los efectos de factores individuales que generan impactos en el cultivo y su productividad (Adam *et al.*, 2011).

Algunos datos cuantitativos sobre la respuesta en el rendimiento de la palma de aceite a diferentes factores de producción, incluyendo la densidad de siembra, la irrigación y el uso de fertilizantes, están disponibles en pruebas realizadas por compañías o centros de investigación. Los resultados de muchas de estas pruebas han sido reportados únicamente en la literatura gris y pueden ser de difícil acceso. Sin embargo, Corley & Tinker (2006) presentan una visión general robusta sobre el tema. Recientemente, Fairhurst & Griffiths (2014) realizaron un análisis de brechas de productividad en palma de aceite desde la perspectiva práctica de los agricultores, generando una guía paso a paso para la identificación y resolución de limitaciones al rendimiento del cultivo. Sin embargo, esta propuesta carece de una evaluación de las causas subyacentes a las brechas de productividad de los sistemas de producción de palma de aceite a nivel mundial.

En la presente propuesta exploramos el conocimiento existente sobre la productividad del cultivo de palma de aceite desde una perspectiva fisiológica, con el fin de presentar un panorama detallado de los factores que contribuyen a la generación de brechas de productividad en este cultivo. Para empezar, se presenta una discusión sobre el ciclo de vida del cultivo, el crecimiento vegetativo y el desarrollo del área foliar de la palma. Luego se presenta una evaluación detallada de la producción de racimos enfocada en el número y peso de los mismos, los cuales son dos de los principales factores determinantes de productividad. Posteriormente se analiza el concepto de brecha de productividad y los diferentes niveles de producción

(es decir, rendimiento potencial, rendimiento con déficit hídrico, rendimiento con déficit nutricional y rendimiento real), y se discuten los diferentes factores que afectan la productividad de la palma de aceite, entre los que se incluyen variables climáticas y nutricionales, así como la incidencia de plagas y enfermedades. Seguido, se analizan las limitantes más importantes en términos de productividad en las regiones productoras de palma de aceite del mundo, con un enfoque tanto hacia los modelos comerciales a gran escala como a los de pequeños productores. Por último, en el apartado final se abordan los vacíos existentes en el conocimiento sobre el tema y se presenta una propuesta para la ejecución de acciones y la realización de trabajos de investigación a futuro.

Ciclo de vida y crecimiento vegetativo de la plantación

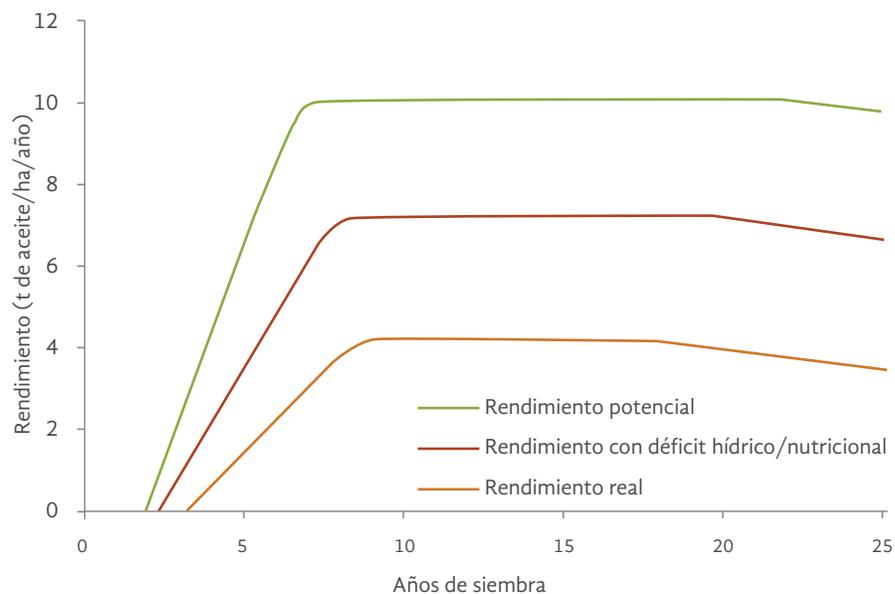
En esta sección discutiremos el sistema de producción de la palma de aceite y los diferentes perfiles de rendimiento durante el ciclo de vida y el crecimiento vegetativo de la planta, con énfasis en el desarrollo del área foliar.

Ciclo de vida de un cultivo

Los cultivos comerciales de palma de aceite hacen parte de sistemas de plantaciones con una densidad de entre 120-150 palmas por hectárea. Las semillas pregerminadas se siembran en bolsas de polietileno que permanecen en un vivero por un periodo de 6-12 meses (Rankine & Fairhurst, 1999a), luego del cual las plántulas son dispuestas en campo con una densidad final y con opciones limitadas de ser reemplazadas en caso de que no sobrevivan o muestren propiedades menos favorables. Las plantaciones tienen un ciclo de vida de 25 años, aproximadamente. De acuerdo con la literatura existen cuatro fases de productividad (Figura 1): la primera de estas es la “fase de construcción” o etapa inmadura (*yield building phase*), que se extiende hasta los 2 o 3 años después de siembra y en la cual el cultivo no genera fruto que pueda ser cosechado; la segunda fase es la etapa joven madura o “fase de ascenso rápido del rendimiento” (*steep ascent yield phase*), que va de los 4 a los 7 años después de la siembra, en la cual la producción de fruto aumenta de

Figura 1. Desarrollo del rendimiento de la palma de aceite en el tiempo en tres plantaciones hipotéticas* (con base en Fairhurst & Griffiths, 2014; Goh *et al.*, 1994; Ng, 1983).

* Se muestra el progreso del rendimiento en diferentes niveles de productividad: rendimiento real (promedio de 3,5 t aceite ha/año); rendimiento con déficit hídrico/nutricional (promedio de 6,1 t aceite ha/año); y rendimiento potencial (promedio de 8,9 t aceite ha/año), evidenciando un gran vacío entre los tres niveles.



manera exponencial; la siguiente fase se conoce como la etapa madura o etapa de producción y se extiende de los 8 a los 14 años después de la siembra; por último, la fase final es la de la reducción de la producción y ocupa los últimos 10 años del ciclo productivo de 25 años, es decir del año 15 al 25 (Fairhurst & Griffiths, 2014; Goh *et al.*, 1994; Ng, 1983).

El primer año de cosecha, por lo general, resulta en una producción de 10-15 t RFF/ha (con una relación de aceite a racimo de 10-15 %) bajo condiciones favorables, aunque algunos trabajos reportan la obtención de producciones iniciales de 20 t RFF/ha en plantaciones comerciales (Rao *et al.*, 2008). Bajo condiciones óptimas la producción de racimos alcanza un pico entre 6-7 años después de la siembra, con producciones de 35 t RFF/ha (Donough *et al.*, 2009; Ng, 1983). Se han reportado producciones máximas de 35 t RFF/ha empleando materiales genéticos seleccionados a través de procesos de clonación (Ng *et al.*, 2003). Durante la etapa madura la producción de racimos se estabiliza un poco por debajo del pico, con rendimientos de 25-30 t RFF/ha en plantaciones con buen manejo agronómico (Donough *et al.*, 2010; Ng, 1983). De otro lado, en la fase final del ciclo del cultivo la tasa de producción de hojas y el número de racimos se reduce, situación que es parcialmente compensada con un mayor tamaño de racimos (Goh

et al., 1994; Hardon *et al.*, 1969; Jacquemard & Baudouin, 1998). La palma de aceite continúa produciendo racimos hasta su muerte, pero se hace necesario resembrar después de 20 o 25 años, puesto que las palmas alcanzan una altura en la que la recolección del fruto no es viable en términos económicos, y debido a que la incidencia de plagas y enfermedades incrementa con la edad.

Crecimiento vegetativo

La producción anual promedio de materia seca por hectárea en palmas maduras (> 10 años de siembra) con densidad de siembra entre 120 y 125 palmas/ha varía entre 19 t de materia seca ha/año en Nigeria (Rees & Tinker, 1963) y 39 t ha/año en Malasia (Corley *et al.*, 1971a). La producción de materia seca puede describirse por medio de la siguiente ecuación:

$$PMS = RFA \times f \times RUE \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde *PMS* = producción de materia seca (kg/m²/año); *RFA* = radiación fotosintéticamente activa anual (MJ/m²/año; 50 % del total de radiación solar entrante [Monteith, 1972]); *f* = fracción de la radiación interceptada por el dosel arbóreo; y *RUE* = eficiencia del uso

de radiación ($\text{kg}/\text{DM}/\text{MJ PAR}$) (Corley, 2006; Monteith, 1977). Los valores estimados de RUE son entre 0,6 y 1,3 g MJ PAR (Rees & Tinker, 1963; Squire 1986; Squire & Corley, 1987), sin embargo, estos se reducen en climas secos y en suelos poco fértiles, e incrementan con el uso de fertilizantes (aumento de 15-30 % en respuesta a la aplicación de N, P, K) (Squire, 1986). La interceptación de la radiación depende principalmente del índice de área foliar (IAF), es decir, el área de las hojas por el área de superficie (m^2); aunque la orientación de las hojas respecto al ángulo de la luz puede modificar la interceptación efectiva. El IAF aumenta linealmente desde el momento de siembra en sitio hasta los 5-6 años y llega a su pico máximo cerca a los 10 años, cuando las hojas alcanzan su mayor tamaño (Gerritsma & Soebagyo, 1999). Por lo general, el IAF máximo varía entre 4 y 6, dependiendo del genotipo (Breure, 2010; Gerritsma & Seebagyo, 1999), factores del entorno (Corley *et al.*, 1973), la densidad de siembra (Corley *et al.*, 1973; Gerritsma & Soebagyo, 1999), la labor de poda (Squire & Corley, 1987), el uso de fertilizantes (Breure, 1985; Corley & Mok, 1972), y un buen manejo agronómico. En plantaciones en las que no se remueven las hojas viejas el IAF puede ser mayor a 10 (Squire & Corley, 1987). Con un IAF de 4,5 la interceptación de la PAR es al menos de 80 %, llegando a 90-95 % con un IAF de 6-7 (Breure, 1988; Gerritsma, 1988). Los rendimientos disminuyen cuando el IAF supera un valor de 6 debido a la competencia entre palmas por mayor espacio (Breure, 2010).

En plantaciones de mayor antigüedad gran parte de la biomasa está contenida en el estípite (Rees & Tinker, 1963). De una producción primaria bruta estimada de 160 t de materia seca ha/año en palmas de 10 años de edad en Malasia, cerca de 70 t fueron atribuidas a la correcta respiración del estípite, la raíz y el raquis, y 55 t a la respiración del follaje, resultando en una producción de materia seca de 30-35 t ha/año (Corley, 1976b). Henson & Chai (1997) mencionaron algunos estimados de biomasa obtenidos en diferentes estudios experimentales, los cuales dieron como resultado cifras entre 9 t/ha (Corley *et al.*, 1971a) y 20 t/ha (Teoh & Chey, 1988) en plantaciones con siembras de 15 años. En condiciones sin limitaciones de agua, cerca de 10-12 % de los asimilados se encuentran en las raíces (Henson & Chai, 1997). Sin embargo, bajo

condiciones de déficit hídrico, la asignación de asimilados a las raíces puede ser de hasta 35 % (Dufrène *et al.*, 1990; van Noordwijk *et al.*, 2015).

En palmas en edad productiva con una densidad estándar, entre 45 y 50 % de la producción de biomasa superficial es atribuida al crecimiento generativo (inflorescencias masculinas y femeninas y racimos [Corley *et al.*, 1971b]). Se ha propuesto que la asignación de asimilados a inflorescencias y racimos no ocurrirá hasta que se satisfagan las demandas de producción vegetativa (el modelo de “desbordamiento” propuesto por Corley *et al.*, 1971b). No obstante, investigaciones posteriores han demostrado que tanto el crecimiento vegetativo como el crecimiento generativo tienen limitaciones de fuentes y que existe competencia entre los diferentes sumideros, aunque se da prioridad al crecimiento vegetativo (Corley & Tinker, 2016).

Desarrollo del fruto

Durante el desarrollo de las inflorescencias y de los racimos de fruto se pueden distinguir una serie de etapas clave (Figura 2; para una descripción detallada, ver Adam *et al.*, 2005). La producción de aceite depende del número y el peso de los racimos cosechados y del contenido de aceite en el fruto (Breure *et al.*, 1990). Estos factores se describen con más detalle a continuación.

Número de racimos

El número de racimos disponibles para ser cosechados es determinado por *i*) el número de inflorescencias iniciadas, el cual, a su vez, depende del ritmo de producción de hojas (Gerritsma & Soebagyo, 1999); *ii*) la relación de sexo de las inflorescencias (Adam *et al.*, 2011; Corley *et al.*, 1995; Heel *et al.*, 1987); *iii*) la tasa de aborto de inflorescencias femeninas antes de la antesis (Pallas *et al.*, 2013); y *iv*) ciertos problemas en el desarrollo de racimos que ocurren entre la antesis y la madurez del racimo (Combres *et al.*, 2013).

Número de inflorescencias en desarrollo

La tasa de iniciación foliar determina directamente el número potencial de inflorescencias, ya que solo

una inflorescencia puede iniciarse en la axila de cada hoja. Una palma de aceite promedio tiene entre 45-50 foliolos que no llegan a abrirse durante las diferentes etapas de su desarrollo y entre 32-48 que sí lo logran (Breure, 1994). La hoja completamente abierta más joven es marcada como Hoja 1 y a las hojas no abiertas se les asignan números negativos (Figura 2.) La tasa de iniciación foliar está determinada principalmente por la edad de la palma (Broekmans, 1957), con un ritmo de apertura que se reduce rápidamente durante los primeros 10 años (Gerritsma & Soebagyo, 1999). Por lo general, se producen entre 40-45 hojas palma/año en los primeros 2 años, entre 25-35 a los 6, de 20 a 25 entre el año 12 y el 14 (Broekmans, 1957; Gerritsma & Soebagyo, 1999), y entre 17-20 hojas palma/año hacia los 21 años (Broekmans, 1957; Raffi *et al.*, 2013). La tasa de iniciación foliar puede variar entre diferentes materiales de siembra a razón de ± 1 hoja palma/año (Gerritsma & Soebagyo, 1999) o tres días por filocrono (el tiempo entre la aparición de dos hojas consecutivas) (Lamade *et al.*, 1998). Se ha encontrado que la tasa de iniciación foliar de palmas individuales responde positivamente a la disponibilidad de luz. Al respecto, un estudio experimental reportó un incremento de 19 % en la tasa de iniciación foliar en palmas

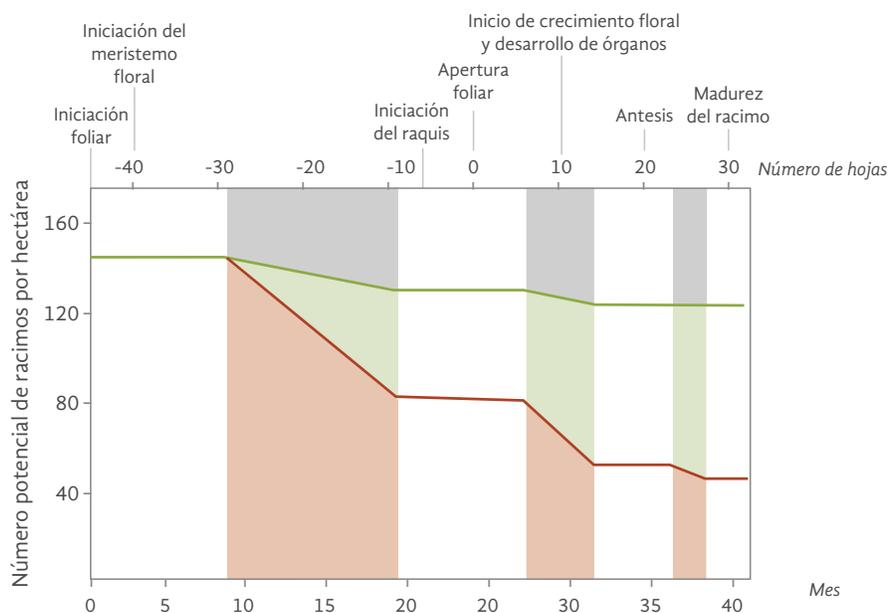
de 11-15 años con una alta densidad de siembra (186 palmas/ha), después de dos años de la poda (Breure, 1994). Así mismo, se observa que la limitación de sumideros en palmas de 13 años de edad como resultado de la remoción completa de los frutos en desarrollo, redujo la duración del filocrono de 17 a 15 días (Legros *et al.*, 2009b), posiblemente, debido a una mayor disponibilidad de carbohidratos para las hojas más jóvenes. Esto sugiere que la palma de aceite tiene la capacidad de responder a un abundante suministro de carbohidratos a través de incrementos en la tasa de iniciación de inflorescencias (Pallas *et al.*, 2013). La tasa de apertura foliar se reduce rápidamente en respuesta a la sequía (Chang *et al.*, 1988), resultando en la acumulación de hojas no abiertas en el centro de la corona de la palma (Broekmans, 1957; Nuoy *et al.*, 1999). De igual manera, la sequía puede llegar a reducir las tasas de iniciación foliar (Breure, 1994; Chang *et al.*, 1988).

Determinación del sexo, el aborto de inflorescencias y la proporción de sexo

En contraste con otras especies de palma, como el coco, que tienen flores masculinas y femeninas en la misma inflorescencia, en la palma de aceite el sexo

Figura 2. Representación esquemática del desarrollo de inflorescencias y de racimos*.

* Se muestran las etapas clave en el proceso de desarrollo y los efectos del estrés en el potencial de racimos (con base en Adam *et al.*, 2005; Corley *et al.*, 1995; Uexküll & Fairhurst, 1991). Comienza con el nacimiento de la hoja (punto cero) y progresa hasta la madurez del racimo; este se indica en meses desde el nacimiento de la hoja (parte inferior, eje x), y el número de hojas (parte superior, eje x, asumiendo una longitud promedio del periodo de crecimiento foliar de 1,9 meses). El eje y muestra el número potencial de racimos por hectárea. Las dos líneas muestran el progreso de dos grupos hipotéticos de racimos, comenzando en uno (1) por palma en una plantación con una densidad de siembra de 142 palmas/ha. Con el paso del tiempo el número de racimos potenciales se reduce a medida que los lotes pasan por diversas fases críticas. El estrés severo (línea roja) lleva a una mayor reducción en el número de racimos en comparación con un estrés leve (línea verde). Las barras representan los periodos de sensibilidad al estrés; la determinación del sexo (izquierda), el aborto de inflorescencias (medio) y el malogro de racimos (derecha).



se determina a nivel de la inflorescencia. La primera diferencia morfológica entre las inflorescencias masculinas y femeninas es un mayor número de brácteas iniciadas en el raquis masculino (hoja -6; Adam *et al.*, 2005; Corley, 1976a; Heel *et al.*, 1987). El momento de determinación del sexo varía entre experimentos, sitios de investigación y materiales de siembra, fluctuando entre 29-30 meses antes de la cosecha (Broekmans, 1957), y 20 meses antes de la cosecha (Breure & Menéndez, 1990) (Figura 2). Corley *et al.* (1995) encontraron que el momento de determinación del sexo varía entre clones: bien sea en la iniciación de las brácteas (hoja -29), o justo antes de la iniciación del primer raquis (hoja -10), o incluso ambos. Esto llevó a Corley & Tinker (2016) a especular que la diferenciación de sexos ocurre en la hoja -29, pero que es reversible hasta la hoja -10 (Cros *et al.*, 2013). Los mecanismos fisiológicos subyacentes a la determinación del sexo y el papel del equilibrio de carbohidratos y hormonas de plantas continúan siendo asuntos poco comprendidos (Corley, 1976a; Corley & Tinker, 2016). Para una revisión de los efectos de los factores ambientales en la determinación del sexo ver Adam *et al.* (2011).

La proporción de sexo (es decir, la proporción del número de inflorescencias femeninas con respecto al número total de inflorescencias) es influenciada tanto por la determinación del sexo como por el aborto preferencial de inflorescencias masculinas o femeninas; por lo que separar ambos efectos resulta difícil (Corley, 1976a). En ausencia de estrés severo la proporción promedio de sexo es de 0,9-1,0 durante los primeros cuatro años (Henson & Dolmat, 2004), de 0,6-0,9 hasta los 12 años (Henson & Dolmat, 2004; Jones, 1997), y disminuye constantemente después de este periodo (Corley & Gray, 1976). Un déficit hídrico severo, como el de la temporada seca en África Occidental, puede reducir la proporción de sexos a 0,1-0,2 (Bredas & Scuvie, 1960; Broekmans, 1957; Corley, 1976a). La proporción de sexos, particularmente el aborto de inflorescencias, se ve afectado por la actividad de fructificación (Corley & Breure, 1992). Así mismo, los efectos combinados de las señales ambientales internas resultan en oscilaciones anuales en la proporción de sexos y el rendimiento del cultivo de palma (Cros *et al.*, 2013). Las inflorescencias en desarrollo son más sensibles

al aborto entre 4 y 6 meses después de la antesis, lo cual coincide con el inicio del desarrollo y la elongación de los órganos florales (Broekmans, 1957). Si bien varios autores reportaron un aborto preferencial de inflorescencias femeninas durante (parte de) un periodo sensible de desarrollo de inflorescencias (Bredas & Scuvie, 1960; Breure & Menéndez, 1990; Pallas *et al.*, 2013), otros investigadores observaron un aborto preferencial de inflorescencias de este sexo únicamente en momentos específicos (Corley *et al.*, 1995), aborto preferencial de inflorescencias masculinas (Legros *et al.*, 2009b), o las mismas tasas de aborto para inflorescencias de ambos sexos (Henry, 1960). En un estudio realizado en Nigeria se reportaron tasas de aborto de 25-40 % en palmas jóvenes maduras que sufrieron temporadas secas prolongadas, mientras que dichas tasas disminuyeron a 5-30 % en palmas de más de 15 años (Broekmans, 1957). Por otra parte, tasas de aborto muy inferiores (2-13 %) fueron identificadas en suelos profundos de turba con un alto nivel freático en plantaciones de Malasia con edades de siembra entre 4 y 17 años (Henson & Dolmat, 2004).

En otro estudio, una reducción en la disponibilidad de fuentes mediante la defoliación a 16 hojas redujo de 10 a 40 % la tasa de aborto de inflorescencias en las hojas +2 a +12 en clones de 9 años de edad (Corley *et al.*, 1995). Si bien la proporción de sexos al momento del pico de abortos no cambió significativamente en todos los clones, el porcentaje promedio de axilas foliares con inflorescencias masculinas aumentó de 50 % en el grupo control a 60 % en las palmas podadas en un periodo de 11-25 meses después de la defoliación. Por el contrario, un estudio realizado en Sumatra registró una reducción en la actividad de sumidero inducida por la poda de frutos en palmas de 14 años, evento que condujo a un incremento en la fracción de inflorescencias femeninas de 0,15 a 0,6 en el grupo control y de 0,25-0,8 en las palmas podadas. Simultáneamente, las fracciones abortadas se redujeron de 0,2-0,6 a 0,1-0,2, y el número de inflorescencias masculinas en la temporada valle aumentó de 0,1 a 0,5 (Legros *et al.*, 2009b). Debido a la enorme variación en la respuesta entre los materiales de siembra, los sitios de investigación y los experimentos realizados (Breure, 1987; Corley & Breure, 1992; Corley *et al.*, 1995; Cros *et al.*, 2013), aún deben identificarse los umbrales de

disponibilidad específica de asimilados que activan las respuestas que hacen posible la determinación del sexo y del aborto de inflorescencias.

Malogro de racimos

El malogro de racimos, es decir, el aborto de un racimo antes de su maduración, ocurre de 2 a 4 meses después de la antesis (Sparnaaij, 1960). Este fenómeno puede ser ocasionado por una polinización deficiente de las inflorescencias o por una escasez aguda y severa de asimilados, usualmente causada por déficit hídrico o de radiación (Combres *et al.*, 2013; Corley & Tinker, 2016). Se han observado tasas de malogro de racimos entre 1,5 % (Corley, 1973b) y > 25 % (Corley & Tinker; Sparnaaij, 1960), sin embargo, la información disponible sobre el tema es escasa y este fenómeno continúa siendo poco abordado (Corley & Tinker).

Peso del racimo y contenido de aceite

El peso de los racimos y su contenido de aceite son factores menos sensibles al estrés en comparación con la variable número de racimos. No obstante, estos tienen un impacto mayor en la productividad de un cultivo. A continuación, haremos una breve descripción del desarrollo de inflorescencias y de racimos en la palma de aceite, y posteriormente discutiremos la regulación de varios componentes relacionados con el peso y el contenido de aceite de los racimos.

Desarrollo de inflorescencias y de racimos

Tanto las inflorescencias masculinas como las femeninas están conformadas por un pedúnculo que lleva espiguillas en las que se encuentran las flores, las cuales son sostenidas por una bráctea única. El pedúnculo tiene una longitud de 40 cm y las espiguillas masculinas de 10-30 cm. Cada una de las 100-300 espiguillas porta entre 400 y 1.500 flores masculinas de entre 3 y 4 mm de longitud. El pedúnculo femenino es más corto (20-30 cm) y más grueso, y tiene cerca de 150 espiguillas, cada una con una longitud entre 6 y 15 cm. Una espiguilla contiene entre 5 y 30 flores subtendidas por una bráctea en forma de espina aguda (Jacquemard & Baudouin, 1998). El número de espiguillas y el número de flores por espiguillas aumentan con la

edad, pero alcanzan un punto de estabilización entre los 10 y los 12 años (Corley & Gray, 1976). El número de inflorescencias femeninas que se desarrolla varía entre 30 y 60 % (Corley & Tinker, 2016) y 80 % (Harun & Noor, 2002) cuando existe presencia de insectos polinizadores en el cultivo. En palmas de 10-15 años de edad los racimos contienen entre 1.500 y 2.000 frutos en desarrollo. El tiempo de maduración del racimo (desde la antesis hasta la madurez) varía entre 140 y 180 días, dependiendo de factores tanto genéticos como ambientales (Henson, 2005; Lamade *et al.*, 1998).

Por su parte, el proceso de maduración del fruto comienza dos semanas después de la antesis y ocurre en distintas fases (Oo *et al.*, 1986). El aceite comienza a acumularse en el endospermo de los frutos en desarrollo 12 semanas después de la antesis y 4 semanas más tarde el endocarpio y el endospermo (que conforman la semilla) se endurecen (Oo *et al.*, 1986; Sambanthamurthi *et al.*, 2000). La descarga de aceite en el mesocarpio comienza 15 semanas después de la antesis y continúa hasta la madurez del fruto, entre 5 y 6 meses después (Oo *et al.*, 1986), cuando el contenido de aceite en el mesocarpio del fruto en desarrollo es cercano a 60 % y el contenido de agua se reduce de más de 80 % a menos de 40 (Bafor & Osagie, 1985; Bille-Ngalle *et al.*, 2013).

Mecanismos de regulación del peso del racimo y de su contenido de aceite

De acuerdo con la literatura, las principales variables que determinan el peso del racimo son: el número de espiguillas, el número de flores por espiguilla, el *fruit set*, el peso por fruto en desarrollo y el peso de los componentes no frutales del racimo (Broekmans, 1957). El peso fresco del racimo (con 53 % de materia seca en promedio, según Corley *et al.*, 1971b) incrementa con la edad de la palma, comenzando en 3-5 kg a los 2 años y aumentando a más de 30 kg hacia al final del ciclo de cultivo de 25 años (Lim & Chan, 1998, citados por Corley & Tinker, 2003; Sutarta & Rahutomo, 2016). Todos los componentes del peso del racimo responden positivamente a una mayor disponibilidad de asimilados (Breure & Menéndez, 1990; Corley & Breure, 1992; Pallas *et al.*, 2013). Según algunas investigaciones, la remoción del 75 % de las inflorescencias en palmas de entre 4 y 7 años condujo a un incremento en el peso total del racimo

de 7,6 a 12,7 kg, con lo cual, igualmente, se obtienen incrementos en todos los componentes antes mencionados (Breure & Corley, 1992; Corley & Breure, 1992). Adicionalmente, algunos trabajos señalan que la eficiencia en la labor de polinización influye directamente en la conformación del *fruit set* (ver apartado posterior sobre polinización).

El contenido de aceite se ve afectado principalmente por el tipo de material de siembra (ver apartado correspondiente). Al respecto, estudios señalan que un único gen es capaz de determinar el grosor de la cáscara de la semilla, lo cual, a su vez, influye en el grosor del mesocarpio y, por lo tanto, en el contenido de aceite del racimo (Beirnaert & Venderweyen, 1941). La palma de aceite salvaje (*dura*) tiene una cáscara gruesa y una tasa promedio de extracción de aceite de 16-18 %, mientras que la variedad híbrida *tenera*, un cruce entre *dura* y *pisifera* (mutación sin cáscara), tiene un grosor de cáscara intermedio y tasas de extracción de aceite de 22-30 % (Jalani *et al.*, 2002; Rakanaidu & Kushairi, 2006). Otros trabajos han encontrado que el uso de fertilizantes afecta el contenido de aceite de los racimos (Ochs & Ollagnier, 1977). Por ejemplo, un experimento en palmas de 8 años en Papúa Nueva Guinea reportó que mayores concentraciones de cloruro en los tejidos incrementaron de 7,8 a 9,3 % la relación semilla a fruto, y dieron lugar a una reducción en la relación mesocarpio a fruto, pasando de 81,7 a 79,2 % (Breure, 1982). Otros trabajos han señalado que el contenido de aceite tiene una correlación negativa con la precipitación y una correlación positiva con la radiación disponible; a manera de ejemplo, las altas precipitaciones experimentadas en Malasia durante 1996 resultaron en una reducción de 0,8-1,5 % en la tasa de extracción de aceite (TEA) de ese país, en comparación con la tasa reportada para 1993 (Hoong & Donough, 1998). Así mismo, esta variable de la productividad tiene una relación positiva con la concentración de Mg en el tejido foliar (Ochs & Ollagnier, 1977), aunque algunas veces posee una correlación negativa con la aplicación de cloruro de potasio (Ochs & Ollagnier, 1977; Zin *et al.*, 1993), probablemente como consecuencia de mayores concentraciones de Cl en el tejido de la planta que resultan en una mayor proporción de semilla a fruto (Breure, 1982).

Magnitud, causas y manejo de las brechas de productividad

La palma de aceite se desarrolla en plantaciones tipo monocultivo a gran escala o en plantaciones de pequeños agricultores. Los racimos de fruto fresco (RFF) son el producto primario del cultivo y el aceite de palma crudo (APC) y el aceite de palmiste los productos finales. La productividad se mide como la producción de aceite (t/ha), calculada a partir del rendimiento de los racimos de fruto fresco (t/ha) y la tasa de extracción (%). En este artículo los rendimientos se expresan bien sea en toneladas de racimos de fruto fresco por hectárea (t RFF/ha) o en toneladas de aceite de palma crudo por hectárea (t APC/ha). No se considera la cantidad de aceite de palmiste ya que este es un subproducto que se extrae y se comercializa en un número limitado de plantas de beneficio.

Diferentes brechas de productividad en el cultivo de palma de aceite

De acuerdo con los principios de la ecología de producción se suelen diferenciar tres niveles de producción: *i*) el rendimiento potencial (Y_p), el cual es determinado por los factores que establecen el rendimiento (RFA, temperatura, concentración de CO_2 en el ambiente y características genéticas del cultivo); *ii*) el rendimiento con limitantes de agua (Y_w) y limitantes nutricionales (Y_n), determinados por diversos factores hídricos y nutricionales; y *iii*) el rendimiento real (Y_a), determinado por factores que disminuyen el rendimiento (maleza, plagas, enfermedades, entre otras) (van Ittersum & Rabbinge, 1997). A partir de lo anterior, el análisis de las brechas de productividad es el estudio de la diferencia entre Y_p (asumiendo que el genotipo y el manejo sean óptimos) y Y_a en un entorno físico particular (van Ittersum & Rabbinge, 1997)¹.

En este trabajo definimos el rendimiento potencial como “el rendimiento de un cultivo en entornos a los cuales está adaptado; sin limitaciones de agua o de

1 Para otros artículos de revisión sobre el análisis de brechas de productividad ver Lobell *et al.* (2008) y van Ittersum *et al.* (2013).

nutrientes; y con un control efectivo de factores de estrés tales como plagas, enfermedades, malezas y otros” (Evans, 1993). El límite teórico de la ganancia genética sobre el rendimiento de un cultivo se puede calcular utilizando modelos de simulación (Lobell *et al.*, 2009). Esta medición también se conoce como “rendimiento potencial” en la literatura sobre palma de aceite (Breure, 2003; Corley, 2006), y puede ser empleada por los productores para establecer metas y explorar escenarios futuros en sus cultivos tales como el uso de la tierra y otros.

La literatura sobre el manejo de la palma de aceite se refiere al “*potencial de rendimiento del sitio*” (Goh *et al.*, 2000; Tinker, 1984;) como “el rendimiento que se obtiene en un sitio específico con un suministro natural de agua, la aplicación de nutrientes a niveles óptimos y la implementación de medidas agronómicas y de control de enfermedades con altos estándares (Corley & Tinker, 2006, p. 322). Esta definición es similar a lo que conocemos como el rendimiento con limitaciones de agua, pero incluye decisiones de manejo agronómico tomadas durante la fase de planeación del cultivo, específicamente en lo que se refiere al material y la densidad de siembra².

Es de mencionar que un análisis preciso de las brechas de productividad depende de la correcta evaluación de los diferentes niveles de producción (Figura 3). A continuación, discutiremos en detalle los factores que determinan, limitan y reducen el rendimiento del cultivo de palma de aceite, así como los efectos cuantitativos de estos sobre la productividad del cultivo.

Factores determinantes del rendimiento potencial y real del cultivo

El rendimiento potencial de aceite, definido como el rendimiento de los RFF y su contenido de aceite, está determinado por la radiación fotosintéticamente activa (RFA), la temperatura, la concentración de CO₂ en el ambiente y las características genéticas del cultivo, suponiendo condiciones óptimas (van Ittersum & Rabbinge, 1997), según muestra la Tabla 1. Posteriormente discutiremos a profundidad los factores que determinan el rendimiento potencial.

2 Para artículos de revisión sobre el análisis de brechas de productividad desde una perspectiva de manejo agronómico, ver Goh *et al.* (1994), Griffiths *et al.* (2002) y Fairhurst & Griffiths (2014).

Radiación disponible y RFA

Al ser la palma de aceite un cultivo perenne con un dosel arbóreo permanente, este tiene la capacidad de interceptar radiación durante todo el año. Esta es una de las principales razones de la alta tasa de productividad de este cultivo, en comparación con otros cultivos oleaginosos. En el trópico, la radiación disponible está limitada principalmente por la nubosidad. La Tabla 1 muestra el rango de radiación total de onda corta diario y las horas de sol por día en las regiones en donde se desarrolla el cultivo de palma de aceite.

Un mínimo de 15 MJ/m/día de radiación solar total (equivalente a ~ 7,5 MJ/m/día RFA) o 5,5 h/día de sol es considerado como el nivel óptimo para el crecimiento de la palma de aceite. Considerando estos valores, existe un menor potencial de rendimiento para los cultivos ubicados en algunas regiones de África y América (Paramanathan, 2003). El trabajo de modelación realizado por Kraalingen *et al.* (1989) indica que cada hora de sol por día resulta en una producción de materia seca de 15-20 kg/palma/año. Por lo tanto, el rendimiento potencial en regiones con 8 horas de sol por día sería > 60 % superior al de regiones con 3 horas de sol por día (Kraalingen *et al.*, 1989). Por lo general, la saturación de luz en las hojas de la palma ocurre a una densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) de > 1100-1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, lo cual equivale aproximadamente a 250 W m⁻² RFA (Dufrene *et al.*, 1990). El trabajo de Dufrene & Saugier (1993) determinó una tasa de asimilación neta de luz de aproximadamente 20 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 1100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ DFFF en las hojas 8 y 9 de palmas de aceite en Costa de Marfil; cifra que es similar a la tasa promedio de 17,8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ reportada en un trabajo en palmas de 12 y 13 años en Malasia (Henson, 1991b). De otro lado, la reducción de RFA debido a la niebla ocasionada por la quema de bosques es un asunto común en Indonesia. Esta situación ocurre principalmente durante la temporada seca, cuando la radiación disponible se encuentra en su pico, y es probable que se encuentre relacionada con una reducción significativa en los rendimientos del cultivo (Tabla 1). Por su parte, en África, el polvo transportado por el viento Harmattan y el *smog* ocasionan reducciones periódicas en la radiación, lo cual podría generar una disminución de los rendimientos de los cultivos de la región.

Figura 3. Diferentes niveles de producción de palma de aceite y factores que contribuyen.



Tabla 1. Factores determinantes del rendimiento en sistemas de palma de aceite: rendimiento potencial (Yp).

Factor	Rango en las regiones productoras	Efectos en el rendimiento medidos en los casos de estudio	Referencias															
Radiación solar	<ul style="list-style-type: none"> • Todas las regiones: promedio de 15-23 MJ de radiación total m/día. • África y regiones de las Américas: < 10 MJ m/día durante la temporada de lluvias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementos modelados de 1,7-2,1 t RFF/ha/año por MJ m/día adicional. • Pérdida de rendimiento modelada de 15-20 % después de una reducción de 15 a 2 MJ m/día de radiación total durante dos meses debido a condiciones de niebla. 	Paramananthan <i>et al.</i> (2000) Henson (2000) Goh (2000) Caliman <i>et al.</i> (1998)															
Horas de sol/día	<ul style="list-style-type: none"> • Asia: 5,3-6,9 • América: 2,2-7,7 • África: 3,6-6,3 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitaciones a la productividad si < 5,5 h/día. • Una h/día adicional resulta en 15-20 kg adicionales de RFF/palma/año en comparación con la productividad bajo condiciones de nubosidad. 	Hartley (1988) Kraalingen <i>et al.</i> (1989) Paramananthan (2003)															
Concentración de CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • 1960: 317 ppm • 1980: 339 ppm • 2000: 370 ppm • 2015: 399 ppm 	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de RFF (t/ha/año) modelada en sitio sin déficit de agua: <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <thead> <tr> <th>RFF</th> <th>CO₂</th> <th>Temperatura (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11</td> <td>350</td> <td>+0</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>550</td> <td>+0</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>550</td> <td>+2</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>550</td> <td>+4</td> </tr> </tbody> </table>	RFF	CO ₂	Temperatura (°C)	11	350	+0	30	550	+0	18	550	+2	10	550	+4	Ibrahim <i>et al.</i> (2010) Henson (2006) Tans & Keeling (2015)
RFF	CO ₂	Temperatura (°C)																
11	350	+0																
30	550	+0																
18	550	+2																
10	550	+4																
Temperatura	Mínima mensual: 17,7 °C (Bahía, Brasil). Máxima mensual: 34,6 °C (Aracataca, Colombia).	<ul style="list-style-type: none"> • Fuertes reducciones no definidas en el rendimiento a un promedio de temperatura mínimo mensual inferior a 18-19 °C. • Crecimiento de las plántulas inhibido a 15 °C, siete veces más lento a 17,5 °C y tres veces más lento a 20 °C con respecto a 25 °C. • Periodo inmaduro prolongado hasta 1 año más en condiciones frías. 	Hartley (1988) Henry (1958) Olivin (1986)															

Continúa

Factor	Rango en las regiones productoras	Efectos en el rendimiento medidos en los casos de estudio	Referencias
Material de siembra	<ul style="list-style-type: none"> • Clones de <i>tenera</i> • Semiclones de <i>tenera</i> • DxP semilla <i>tenera</i> • Semilla <i>dura</i> • Semilla de origen desconocido 	<ul style="list-style-type: none"> • Clones <i>tenera</i>: 15,7 t aceite ha/año a los 7 años. • Semiclones <i>tenera</i>: 11,1 t aceite ha/año a los 5 años. • DxP semilla <i>tenera</i>: 8,9 t aceite ha/año. • Semilla <i>dura</i>: reducción de ~ 35-50 % en el contenido de aceite de los racimos. • Semillas de origen desconocido: reducciones potencialmente superiores, dependiendo del porcentaje <i>pisifera</i> en la población (cero rendimientos de palmas <i>pisifera</i>) y del potencial de materiales parentales. 	<p>Simon <i>et al.</i> (1998) Ng <i>et al.</i> (2003) Rajanaidu <i>et al.</i> (2005) Sharma (2007)</p>
Densidad de siembra	<ul style="list-style-type: none"> • 110-156 palmas/ha en entornos favorables. • 160-170 palmas/ha en suelos no favorables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de plantación fija óptima: 140-160 palmas/ha; IAF óptimo: 5,5-6,0. • Reducción en el rendimiento acumulativo de 1-2 % cuando la densidad es \pm 10 palmas respecto a la densidad óptima. • En turba profunda: densidad óptima superior (> 160 palmas/ha). • Aumento del rendimiento de 4 t RFF/ha/año en palmas de 9 a 16 años como resultado de pasar de 160 a 120 palmas/ha a los 8 años, en comparación con la no reducción de la densidad o una densidad fija de 143 palmas/ha (Tailandia). 	<p>Corley & Tinker (2016) Breure (2010) Corley (1973a) Breure (1977) Gurmit <i>et al.</i> (1986) Goh <i>et al.</i> (1994) Uexküll <i>et al.</i> (2003)</p>
Eliminación selectiva	<ul style="list-style-type: none"> • Buena: remoción de 20-30 % de las plántulas • Pobre: eliminación selectiva incorrecta o insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin eliminación selectiva: 20-30 % de plántulas anormales generan un rendimiento 40-100 % inferior que plántulas normales. 	<p>Tam (1973) Gillbanks (2003)</p>
Poda	<ul style="list-style-type: none"> • 50-60 hojas a 0-3 años • 40-50 hojas a 4-10 años • 32-40 hojas a > 10 años 	<ul style="list-style-type: none"> • Exceso de poda en palmas de 8-12 años con densidad de 138 palmas/ha en Malasia: < 2, 12, 19, 24 y 25 t RFF/ha con 8, 16, 24, 32 y 40 hojas/palma, respectivamente. • Poda insuficiente: pérdida directa de rendimiento no cuantificada debido a una eficiencia de cosecha reducida. 	<p>Hartley (1988) Henson (2002) Corley & Hew (1976)</p>
<i>Fruit set</i> y polinización	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia del gorgojo polinizador en todas las regiones. • Eficiencia promedio de la polinización de 70-80 %. 	<ul style="list-style-type: none"> • Relación asintótica cuadrática entre el <i>fruit set</i> y el peso de los racimos con un peso promedio de racimos de 24, 20 y 14 kg a un <i>fruit set</i> de 90, 50 y 20 %, respectivamente. • Relación cuadrática entre el <i>fruit set</i> y la proporción aceite a racimo con un O/B promedio de 25, 20 y 13 % con un <i>fruit set</i> de 75, 40 y 20 %, respectivamente. 	<p>Harun & Noor (2002) Syed <i>et al.</i> (1982) Rao & Law (1998) Henson (2001)</p>
Frecuencia de cosecha	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes productores: intervalos de cosecha de 7, 10 o 14 días. • Pequeños productores: intervalos de cosecha de 14 o 15 días, algunas veces hasta de 30 días. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de 5-20 % en el rendimiento al disminuir el tiempo de la ronda de cosecha de 14 a 10 días. 	<p>Donough <i>et al.</i> (2013) Lee <i>et al.</i> (2013) Corley (2001) Donough (2003)</p>

Factor	Rango en las regiones productoras	Efectos en el rendimiento medidos en los casos de estudio	Referencias
Recuperación del cultivo en el campo	<ul style="list-style-type: none"> Varía desde recuperación casi completa a menos del 70 % del fruto. 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdidas de rendimiento reportadas de hasta 5 t RFF/ha debido a una recuperación deficiente del cultivo. Pérdidas anuales bajo un estricto régimen de cosecha con intervalos de 7 días: 200 kg RFF/ha no cosechados y 65 kg/ha de frutos sueltos no recolectados. Recolección incompleta de frutos sueltos: pérdida promedio de > 5 %. Rendimiento de aceite de racimos no maduros ~ 30 % inferior. 	Fairhurst & Griffiths (2014) Donough <i>et al.</i> (2013) Corley (2001) Wood (1985)

Concentración de CO₂

Bajo condiciones normales, la tasa de fotosíntesis en cultivos tipo C3, como la palma de aceite, está limitada por la disponibilidad de CO₂. En otros cultivos C3 como el trigo se han observado incrementos en el rendimiento de 10-30 % en respuesta a una duplicación de las concentraciones de CO₂ atmosférico (Fuhrer, 2003; Kimball *et al.*, 1993), lo cual es de esperar también para la palma de aceite en el futuro, dado que esta planta se encuentra bien adaptada a entornos con altas temperaturas (Dufrène & Saugier, 1993). Al respecto, se ha observado una mayor tasa fotosintética en las plántulas de palma de aceite, pasando de 5 a 12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, en respuesta a cambios en la concentración de CO₂ atmosférico de 400 a 800 ppm (Ibrahim *et al.*, 2010). El hecho de que tasas más altas de fotosíntesis resulten en mejores rendimientos del cultivo depende de varios factores, particularmente del equilibrio fuente/sumidero (ver Paul & Foyer, 2001) y de la temperatura del aire. Por lo general, las palmas maduras tienen limitaciones de fuentes (Breure, 2003), haciendo que la respuesta real sobre el rendimiento de mayores concentraciones de CO₂ sea probable siempre y cuando la temperatura se mantenga estable. A la fecha no se han realizado investigaciones sobre los efectos reales del CO₂ en el rendimiento de la palma de aceite en plantaciones adultas, y solo se conoce de los efectos esperados del cambio climático en la producción mundial de aceite de palma a partir del trabajo de Corley & Tinker (2016).

Temperatura

El rango de temperatura de las regiones productoras de palma de aceite se muestra en la Tabla 1. El límite de temperatura superior para una fotosíntesis eficiente en las hojas de la palma de aceite es de > 38 °C, siempre y cuando el déficit de presión de vapor sea bajo (Dufrène *et al.*, 1990; Dufrène & Saugier, 1993; Paramanathan, 2003). La temperatura y el proceso de respiración de las plantas tienen una fuerte relación positiva, con un factor promedio de aumento en la respiración de dos por cada 10 °C adicionales en la temperatura (Amthor, 1984; Ryan, 1991). Si esta condición se mantiene para la palma de aceite o no, sigue siendo un asunto aún por confirmar, considerando que la respuesta del rendimiento a incrementos en la temperatura no ha sido aún cuantificada (Henson, 2004, 2006). Frente al tema de la temperatura, se sabe que la palma de aceite es sensible al frío (Tabla 1), por lo que en regiones productoras caracterizadas por temperaturas bajas, como en Bahía (Brasil) y Tela (Honduras), se han registrado fuertes disminuciones en el rendimiento durante la segunda mitad de la temporada fría y el comienzo de la temporada cálida. En Sumatra se ha evidenciado que bajas temperaturas a altas elevaciones contribuyen a extender el periodo de inmadurez de los cultivos durante un año como mínimo (Hartley, 1988).

Material de siembra

Los techos teóricos promedio del rendimiento de aceite (con los materiales de plantaciones futuras bajo las

mejores condiciones ambientales y de manejo posibles) varían entre 10,6 (Breure, 2003) y 14,0 t de aceite/ha/año (Henson, 1992) y 18,5 t de aceite/ha/año (Corley, 1998, 2006) durante la vida útil de un cultivo. Si bien puede que las estimaciones superiores se basen en suposiciones poco realistas (Breure, 2003), los mejores rendimientos logrados en plantaciones pequeñas o en campos experimentales se encuentran dentro del rango estimado mencionado anteriormente (Tabla 1). Los materiales de siembra no clonales consisten en una población de vástagos de una madre *dura* y de un padre *pisifera* (DxP), y sus individuos varían en términos del potencial de crecimiento vegetativo y la productividad estimada (Okwuagwu *et al.*, 2008). El rendimiento potencial de los materiales de plantación DxP ha aumentado cerca de 1,5 % por año mediante el mejoramiento de materiales genéticos con combinaciones específicas de padres macho/hembra que muestran un historial de rendimiento temprano; se espera que esta tendencia en incrementos del rendimiento continúe (Corley, 2006; Soh, 2004). El desarrollo de materiales genéticos ha contribuido a mejorar la eficiencia de conversión fotosintética, particularmente, (Corley y Lee, 1992), y el contenido de aceite en racimo (Corley & Lee, 1992; Prasetyo *et al.*, 2014; Soh, 2015). Frente a la variable temperatura, se sabe que algunas variedades con tolerancia mejorada al frío (Chapman *et al.*, 2003) y a las sequías (Rao *et al.*, 2008) están siendo desarrolladas.

Es bien conocido que los clones de ortets cuidadosamente seleccionados pueden superar en 20-30 % el rendimiento de otros materiales debido a una combinación de mejor uniformidad, mayor rendimiento de racimos de fruto y mayor proporción de aceite a racimo (Khaw & Ng, 1998; Kushiari *et al.*, 2010; Simon *et al.*, 1998; Soh, 2012) (Tabla 1). Si bien algunos experimentos en campo han confirmado rendimientos superiores en clones seleccionados bajo rigurosas circunstancias de eliminación selectiva, existen problemas clave en cuanto a la multiplicación de embriones y la variación somaclonal que limitan el uso de estos materiales a escala comercial (Soh, 2004; Soh *et al.*, 2011). Es probable que el reciente hallazgo del factor epigenético subyacente al fenotipo *manto* (una malformación floral que resulta en la incapacidad para formar frutos en desarrollo o un bajo contenido de aceite de los frutos en desarrollo) impulse la siembra y el desempeño de clones de palmas de aceite (Ong-Abdullah *et al.*, 2015).

Densidad de siembra

La densidad de siembra es un factor determinante del rendimiento potencial del cultivo de palma de aceite (Breure, 1977, 1982; Corley, 1973a; Uexküll *et al.*, 2003). Una densidad de siembra óptima (Tabla 1) equilibra el requisito entre un cierre acelerado de los doseles arbóreos durante la etapa inmadura y la presencia de un gran número de palmas (por lo tanto, racimos) y la competencia entre palmas por luz solar durante la etapa madura. Por otro lado, en suelos de turba profunda el crecimiento vegetativo se reduce, razón por la que se recomienda el establecimiento de un cultivo con mayor densidad (Gurmit *et al.*, 1986), tal como se detalla en la Tabla 1. Adicionalmente, según reportan varios estudios, una alta densidad de siembra, seguida de un raleo selectivo a los 8-9 años, es considerada una estrategia efectiva para maximizar el rendimiento de este cultivo (Palat *et al.*, 2012; Uexküll *et al.*, 2003).

Eliminación selectiva

La calidad y uniformidad de las palmas en campo depende del material de siembra y del proceso de selección de individuos durante la etapa de vivero conocido como “eliminación selectiva” (Tam, 1973). Debido a la diversidad genética y a factores de estrés durante la etapa de vivero y disposición final en campo, se han observado grandes diferencias de productividad en palmas sometidas a análisis, incluso cuando se ha llevado a cabo una rigurosa eliminación selectiva (Okwuagwu *et al.*, 2008). Algunos trabajos sobre el tema han reportado que los individuos más productivos registran un rendimiento dos a tres veces superior al promedio, mientras que los individuos menos productivos llegan incluso a registrar una producción de cero racimos de fruto (Hartley, 1998; Yeow *et al.*, 1982). Normalmente, la prevalencia de plántulas anormales o mal desarrolladas es de 20-30 %. Las plántulas anormales, identificadas en la selección fenotípica, generan rendimientos altamente reducidos en caso de ser dispuestas en campo (Tam, 1973), por lo que todas las plántulas catalogadas como anormales deben ser removidas durante la etapa de vivero o remplazadas dentro de los 12 primeros meses de siembra (Gillbanks, 2003; Jacquemard & Bauduoin, 1998).

Poda

La poda, que es el proceso de eliminación de hojas seleccionadas, es una práctica de manejo característica de los cultivos perennes. El objetivo de esta labor es optimizar la disponibilidad de fuentes, minimizando la pérdida de asimilados como consecuencia de la respiración en hojas senescentes. Las hojas recién abiertas de la palma muestran una actividad fotosintética estable o ligeramente ascendente hasta 4-10 meses después de su apertura (en palmas de 3 y de 10-12 años, respectivamente), después de lo cual este tipo de actividad se reduce hasta que las hojas envejecen y mueren (Corley, 1983, 1976b). Las hojas en la parte inferior del dosel arbóreo permanecen fotosintéticamente activas y son fuente neta de energía hasta su senescencia (Henson, 1991a). Al respecto, estudios señalan que retener todas las hojas vivas, removiendo las que envejecen, es la mejor manera de maximizar la disponibilidad de asimilados, independientemente de la edad de la palma (Hartley, 1988; Henson, 2002). La poda en palmas inmaduras y en palmas maduras jóvenes, por lo general, se limita a la remoción de hojas senescentes o muertas, dado que un área foliar reducida genera un fuerte efecto negativo en la interceptación de luz y en la disponibilidad total de asimilados (Breure, 2003; Gerritsma, 1988). La pérdidas en rendimiento al pasar de una poda de > 48 hojas/palma a 32-40 hojas/palma en plantaciones maduras no es significativa (Corley & Hew, 1976), sin embargo, se recomienda una poda frecuente con remoción adecuada de hojas en palmas de mayor altura con el fin de facilitar una recolección del fruto completa, así como un rápido reciclaje de nutrientes (Fairhurst & Griffiths, 2014).

Polinización

Una función cuadrática describe la relación entre el *fruit set* y el peso del racimo, con un peso máximo de racimo de 90 % y una proporción máxima de aceite a racimo de 75 % del *fruit set* (Harun & Noor, 2002) (Tabla 1). En Malasia se han evidenciado episodios temporales de *fruit set* deficientes (entre 10 y 20 %) ocasionados por fuertes reducciones en las poblaciones de insectos polinizadores debido a excesos de lluvia, ausencia de flores masculinas e infecciones con nematodos parasitarios (Rao & Law, 1998). En consecuencia, entre 1993 y 1996 la tasa de extracción de

aceite (TEA) de ese país cayó de 21,2 a 18,8 %, mientras que la tasa de extracción de semillas cayó de 4,7 a 3,5 %. Se piensa que un mínimo de dos palmas de sexo masculino por hectárea en plantaciones con una alta proporción de sexos suministra suficiente polen para mantener la población de gorgojos en niveles adecuados (Rao & Law, 1998).

Cosecha

El objetivo de la cosecha, también conocida como recuperación del cultivo, es recolectar todos los racimos de fruto al momento de su madurez óptima (es decir, máximo contenido de aceite con una concentración mínima de ácidos grasos libres; PORLA, 1995). La ejecución de la labor de cosecha con poca frecuencia, de manera incompleta o incorrecta (por ejemplo, cosechar racimos inmaduros o demasiado maduros) reduce directamente tanto la cantidad de fruto como la calidad del aceite extraído de este (Donough *et al.*, 2010) (Tabla 1). Al respecto, la literatura señala que el intervalo de cosecha (es decir, el número de días entre dos rondas de cosecha) debe adaptarse a la velocidad con la que los frutos sueltos se desprenden del racimo maduro, buscando así minimizar las pérdidas por fruto suelto no recolectado y por racimos demasiado maduros (Gan, 1998); estudios sobre el tema han propuesto un intervalo de cosecha óptimo de 10 días (Donough *et al.*, 2010; Gan, 1998; Rankine & Fairhurst, 1996b). Es probable que la cosecha de racimos no maduros afecte el equilibrio fuente/sumidero dado que los requisitos de sumidero de racimos aumentan considerablemente durante la última fase de maduración del fruto (Henson, 2007), sin embargo, esta variable no ha sido aún cuantificada.

Rendimiento con limitaciones de agua y factores limitantes

El rendimiento con limitaciones de agua (Yw) (Tabla 2) es un punto de referencia importante ya que la mayoría de los sistemas de cultivo de palma de aceite se alimentan con agua lluvia (Ludwig *et al.*, 2011). La disponibilidad de agua depende de las precipitaciones y de las características del suelo y son altamente específicas al lugar en que se encuentre un cultivo (Lobell *et al.*, 2008; van Ittersum *et al.*, 2013). El Yw puede aproximarse

mediante modelos de simulación de cultivos, utilizando suposiciones fisiológicas y agronómicas posibles (Evans & Fischer, 1999), experimentos de campo, estimados de los rendimientos de los mejores productores de una región específica o concursos que premien las cifras de productividad entre productores (van Ittersum *et al.*, 2013).

Precipitación

La palma de aceite transpira cerca de 6 mm de agua por día bajo condiciones normales y requiere de precipitaciones acumuladas durante todo el año (Tabla 2). Las tasas promedio actuales de transpiración en plantaciones de palma de aceite son de 4,0-6,5 mm/día durante la temporada de lluvias y de 1,0-2,5 mm/día en la temporada seca (Carr, 2011). De acuerdo con la literatura, niveles de estrés hídrico moderados o severos reducen considerablemente el rendimiento del cultivo (Tabla 3). Entre los efectos del déficit hídrico se puede mencionar que, aunque los folíolos no se marchiten, la apertura de nuevas hojas se retrasa, así como sucede con la apertura estomática, la cual se ve fuertemente afectada por el déficit de presión de vapor (DPV) y la disponibilidad de agua en el suelo (Smith, 1989; Caliman, 1992); todo esto con consecuencias directas sobre las cifras de rendimiento. Un estudio realizado por Henson & Harun (2005) registró tasas potenciales de evapotranspiración de 1,3 mm/día a 1,9 kPa DPV y un contenido de agua en el suelo disponible de 75 % en palmas de 3 años localizadas en una región de Malasia con una temporada habitualmente seca. Por su parte, en otro sitio analizado, un DPV que pasó de 0,4 a 2,0 kPa experimentó una reducción de 18-19 a 10-12 $\mu\text{mol CO}_2$ m/s en la tasa fotosintética de palmas de 1-2 años, incluso bajo condiciones de disponibilidad adecuada de agua en el suelo (Henson & Chang, 1990).

Así mismo, se ha encontrado una relación lineal entre el volumen de agua aplicado y el rendimiento en senderos de riego en entornos más secos (Carr, 2011; Corley, 1996; Palat *et al.*, 2008), como se muestra en la Tabla 2. Si bien se ha analizado la respuesta del rendimiento a la irrigación en áreas con periodos de sequía ocasionales en Malasia, esta no siempre

resulta ser económicamente viable (Corley & Hong, 1982; Henson & Chang, 1990). Es pertinente mencionar que aún no se han definido umbrales críticos de déficit hídrico durante las diferentes etapas del desarrollo de la planta, ni de los volúmenes de agua a ser aplicados (Carr, 2011).

Suelo

La disponibilidad de agua en el suelo depende de la afluencia de agua (precipitaciones, irrigación y agua subterránea), la pérdida de agua (evapotranspiración, drenaje y escorrentía de aguas superficiales) y de la reserva previa de agua en el suelo. Surre (1968) propuso un cálculo simplificado para permitir una evaluación rápida de la idoneidad de las combinaciones suelo-clima para el desarrollo de la palma de aceite. Este cálculo se basa en la siguiente ecuación:

$$B = Res + R - Etp \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde B es el equilibrio de agua al final del periodo, Res la reserva de agua en el suelo al comienzo del periodo, R la precipitación y Etp la evapotranspiración potencial (Surre, 1968). Utilizando esta ecuación, Olivin (1968) estimó rendimientos con limitaciones de agua en África para cinco escenarios de déficit hídrico en cinco tipos de suelo que van desde la categoría I (excelentes, como suelos aluviales jóvenes) hasta la IV (no aptos, como suelos muy arenosos o llenos de grava), según se ilustra en la Tabla 3. En Malasia, se han reportado rendimientos de $> 30 \text{ t RFF/ha}$ en la mayoría de tipos de suelo, excepto por suelos poco profundos, los cuales causan problemas tales como una producción reducida de raíces, una mayor susceptibilidad a la sequía e inundaciones, y el riesgo de caída de las palmas (Fairhurst & McLaughlin, 2009; Goh *et al.*, 1994; Paramanathan, 2013), tal como se detalla en la Tabla 2. Por su parte, en suelos de turba se han reportado rendimientos de 30 t RFF/ha (Gurmit *et al.*, 1986) que, en general, son inferiores a rendimientos obtenidos en suelos minerales, debido a factores como la inclinación o caída de las palmas y a la inundación y/o sequía que afectan al primer tipo de suelo (Paramanathan, 2013).

Tabla 2. Factores determinantes del rendimiento en sistemas de palma de aceite: rendimiento con limitantes de agua (Yw).

Factor	Rango en las regiones productoras	Efectos en el rendimiento medidos en los casos de estudio	Referencias
Precipitación total y distribución	<p>Precipitación (mm/año)</p> <ul style="list-style-type: none"> Malasia e Indonesia: 1.700-4.000 África: 1.200-3.500 América: 1.600-3.500 <p>Meses secos (menos de 100 mm/mes)</p> <ul style="list-style-type: none"> Malasia e Indonesia: 0-3 África: 3-6 Américas: 0-5 	<ul style="list-style-type: none"> Rendimiento reducido con precipitaciones de < 2.000 mm/año o > 3.500 mm/año. Reducciones en relación con el déficit de agua: <ul style="list-style-type: none"> Ninguna si el déficit es menor al umbral de 50-200 mm/año, dependiendo de otras condiciones locales. Pérdida de 10-20 % por un déficit de 100 mm fuera del umbral. Reducción exponencial hasta < 10 t RFF/ha/año con un déficit de > 500 mm. Ver también la Tabla 3. 	<p>Dufrène <i>et al.</i> (1990) Hartley (1988) Paramanathan (2003) Goh (2000) Olivin (1986)</p>
Irrigación	<ul style="list-style-type: none"> La mayoría de las áreas se alimentan de agua lluvia. Plantaciones en Tailandia, partes de África y algunas regiones de las Américas utilizan irrigación. Algunos pequeños productores de las Américas y Tailandia utilizan irrigación; no es común en otras áreas. 	<ul style="list-style-type: none"> Respuesta estimada según el método IRHO para calcular el déficit de agua en el suelo: 20-30 kg RFF/ha/año por mm de agua de irrigación en áreas donde el déficit potencial de agua en el suelo es de 200-600 mm/año. Relación aproximadamente lineal entre el volumen de agua (mm agua transpirada/día) y la respuesta del rendimiento (t RFF/ha/año) en senderos de irrigación en Tailandia (déficit de agua en el suelo de 235 mm/año durante 3-4 meses): <ul style="list-style-type: none"> 18 t RFF a 0 mm 24 t RFF a 3,2 mm 28 t RFF a 6,4 mm 	<p>Palat <i>et al.</i> (2008) Ochs & Daniel (1976) Carr (2011)</p>
Tipo de suelo	<p>Tipos de suelo más comunes (según la taxonomía de suelos de USDA)</p> <ul style="list-style-type: none"> Sudeste Asiático: Ultisoles, Oxisoles e Histosoles. África: Oxisoles, Ultisoles y Mollisoles. Américas: Oxisoles y Ultisoles. 	<p>La mayoría de los suelos no presentan limitantes excepto por:</p> <ul style="list-style-type: none"> Suelos poco profundos (tipo Malacca y familia Baiayo): < 30 t RFF/ha/año. Suelos de textura gruesa (<i>psammets</i>): rendimiento 'pobre' pero no cuantificado. Suelos con limitaciones bioquímicas (suelos salinos, suelos de turba, suelos con sulfato ácido): 20-30 t RFF/ha/año con buen manejo. 	<p>Goh <i>et al.</i> (1994) Gurmit <i>et al.</i> (1986) Paramanathan (2013) Mutert <i>et al.</i> (1999) Paramanathan (2000)</p>
Textura del suelo	<ul style="list-style-type: none"> Suelos arenosos y/o arcillosos. 	<ul style="list-style-type: none"> Grandes pérdidas no cuantificadas en suelos arenosos y arcillosos. 	<p>Paramanathan (2003) Paramanathan, 2013)</p>
Topografía y pendiente	<ul style="list-style-type: none"> De plano a ondulado. 	<ul style="list-style-type: none"> Pendientes de > 20° no son adecuadas; pendientes de 10-20° requieren medidas de conservación del suelo. Reducción estimada de 10-30 % en pendientes de 2-7° sin medidas de conservación. Incremento en el rendimiento de 20-30 % (cultivo maduro, temporada seca de 3 meses) después de implementar medidas de conservación del suelo en pendientes de 2-5°. 	<p>Paramanathan (2003) Paramanathan (2013) Balasundram <i>et al.</i> (2006) Kee & Soh (2002) Murtlaksono <i>et al.</i> (2011)</p>

Continúa

Factor	Rango en las regiones productoras	Efectos en el rendimiento medidos en los casos de estudio	Referencias
Inundación	<ul style="list-style-type: none"> Común en áreas bajas en todas las regiones. Inundación o anegación localizada durante varios días o meses al año. 	<ul style="list-style-type: none"> Mortalidad de hasta 75 % en palmas no maduras en regiones con inundaciones frecuentes. Reducción estimada de 10-30 % en plantaciones maduras con drenaje deficiente. Aumentos de rendimiento de > 5 t RFF/ha después de drenaje en cultivos frecuentemente anegados. 	Lee & Ong (2006) Abram <i>et al.</i> (2014) Henson <i>et al.</i> (2008) Chuah & Lim (1992, citado por Lim <i>et al.</i> , 1994)

Tabla 3. Rendimiento con limitantes de agua en África en relación con la clase de suelo y el déficit hídrico asumiendo que todos los demás factores de producción son adecuados (con base en Olivin, 1968).

Tipo de suelo		Déficit de agua (mm)				
		0	100	200	300	400
Rendimiento (t RFF/ha/año)						
I	Bastante apropiado	≥ 27	24	18	14	12
II	Apropiado	25	20	16	13	10
IIb	Moderadamente apropiado	25	20	16	11	8
III	Algo apropiado	22	16	13	9	6
IV	Inapropiado	16	13	9	6	4

Topografía y pendiente

El área cultivada sobre pendientes incrementa los niveles de escorrentía superficial, lo cual reduce la cantidad de agua disponible para el cultivo. Estudios han propuesto que una pendiente máxima de 10° sin conservación del suelo o de 20° con bancales son las adecuadas para mantener la eficiencia económica del cultivo (Paramanathan, 2003), sin embargo, se han reportado buenos resultados de rendimiento en pendientes de 2-10° (Tabla 2). Las pérdidas de agua por escorrentía varían de cero a > 30 %, con pérdidas por erosión y fertilizantes ocasionadas principalmente por círculos libres de coberturas y surcos de cosecha donde los suelos están descubiertos y, por ende, se compactan (Bah *et al.*, 2014; Banabas *et al.*, 2008, Comte *et al.*, 2012). El agua y los fertilizantes fluyen desde las cimas y colinas hacia los valles, creando

heterogeneidad en la fertilidad de los suelos y su productividad (Balasundram *et al.*, 2006), así como algunos problemas ambientales (Comte *et al.*, 2012).

Inundación

La palma de aceite es tolerante a inundaciones temporales, lo cual se debe en parte a la capacidad de sus raíces para formar estomas (Jourdan & Rey, 1997; Purvis, 1956). Sin embargo, las raíces sumergidas no cuentan con la capacidad de respirar normalmente, lo que conlleva a una menor absorción de agua y nutrientes, una apertura tardía de la fronda y a una disponibilidad de carbohidratos reducida (Corley & Tinker, 2016). Henson *et al.* (2008) demostraron que la actividad fotosintética y las tasas de transpiración son de 3 a 4 veces inferiores en plantas bajo condiciones de inundación en comparación con palmas en

suelos bien drenados. La anegación es un problema común en plantaciones del Sudeste Asiático (Lee & Ong, 2006; Paramanathan, 2003), en donde se han observado reducciones severas en la productividad de los cultivos de palma (Abram *et al.*, 2014; Carr, 2011). No obstante, la información sobre los efectos del drenaje en la productividad de cultivos anegados es aún escasa (Tabla 2). Por otra parte, la literatura reporta que en suelos de turba y suelos ácidos, un drenaje adecuado junto con un nivel freático de 40-50 cm por debajo del nivel del suelo –o por encima de la capa de sulfato ácido– son factores críticos para evitar la degradación del suelo, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y lograr la obtención de altos rendimientos (Othman *et al.*, 2011; Toh & Poon, 1981).

Rendimiento con déficit nutricional y factores limitantes

El rendimiento con déficit nutricional (Yn) (Tabla 4) depende de la localización del cultivo debido, principalmente, a los efectos que las propiedades del suelo tienen sobre la disponibilidad de nutrientes.

Los requerimientos nutricionales de la palma de aceite han sido un asunto ampliamente abordado en la literatura (Breure, 1982; Goh *et al.*, 2003; Ng, 1977; Uexküll & Fairhurst, 1991). Esta planta demanda cantidades de potasio particularmente elevadas y de otros componentes tales como nitrógeno, fósforo, magnesio y boro (Tabla 5), además de la aplicación de cobre y zinc en suelos de turba. Algunos trabajos han reportado diversos síntomas foliares que se hacen visibles ante la ocurrencia de deficiencias nutricionales severas (Broeshart *et al.*, 1957) (Tabla 5), por lo que se han establecido concentraciones de nutrientes en los tejidos críticos de la palma que dan cuenta de deficiencias de algunos nutrientes y permiten la identificación de este fenómeno (Uexküll & Fairhurst, 1991); no obstante, es de reconocer que el déficit nutricional se constituye como una limitante específica al lugar de siembra y el tipo de suelo (Foster, 2003; Foster & Chang, 1977). Considerando lo anterior, se requieren mediciones precisas de las concentraciones de N, P, K y Mg, tanto en el tejido de los folíolos como en el tejido del raquis, con el objetivo de suministrar dosis adecuadas de los fertilizantes requeridos (Foster & Prabowo, 2006; Prabowo *et al.*, 2011).

En los sistemas de cultivo de palma de aceite los nutrientes son removidos mediante la cosecha de racimos de fruto, la lixiviación, la escorrentía y la inmovilización del estípote. Adicionalmente, los nutrientes son reciclados a través de las hojas podadas y las inflorescencias masculinas, y son suministrados por el agua lluvia, las reservas de nutrientes del suelo, productos residuales derivados del procesamiento del fruto y la aplicación de fertilizantes (Ng *et al.*, 1999). Por lo general, se requieren fertilizantes químicos para mantener el equilibrio entre la remoción y el suministro de nutrientes. La respuesta a la aplicación de fertilizantes químicos en el rendimiento del cultivo depende de la ubicación de una plantación y varía ampliamente; tal como ha sido descrito en varios experimentos aleatorios factoriales con fertilizantes de N-P-K-Mg (ver Tohiruddin *et al.*, 2006). La Tabla 6 resume tres experimentos que analizan las respuestas observadas en el rendimiento tras la aplicación de N, P, K y Mg. Entre los resultados por destacar de dichos experimentos, el rango de eficiencias en el uso de nutrientes (EUN) a diferentes niveles fue de 0-45, 0-20 y 15-90 kg RFF por kg aplicado de nutriente ha/año para N, P y K, respectivamente (tratamiento 0-1). Además, al aumentar la cantidad de nutrientes aplicados desde cantidades promedio a grandes cantidades (Tratamiento 1-2), el EUN resultó ser negativo para algunos casos, registrando valores máximos de 13, 0 y 8 kg RFF por kg aplicado ha/año para N, P y K, respectivamente.

En ninguno de los experimentos analizados en la Tabla 6 se observó una respuesta clara del rendimiento a la aplicación de fósforo, sin embargo, bajo otras condiciones se han observado incrementos de 50-100 % en el rendimiento como respuesta a la aplicación de fertilizantes de este elemento químico (Ng, 1986; Sidhu *et al.*, 2001; Vossen, 1970). Así mismo, algunos trabajos reportan incrementos en el rendimiento de hasta 45 % como respuesta a la aplicación de Mg en algunas plantaciones al norte de Sumatra (Akbar *et al.*, 1976). Debido a la variabilidad en el EUN, es necesario realizar experimentos factoriales con fertilizantes específicos en ciertos lugares de siembra, en aras de optimizar la aplicación de fertilizantes en este cultivo (Tohiruddin *et al.*, 2010; Webb, 2009).

Tabla 4. Factores determinantes del rendimiento en sistemas de palma de aceite: rendimiento con déficit nutricional (Yn).

Factor	Rango en las regiones productoras	Efecto sobre el rendimiento	Referencias
Fertilización	<p>Cifras en kg/ha/año, asumiendo 140 palmas/ha</p> <ul style="list-style-type: none"> N: ≤ 260 kg P: ≤ 130 kg K: ≤ 350 (hasta 430 en suelos de turba) Mg: ≤ 70 B: ≤ 20 Cu (en turba): ≤ 10 Zn (en turba): ≤ 10 Mn, Cl, Ca, Fe, S: ocasionalmente 	<ul style="list-style-type: none"> Para N, P, K y Mg: ver Tabla 5. B: reducción de > 35% en palmas con síntomas de deficiencia severa de B. Cu (en turba): incremento de 10-25 %. Zn (en turba): incremento de 10-80 %. 	<p>Rankine & Fairhurst (1999b) Rajaratnam (1973) Cheong & Ng (1977) Gurmit (1988) Osman & Kueh (1996) Ng (2002)</p>

Tabla 5. Función de los nutrientes clave en la fisiología de la palma.

Elemento	Función fisiológica	Efecto de la deficiencia en el crecimiento y el rendimiento	Síntomas visuales	Referencias
Nitrógeno	Formación de clorofila, aminoácidos, ADN y ATP.	Supresión de la tasa neta de asimilación; producción reducida de materia vegetal seca; duración reducida del filocrono; menor peso y número de racimos.	Clorosis en hojas jóvenes; atrofia.	Corley & Mok (1972) Bah-Lias (2011)
Fósforo	Formación de ADN, ARN y ATP.	Rendimiento reducido en algunos suelos; respuesta reducida a fertilizantes con N y K.	Forma cónica del estípite.	Kraip & Nake (2006) Bah-Lias (2011) Ng (1986)
Potasio	Transporte de fotosintatos y control de la apertura de estomas.	Producción reducida de materia vegetal seca; peso y número de racimos altamente reducido.	Manchas amarillas en las hojas de mayor edad.	Corley & Mok (1972) Bah-Lias (2011) Braconnier & d'Auzac (1985) Zakaria <i>et al.</i> (1990)
Magnesio	Formación de clorofila, agregación de ribosomas, funcionamiento de las enzimas.	Aumento en el rendimiento en algunos suelos; respuesta reducida a fertilizantes de N y K; proporción racimo/aceite reducida.	Color amarillo/naranja en los folíolos expuestos a la luz solar.	Dubos <i>et al.</i> (1999) Härdter (1999) Shaul (2002)
Boro	Formación de ARN, formación de polen, síntesis de flavonoides, formación de semillas y paredes celulares.	Reducción del IAF (producción de "hojas pequeñas"); número reducido de racimos y rendimiento inferior con presencia de síntomas en los folíolos.	Folíolos arrugados; atrofia de las hojas más jóvenes ("hoja pequeña").	Rajaratnam (1973) Rajaratnam & Lowry (1974)
Cobre, zinc	Transporte de electrones y desarrollo de la fotosíntesis.	Fotosíntesis reducida (Zn); producción reducida de materia vegetal seca (Zn); cantidad y tamaño de racimos reducido (Zn, Cu).	Amarillamiento y necrosis de las hojas más viejas comenzando desde la punta del folíolo.	Cheong & Ng (1977) Gurmit (1988) Osman & Kueh (1996)

Tabla 6. Efectos de N, P, K y Mg sobre el rendimiento en tres experimentos con fertilizantes.

Fuente	Corley & Mok (1972)			Kraip & Nake (2006)			Bah-Lias (2011)					
Ubicación	Sur de Johor, Malasia			Bahía de Milne, Papúa Nueva Guinea			Sur de Sumatra					
Tipo de suelo	Loam de arcilla arenosa derivado de granito, oxisuelo rojo-amarillo (serie Rengam)			Loam aluvial de arcilla arenosa (fluvial)			Inceptisuelo kaolinitico arcilloso con pH bajo (<i>dystrudept</i> típico)					
Edad de la palma (años)	10-20			5			14					
Duración de la prueba (años)	10			7			> 14					
Palmas/ha	114			127			143					
Tratamientos (kg/palma/año)	<hr/>			<hr/>			<hr/>					
		0	1	2		0	1	2		0	1	2
	N	0	0,8	1,5	N	0	0,4	0,7	N	0	0,9	1,8
	P	0	0,9	1,7	P	0	0,2	0,2	P	-	0,2	0,5
	K	0	1,8	3,7	K	0,4	1,2	2,2	K	0	1,0	2,0
Mg	0	0,4	0,8					Mg	0	0,2	-	
Rendimiento (t rff/ha)	<hr/>			<hr/>			<hr/>					
		0	1	2		0	1	2		0	1	2
	N	25	29	30	N	31	31	29	N	15	20	21
	P	27	29	28	P	30	30	-	P	-	19	18
	K	26	29	29	K	28	31	32	K	10	23	22
Mg	27	28	29					Mg	19	18	-	
Comentarios	Efecto significativo de K a los 4 y 5 años de siembra, pero no a los 6 y 7 años.						Incremento significativo del rendimiento por la aplicación de P y Mg a niveles más altos de N y K.					

Rendimiento real y factores limitantes

El rendimiento real (Ya) es el rendimiento obtenido bajo limitantes de agua y nutrientes, y la incidencia de malezas, plagas y enfermedades (van Ittersum & Rabbinge, 1997). El rendimiento acumulado durante la vida del cultivo es el indicador de productividad más importante, ya que considera la duración de la fase improductiva. Esta tiene similitudes con la producción de leche de vaca, con la diferencia de que los individuos de un hato lechero pueden ser reemplazados uno a la vez (van der Linden *et al.*, 2015), mientras que las palmas defectuosas solo pueden ser reemplazadas durante la fase de vivero y

el transcurso de los primeros 12 meses de siembra definitiva en sitio.

Por su parte, los efectos de la reducción en el rendimiento ocasionados por plagas y enfermedades se desarrollan en un periodo de al menos tres años (Adam *et al.*, 2011; Corley, 1976b; Corley & Gray, 1976; Legros *et al.*, 2009a). Este retraso, sumado a variaciones temporales en la producción de frutos, complica la interpretación de la información sobre el rendimiento de la palma de aceite (Legros *et al.*, 2009a). Frente a esta situación, el cálculo de los “rendimientos continuos” durante un periodo de 12 meses es útil para filtrar la variabilidad temporal al analizar tendencias en el rendimiento (Uexküll & Fairhurst, 1991). Se conoce que el

daño causado por la presencia de plagas y la incidencia de enfermedades en etapas tempranas de la vida de un cultivo suele tener un gran impacto en el rendimiento total, especialmente cuando estas afectaciones conducen a la muerte de la palma. Los diferentes factores que reducen el rendimiento desde esta perspectiva son presentados en la Tabla 7 y abordados con mayor profundidad en los siguientes apartados.

Coberturas

Las coberturas protegen al suelo de la erosión y suministran un hábitat para los enemigos naturales de las plagas, además de interactuar con los ciclos del agua y los nutrientes (Tabla 7). No obstante, si se permite que estas crezcan sin control se reduce el acceso físico a un cultivo, lo cual resulta en la ejecución de una labor de cosecha incompleta e ineficiente. Cierta tipo de coberturas, especialmente leñosas, de arrastre y la cisca (*Imperata cylindrica*), compiten fuertemente con la palma de aceite por agua y nutrientes (Surre, 1968; Wood, 1997). La presencia de coberturas en plantaciones inmaduras pueden reducir los rendimientos al cubrir las plantas jóvenes, limitando así la radiación disponible para su desarrollo (Tabla 7).

En plantaciones maduras la respuesta del rendimiento real a varias poblaciones de coberturas continúa siendo desconocida. Sin embargo, se prefiere contar con algunas leguminosas tolerantes a la sombra, así como ciertas hierbas suaves y *Nephrolepis spp.*, debido a que son de fácil manejo, prevalecen sobre coberturas nocivas para el cultivo y además no compiten con la palma (Samedani *et al.*, 2014b). Adicionalmente, las leguminosas suministran una ventaja adicional gracias a su capacidad para fijar nitrógeno en el suelo; muestra de ello es que un cultivo con coberturas leguminosas bien establecido puede suministrar más de 150 kg N ha/año durante los primeros 4 años (Agamuthu & Broughton, 1985; Giller, 2001; Giller & Fairhurst, 2003).

Plagas

Los insectos defoliadores están presentes en todas las regiones productoras de palma de aceite del mundo.

Periódicamente ocurren brotes a gran escala de alguna u otra especie de plagas, particularmente de orugas como *Psychidae spp.* y *Lamicodidae spp.* en el Sudeste Asiático (Wood, 1968), y de los minadores *Coelaenomenoera spp.* en África Occidental (Mariau, 1976; Mariau & Lecoustre, 2000). Los efectos de una presencia disminuida de estas especies son leves, sin embargo, los rendimientos pueden verse fuertemente afectados cuando se genera una defoliación severa y se reduce el IAF a menos de 5 (Wood, 1977), como se muestra en la Tabla 7. Otra de estas plagas es el escarabajo rinoceronte (*Orcytes rhinoceros*), el cual prolifera tanto en plantaciones maduras como inmaduras (Bedford, 1980). Por lo general, los efectos de esta especie son limitados en plantaciones maduras, sin embargo, este representa una seria amenaza en plantaciones jóvenes, ya que es capaz de reducir el crecimiento de la palma al afectar el punto de crecimiento y, rara vez, conducir a la muerte de palmas inmaduras (Tabla 7). Estas especies ocasionan además una demora en el proceso de madurez de la palma y en su proceso de desarrollo en general, por lo tanto, generan una reducción en el rendimiento durante el comienzo de la fase productiva (Wood *et al.*, 1973).

Además de las especies antes mencionadas, las ratas (*Rattus spp.*) son también una plaga común en todas las regiones productoras, con poblaciones no verificadas que llegan hasta más de 300 individuos por hectárea en plantaciones maduras. Las ratas se alimentan de los frutos en desarrollo y ocasionan pérdidas directas en el potencial de aceite (Wood & Chung, 2003; Wood & Liau, 1984) (Tabla 7). En la fase inmadura estos roedores pueden comerse el tronco de las plántulas y destruir su punto de crecimiento, conduciendo así a la muerte de la palma.

Enfermedades

Existen dos enfermedades que ocasionan pérdidas significativas en el rendimiento de los cultivos de palma de aceite: la Pudrición basal del estípite (PBE) en el Sudeste Asiático y África, y la Pudrición del cogollo (PC) en Latinoamérica. La PBE, causada por el hongo patógeno *Ganoderma boninense*, puede devastar plantaciones de palmas maduras (Flood *et al.*, 2000; Flood & Hasan, 2004; Idris *et al.*,

2004)³ y se ha identificado que el inicio de la infección ocurre con mayor prontitud después de cada resiembra si no se toman las medidas sanitarias pertinentes. Esta enfermedad puede aparecer al primer o segundo año de la resiembra, especialmente cuando un cultivo de palma se establece sobre una plantación anterior de palma de aceite o de palma de coco (Airiffin *et al.*, 2000). De acuerdo con la literatura, la implementación de un periodo de barbecho de un año puede reducir las tasas de infección de esta enfermedad significativamente, pero aumenta la proporción inmadura/en descanso a reposo de 0,12 a 0,15 (Viridiana *et al.*, 2010) (Tabla 7). La adopción de planes de manejo sanitario que incorporan la remoción del material enfermo, ha sido ampliamente recomendada como estrategia de manejo en plantaciones maduras (Chung, 2011; Hushiarian *et al.*, 2013), sin embargo, no existe evidencia experimental que demuestre de manera concluyente que la eliminación de los individuos afectados reduzca la incidencia de PBE (Hoong, 2007; Idris *et al.*, 2004). En este escenario, el mejoramiento

genético de materiales de siembra resistentes a esta y otras enfermedades es una estrategia importante para evitar futuras pérdidas de rendimiento en el cultivo de palma (Durand-Gasselín *et al.*, 2005; Ho & Tan, 2015).

Por su parte, la Pudrición del cogollo (PC) es una enfermedad letal que afecta cultivos en Centro y Suramérica, con brotes incidentales que han causado la destrucción de plantaciones completas de miles de hectáreas desde la década de 1960 (De Franqueville, 2003). El agente etiológico de esta enfermedad en Colombia es el oomiceto *Phytophthora palmivora* (Martínez *et al.*, 2010), aunque otros patógenos, como el hongo *Fusarium* y la bacteria *Erwinia* spp., así como la plaga *Rhynchophorus palmarum* y una variedad de factores abióticos, han sido asociados a la aparición de síntomas de PC (Benítez & García, 2014). Para combatir esta enfermedad existen diversas medidas de manejo sanitario y de prevención, aunque estas resultan costosas y requieren de esfuerzos de enormes proporciones en las labores de cultivo (Fontanilla *et al.*, 2014).

Tabla 7. Factores que limitan el rendimiento en sistemas de palma de aceite: rendimiento real (Yn).

Factor	Rango en las áreas de cultivo de palma de aceite	Efectos sobre el rendimiento	Referencias
Manejo de coberturas vegetales	<ul style="list-style-type: none"> Buenas prácticas: coberturas leguminosas con dosel cerrado durante los primeros 6 años; después de los 6 años, dosel cerrado de coberturas suaves sin malezas nocivas o leñosas. Prácticas comunes: deshierbe (empresas y pequeños productores), o sin deshierbe (pequeños productores). 	<ul style="list-style-type: none"> Crecimiento descontrolado de coberturas: reducción de 50-60 % en plantaciones jóvenes durante la primera cosecha; no hay datos para plantaciones maduras. Deshierbe: reducción de hasta 50 % en plantaciones de 4-6 años. Siembra de coberturas leguminosas: incremento de 10-20 % en los primeros años productivos, en comparación con el uso de coberturas no leguminosas. 	Ojuederie <i>et al.</i> (1983) Samedani <i>et al.</i> (2014a) Wood (1977)
Plagas: insectos defoliadores	<ul style="list-style-type: none"> Comunes en todas las regiones productoras. En caso de epidemia severa se ocasiona la defoliación total de grupos de palmas. 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdidas en el rendimiento en caso de defoliación total: ~ 50, 25 y 15 % a 1, 2 y 3 años de la defoliación, respectivamente. 	Wood (1977) Wood <i>et al.</i> (1973)

Continúa

3 Para una revisión de investigaciones previas ver Paterson (2007).

Factor	Rango en las áreas de cultivo de palma de aceite	Efectos sobre el rendimiento	Referencias
Plagas: <i>Orcytes</i>	<ul style="list-style-type: none"> Comunes en plantaciones inmaduras de todas las regiones productoras. 	<ul style="list-style-type: none"> Reducciones de 50 y 20 % en el primer y segundo año de producción, respectivamente, después de ataques severos. Rara vez: muerte de palmas inmaduras seriamente afectadas. En etapa madura: reducciones en el rendimiento cuando el IAF es inferior a 5 (raro). 	Wood (1977) Wood <i>et al.</i> (1973) Cahyasiwi <i>et al.</i> (2010) Sushil & Mukhtar (2008)
Plagas: ratas	<ul style="list-style-type: none"> Común en todas las regiones. En caso de infestación severa la población puede alcanzar > 300 individuos/ha 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdida de aceite de 5 % (130-240 kg aceite/t/año) en plantaciones maduras con poblaciones de ratas a nivel de "saturación". Muerte de palmas inmaduras, desarrollo incompleto o periodo de inmadurez más prolongado. 	Wood & Liau (1984) Wood & Chung (2003) Puan <i>et al.</i> (2011)
Enfermedades: Pudrición basal del estípite (PBE) - <i>Ganoderma</i>	<ul style="list-style-type: none"> Común en todas las regiones, especialmente el Sudeste Asiático. Potencialmente mortal en Malasia y Sumatra, con tasa de mortalidad de hasta 80 % en palmas de > 15 años. 	<ul style="list-style-type: none"> Mortalidad en palmas de hasta 30-40 % a los 12 años y > 50 % a los 25. Cuando hay pérdida de > 10 % de las palmas en un cultivo: reducción en el rendimiento de 0,16 t RFF/ha por muerte de cada palma adicional. Pérdida del rendimiento cercana a 35 % cuando el índice de mortalidad de las palmas alcanza 50 %. Un año después de la resiembra: reducción de 4 % en el rendimiento acumulado debido al incremento de un año en el periodo improductivo; tasa de infección reducida de 30 % a 3-6 % a los 9 años. 	Flood <i>et al.</i> (2000) Idris <i>et al.</i> (2004) Ariffin <i>et al.</i> (2000) Cooper <i>et al.</i> (2011) Flood <i>et al.</i> (2002) Viridiana <i>et al.</i> (2010)
Enfermedades: Pudrición del cogollo (PC)	<ul style="list-style-type: none"> Común en Suramérica, con tasa de mortalidad de hasta 100 % en caso de brotes severos. 	<ul style="list-style-type: none"> Avance de la enfermedad: fase lineal (pérdida de ~ 1 % de las palmas por año, generando efectos limitados en el rendimiento); fase exponencial (destrucción de hasta 100 % de las palmas, pérdida total del rendimiento). Cuando se pierde > 10 % de las palmas sembradas: reducción del rendimiento de 0,16 t RFF/ha por muerte de cada palma adicional. 	Uexküll <i>et al.</i> (2003) De Franqueville (2003) Cooper <i>et al.</i> (2011) Lopez (2010)

Interacción entre factores de estrés

Si bien cada factor de producción tiene efectos cuantificables sobre el rendimiento, en la realidad existe una interacción de múltiples factores. Por ejemplo, un buen manejo de las coberturas vegetales aumenta la retención de agua del suelo, previene el establecimiento de malezas que compiten con la palma y contribuye a incrementar la población de aquellos insectos que son enemigos naturales de las plagas que afectan al cultivo.

Para el cierre de brechas de productividad es necesario considerar dichas interacciones y abordar simultáneamente los diferentes tipos de estrés del cultivo. Algunos ejemplos de estos esfuerzos son el acercamiento a la Explotación Máxima de los Potenciales Genéticos (MEGYP, por sus siglas en inglés) (Henson & Chang, 1990) y el enfoque de las Mejores Prácticas de Manejo (BMP, por sus siglas en inglés) (Griffiths & Fairhurst, 2003; Witt *et al.*, 2005). El registro preciso de rendimientos, el uso de insumos y factores climáticos y

ambientales son también un componente esencial de todas las estrategias que buscan mejorar el rendimiento en este cultivo industrial (Griffiths *et al.*, 2002).

Causas actuales de las brechas de productividad y perspectivas a futuro

En esta sección se discuten los principales factores que contribuyen al establecimiento de brechas de productividad en el cultivo de palma de aceite a nivel mundial, con un enfoque especial hacia los pequeños productores, quienes enfrentan una serie de limitaciones únicas. Los pequeños agricultores, aquellos con un área sembrada inferior a 50 ha, producen cerca del 40 % del volumen total de APC en el mundo (RSPO, 2015), de allí su importancia.

La Tabla 8 presenta el rendimiento potencial de aceite de palma de los principales países productores,

empleando estimaciones específicas para el caso de Indonesia, Malasia y Ghana mediante el modelo PALMSIM (Hoffman *et al.*, 2014; Rhebergen *et al.*, 2014). En el caso de los demás países productores no se cuenta con perfiles de rendimiento potencial disponibles. Sin embargo, información suministrada por pruebas de los mejores rendimientos o por los productores puede proporcionar un punto de referencia. Trabajos sobre el tema señalan que pueden existir grandes variaciones en el rendimiento potencial entre países, lo cual depende principalmente de las condiciones de radiación (nubosidad) y elevación (temperatura) en cada región.

La Tabla 9 muestra los rendimientos reales de los 16 principales países productores de palma de aceite en el mundo en 2013. A nivel mundial, los rendimientos promedio han estado incrementando constantemente y en la actualidad son de 15 t RFF/ha o 3,0 t de aceite/ha. No obstante, estos incrementos son lentos

Tabla 8. Rendimiento potencial durante el ciclo de vida de un cultivo en países seleccionados del Sudeste Asiático, África y las Américas.

País	Rendimiento potencial (t/ha/año)		Observación	Fuente
	RFF ^a	Aceite ^b		
Indonesia	32-40	8-10	Áreas bajas, modelado	Hoffmann <i>et al.</i> (2014)
	16-32	4-8	Elevaciones mayores, modelado	Hoffmann <i>et al.</i> (2014)
Malasia	38	9,5	Pruebas de progenie	Rajanaidu & Kushairi (2006)
	24-32	6-8	Áreas costeras bajas, modelado	Hoffmann <i>et al.</i> (2014)
	8-24	2-6	Al interior, modelado	Hoffmann <i>et al.</i> (2014)
Tailandia	36	9	Pruebas de progenie	Univanich (2011), Rao <i>et al.</i> , (2008)
Ghana	30-36	7,5-9	Modelado	Hoffmann <i>et al.</i> (2015)
Ecuador	28	7	En estación de investigación	Mite <i>et al.</i> , (1999b); Pulver & Guerrero (2014)
Costa Rica	36	9	Prueba de progenie	ASD Costa Rica (2014)
Guatemala	32	8	Prueba de progenie	ASD Costa Rica (2014)

^a Los rendimientos pico en años únicos fueron convertidos a promedios a 25 años asumiendo un rendimiento durante la vida del cultivo = 0,8 x rendimiento del año pico (adaptado de Goh *et al.*, 1994).

^b Suponiendo una tasa de extracción de aceite de 25 %.

en comparación con otros cultivos (Fry, 2009; Murphy, 2009). Al comparar los números de la Tabla 9 con los rendimientos potenciales estimados en la Tabla 8, es claro que las brechas de productividad son amplias en la mayoría de países. En el Sudeste Asiático, por ejemplo, la producción promedio de aceite de las principales compañías productoras es de 5,5 t de aceite ha/año (23 t RFF/ha/año) (Fairhurst & Griffiths, 2014). Por su parte, la producción estimada de los pequeños productores en Indonesia es de solo 13 t RFF/ha/año (Molenaar *et al.*, 2013; FAO, 2013), aunque con algunas excepciones positivas, como en el caso del esquema asociativo de pequeños productores *Ophir*, en el este de Sumatra, en donde los rendimientos han llegado a ser de hasta 22 t RFF/ha/año. En contraste, en África los rendimientos reales promedio son inferiores a 8 t RFF/ha/año (Tabla 9).

Los rendimientos con limitaciones de agua en áreas actualmente sembradas son de cerca de 3,5 t de aceite/ha/año en África (Rhebergen *et al.*, 2014), 4,5 t de aceite/ha/año en las Américas (Melling & Henson, 2011) y Tailandia (Palat *et al.*, 2008), y de 5,5 t de aceite/ha/año en Indonesia y Malasia (Corley, 2009). Las brechas actuales en el rendimiento varían de 2 a 4 t de aceite/ha/año en sistemas de pequeños agricultores y de 1 a 3 t de aceite/ha/año en grandes productores. El cierre de estas brechas a niveles de tan solo 80 % de Yw podría incrementar potencialmente la producción mundial en cerca de 15-20 millones de t de aceite/año, para lo cual, sin mejorar la productividad, sería necesario despejar el equivalente a 4-6 millones de hectáreas de nuevas tierras.

En África, cultivos de palma en aldeas tradicionales suelen sembrarse con material 100 % *dura*, lo cual explica parcialmente las bajas tasas de extracción encontradas en la mayoría de los países productores en este continente (Tabla 9). En Indonesia, es probable que la presencia del material *dura* en los cultivos de pequeños productores sea un hecho común, con un estimado de 50 % de pequeños agricultores independientes que usan materiales de siembra no híbridos (Molenaar *et al.*, 2013). Una resiembra temprana (es decir, resiembra antes de que se haya completado el ciclo de 25 años) con nuevas variedades que presentan mayores rendimientos, es una de las estrategias más importantes para incrementar las cifras de productividad. En Malasia, por ejemplo, la resiembra tardía ha llevado al envejecimiento de las plantaciones de palma de aceite en algunas regiones, lo cual conlleva a la obtención de un rendimiento reducido (USDA-FAS, 2012; Wahid & Simeh, 2010). Al respecto, se estima que la producción en palmas de 25-30 años es solo de 60 a 90 % con respecto a la productividad pico (Goh *et al.*, 1994). En el caso de los pequeños productores, la demora en la resiembra se debe a la falta de recursos financieros, lo cual se convierte en una seria amenaza para la productividad actual y futura de los países productores (Gobierno de Malasia, 2011; Molenaar *et al.*, 2013). Por otro lado, la proporción de plantaciones jóvenes con respecto a las maduras es alta en todo el mundo debido a la reciente expansión de áreas sembradas. En 2014, el 22 % del área sembrada en Indonesia se encontraba en etapa inmadura (USDA-FAS, 2015), mientras que el promedio de un área estática determinada que es sembrada cada 25 años es de 12 %.

Tabla 9. Producción y rendimiento de racimos de fruto fresco (RFF) y aceite de palma crudo (APC) por hectárea en los principales países productores (2013)*.

País	Área sembrada ^a (millones de ha)	Producción anual (millones de t)		Rendimiento (ha/año)		TEA ^b (%)	Fuente
		RFF	APC	RFF	APC ^c		
Indonesia	7,1	120	26,9	17	3,8	22,4	FAO, cifra no oficial
	8,1		30,5		3,8		USDA
Malasia	4,6	95,7	19,2	21	4,2	20,0	FAO, cifra no oficial
	4,5		20,2		4,5		USDA

Continúa

País	Área sembrada ^a (millones de ha)	Producción anual (millones de t)		Rendimiento (ha/año)	TEA ^b (%)	Fuente	
Nigeria	3,0	8,0	1,0	2,7	0,32	12,0	FAO, estimado
	2,5		1,0		0,39		USDA
Tailandia	0,63	12,8	2,0	20,5	3,1	15,1	FAO, cifra oficial
	0,66		2,0		3,0		USDA
Colombia	0,45	5	1,0	20	3,5	17,5	FAO, cifra oficial
	0,34		1,0		3,1		USDA
Ghana	0,36	2,1	0,12	5,8	0,30	5,2	FAO, estimado
	0,37		0,49		1,3		USDA
República de Guinea	0,31	0,8	0,05	2,7	0,20	7,4	FAO, estimado
	0,31		0,05		0,16		USDA
República del Congo	0,28	1,8	0,30	6,6	1,1	16,7	FAO, estimado
	0,18		0,22		1,2		USDA
Costa de Marfil	0,27	1,7	0,42	6,5	1,5	23,1	FAO, cifra no oficial
	0,27		0,42		1,5		USDA
Ecuador	0,22	2,3	0,33	10,6	1,5	14,2	FAO, cifra oficial
	0,22		0,57		2,6		USDA
Papúa Nueva Guinea	0,15	2,1	0,50	14	3,3	23,6	FAO, cifra no oficial
	0,15		0,50		3,4		USDA
Camerún	0,14	2,5	0,23	18,2	1,7	9,3	FAO, cifra no oficial
	0,13		0,29		2,2		USDA
Honduras	0,13	2	0,43	16	3,4	21,3	FAO, cifra no oficial
	0,13		0,46		3,7		USDA
Brasil	0,11	1,3	0,34	11,5	3,1	27,0	FAO, cifra oficial
	0,12		0,34		2,8		USDA
Guatemala	0,07	1,5	0,40	22,8	6,2	27,2	FAO, cifra no oficial
	0,10		0,43		4,3		USDA
Costa Rica	0,07	1,3	0,30	17,5	4,0	22,9	FAO, estimado
	0,06		0,21		3,5		USDA
Mundial	18,1	266,5	54,4	14,8	3,0	20,3	FAO, agregado
	18,6		59,4		3,2		USDA

^a No incluye el área improductiva.

^b La tasa de extracción de aceite (TEA) se calculó con datos del rendimiento ($t_{APC}/t_{RFF} \times 100$).

^c El rendimiento de APC se calculó dividiendo la producción sobre el área sembrada ($M t_{APC}/M ha sembradas$).

*Estas cifras son indicativas y deben manejarse con precaución ya que resulta difícil obtener datos precisos sobre áreas de siembra y rendimientos, especialmente en pequeños productores.

Fuente: FAO (2013); USDA-FAS (2016).

Varios trabajos reportan que las sequías son un factor limitante crítico para el rendimiento en África, partes de Latinoamérica y Centroamérica y algunas regiones del Sudeste Asiático. Con el fin de propiciar la expansión del cultivo de palma de aceite hacia zonas más secas y mejorar el rendimiento de este cultivo, se ha hecho uso exitoso de la irrigación en Ecuador (Mite *et al.*, 1999a), Tailandia (Palat *et al.*, 2008; Univanich, 2011) e India (Prasad *et al.*, 2010). Sin embargo, los sistemas de riego son poco comunes (y costosos) en la mayoría de las plantaciones. Como consecuencia del calentamiento global, es probable que la irrigación se vuelva cada vez más relevante debido a las proyecciones que indican incrementos considerables en la frecuencia de sequías, especialmente en África y Latinoamérica (Fischer *et al.*, 2007; Marengo *et al.*, 2009; Paeth *et al.*, 2009). No obstante, en aras de maximizar la eficiencia de los sistemas de riego, se hace necesario analizar los costos y beneficios asociados a la implementación de dichos sistemas, a partir de las condiciones ambientales propias de cada región productora.

De otro lado, se sabe que la anegación y las inundaciones son factores limitantes que no han sido cuantificados en gran medida y que, probablemente, afectan de manera crítica el rendimiento de este cultivo; especialmente en Malasia e Indonesia (Lee & Ong, 2006; Malay Mail Online, 2015). Sin embargo, no es claro aún si estos problemas representan una seria amenaza para la palmicultura en otras regiones productoras, por lo que se hace necesario avanzar en la investigación sobre los efectos de estos fenómenos en el rendimiento del cultivo durante las diferentes fases de su ciclo de vida.

Adicionalmente, debido a la escasez de suelos aptos para el desarrollo de cultivos de palma, a 2010 se habían despejado cerca de 2,1 millones de ha de suelos de turba en el Sudeste Asiático (Miettinen *et al.*, 2012; Koh *et al.*, 2011), lo cual implica la realización de prácticas de manejo del agua en este tipo de suelos que requieren del establecimiento de canales de drenaje,

presas y esclusas en grandes áreas (Lim *et al.*, 2012; Othman *et al.*, 2011). Considerando esta situación, los pequeños productores no pueden llevar a cabo la implementación de dichas prácticas debido a la inversión requerida, por lo tanto, es muy probable que obtengan rendimientos bajos, especialmente en aquellos cultivos localizados en zonas de turba profunda.

En cuanto a la aplicación de fertilizantes, la Tabla 10 detalla el uso de productos a base de N, P y K en 2010 en Indonesia, Malasia y Tailandia, con base en cifras de la Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (Heffer, 2013). Al respecto, algunos estudios señalan que la aplicación de fertilizantes, en general, se encuentra muy por debajo de los niveles óptimos, con variaciones entre 40 y 90 % en las tasas recomendadas (Rankine & Fairhurst, 1999b). Corley & Tinker (2016) afirman que en las plantaciones de Malasia se aplica casi el doble de P y K que en Indonesia, y casi tres veces más K que en Tailandia; no obstante, la aplicación promedio de K continúa siendo insuficiente. Sobre este asunto no se encontraron datos disponibles para otros países productores.

En algunos cultivos de pequeños productores en Indonesia (Lee *et al.*, 2013; Molenaar *et al.*, 2013; Woittiez *et al.*, 2015) y África (Kim *et al.*, 2013; Nkongho *et al.*, 2014; Rafflegeaut *et al.*, 2010) se aplican cantidades limitadas de fertilizantes, con tasas de aplicación de K especialmente bajas (Rafflegeaut *et al.*, 2010; Woittiez *et al.*, 2015). En general, no existen recomendaciones específicas al lugar de aplicación debido a que el análisis de tejidos y la realización de experimentos con fertilizantes en sitio solo pueden ser implementados cuando se lleva a cabo un manejo y un muestreo colectivo (Jelsma *et al.*, 2009). Por otra parte, considerando que los pequeños productores pueden tener un acceso limitado a los fertilizantes orgánicos resultantes del proceso de extracción de aceite, estos han integrado la crianza de ganado a sus sistemas de palma de aceite con el fin de contar con el suministro de abono orgánico.

Tabla 10. Uso de fertilizantes (N, P y K) en cultivos de palma de aceite de Indonesia, Malasia y Tailandia 2010/2011*.

Nutriente	Aplicación total (1.000 t/año)			Aplicación por hectárea (kg/ha/año) ^a			Remoción de nutrientes ^b (kg/ha/año)
	Indonesia	Malasia	Tailandia	Indonesia	Malasia	Tailandia	
Nitrógeno (N)	548	374	41	95	91	72	146
Fósforo (P)	61	78	9	11	19	16	19
Potasio (K)	643	821	39	111	199	69	248

^a Se calculó dividiendo la aplicación total entre el área total sembrada para 2010 (FAO, 2013).

^b Asumiendo un rendimiento de 30 t RFF/ha (Corley & Tinker, 2003, 358).

*No se encontraron datos disponibles para otros países productores.

En lo que tiene que ver con las afectaciones generadas por plagas propias de la palma de aceite, la literatura reporta que el impacto de estas es relativamente leve, a excepción del daño ocasionado por el parásito minador en cultivos de África Occidental (Chung, 2015). En Malasia, la incidencia estimada de *Ganoderma* en 2009 fue cercana a 3,75 % del área con palma adulta, con un incremento anual en la tasa de incidencia de > 10 %, que corresponde al estimado de 270.000 ha afectadas durante 2015 (Roslan & Idris, 2012). En Indonesia, *Ganoderma* es la afectación que prevalece en Sumatra, generando pérdidas de 40-50 % de las palmas al momento de la resiembra (Cooper *et al.*, 2011). En Latinoamérica, la PC continúa siendo una causa importante de la pérdida de rendimiento en los cultivos (Benítez-Sastoque, 2011). Actualmente, esta enfermedad afecta un área estimada de 15 % del total sembrado en Colombia (Fontanilla *et al.*, 2014), con proporciones similares en otros países de la región (Gálvez-Intriago, 2014; Tapia & Velasco, 2015).

Del lado de la mano de obra requerida para el cultivo de palma de aceite, la escasez de trabajadores calificados, especialmente para la labor de cosecha, es un problema clave para esta agroindustria en Malasia e Indonesia. Este fenómeno conlleva a que las rondas de cosecha se hagan en periodos cada vez más distantes, lo cual resulta en menores tasas de extracción de aceite, pérdida de frutos sueltos y racimos no cosechados (Murphy, 2014). Las plantaciones en Malasia reportan una escasez de 20-30 % de mano de obra para distintas labores. En consecuencia, se generan

pérdidas de rendimiento cercanas a 15 % (Murphy, 2014). Por su parte, en Latinoamérica la mano de obra es más costosa que otros países, lo cual establece una desventaja competitiva frente a otras naciones productoras. Algunas alternativas de mecanización de labores para la aplicación de fertilizantes y pesticidas y para labores de cosecha se encuentran en desarrollo, sin embargo, estas no han sido suficientemente efectivas en dar solución al problema de la escasez de mano de obra para el sector (Carter *et al.*, 2007; Khalid & Shuib, 2014; Yahya *et al.*, 2013).

Conclusiones

Las brechas de productividad en el cultivo de palma de aceite son amplias. No obstante, existe un margen considerable para mejorar los rendimientos y el desempeño ambiental de este cultivo agroindustrial. La respuesta del rendimiento a las inundaciones, el drenaje, la aplicación de fertilizantes con micronutrientes y al estrés biótico en plantaciones maduras es un tema que no ha sido comprendido suficientemente bien. Existe un número de procesos básicos subyacentes a la producción de racimos que requiere de investigación adicional, especialmente respecto a la determinación del sexo y al malogro de racimos. Igualmente, se debe esclarecer el entendimiento de las señales del cultivo en respuesta al estrés por déficit hídrico con el fin de desarrollar aún más las estrategias en torno al mejoramiento de materiales genéticos y al diseño de sistemas de riego.

Considerando que los pequeños productores generan 40 % del suministro mundial de aceite de palma, aun estando rezagados en términos de rendimiento, es necesario encaminar esfuerzos hacia la comprensión de todos los factores que limitan el rendimiento en sus cultivos, así como identificar esquemas efectivos de apoyo para mejorar la sostenibilidad y la productividad de sus plantaciones.

Lograr un incremento de 80 % en el rendimiento mundial bajo condiciones de limitantes hídricas significaría propiciar la intervención de 4 a 6 millones de hectáreas de tierra nuevas. En vista de lo anterior, incrementar los rendimientos de los cultivos existentes de manera ambientalmente sostenible,

fomentando la expansión del área sembrada únicamente hacia suelos degradados, es la manera más responsable de desarrollar esta agroindustria y así satisfacer la creciente demanda (actual y futura) de aceite de palma, evitando al mismo tiempo la pérdida de bosques húmedos tropicales.

Agradecimientos

La realización de este trabajo fue financiada por la Wageningen University, Países Bajos. Agradecemos a Tiemen Rhebergen y a un experto anónimo por sus valiosos comentarios. Los autores nos hacemos responsables de cualquier error u omisión.

Referencias bibliográficas

- Abram, N. K., Xofis, P., Tzanopoulos, J., MacMillan, D. C., Ancrenaz, M., Chung, R., ... & Knight, A. T. (2014). Synergies for improving oil palm production and forest conservation in flood plain landscapes. *PLoS One* 9(6), 1-12. doi: 10.1371/journal.pone.0095388.
- Adam, H., Jouannic, S., Escoute, J., Duval, Y., Verdeil, J. L., Tregear, & J. W. (2005). Reproductive developmental complexity in the African oil palm (*Elaeis guineensis* *Arecaceae*). *Am. J. Bot.*, 92(11), 1836-1852. doi: 10.3732/ajb.92.11.1836.
- Adam, H., Collin, M., Richaud, F., Beule, T., Cros, D., Omoro, A., Nodichao, L., Nouy, B., & Tregear, J. W. (2011). Environmental regulation of sex determination in oil palm: current knowledge and insights from other species. *Ann. Bot.*, 108(8), 1529-1537. doi: 10.1093/aob/mcr151.
- Agamuthu, P., Broughton, W. J. (1985). Nutrient cycling within the developing oil palm-legume ecosystem. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 13(2), 111-123. doi: 10.1016/0167-8809(85)90054-4.
- Aggarwal, P. K., & Kalra, N. (1994). Analyzing the limitations set by climatic factors, genotype, and water and nitrogen availability on productivity of wheat. Climatically potential yields and management strategies. *Field Crops Res.*, 38(2), 93-103. doi: 10.1016/0378-4290(94)90003-5.
- Akbar, U., Tampubolon, F., Amiruddin, D., & Ollagnier, M. (1976). Fertilizer experimentation on oil palm in North Sumatra. *Oléagineux*, 31(7), 305-316.
- Amthor, J. S. (1984). The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant Cell Environ.*, 7(8), 561-569. doi: 10.1111/j.1365-3040.1984.tb01856.x.

- Anderson, W. K. (2010). Closing the gap between actual and potential yield of rain-fed wheat. The impacts of environment, management and cultivar. *Field Crops Res.*, 116(1-2), 14-22. doi: 10.1016/j.fcr.2009.11.016.
- Angelsen, A. (2010). Policies for reduced deforestation and their impact on agricultural production. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 107(46), 19639-19644.
- Ariffin, D., Idris, A. S., Gurmit, S. (2000). Status of *Ganoderma* in oil palm (pp. 49-68). In: Flood, J., Bridge, P. D., & Holderness, M. (Eds.). *Ganoderma Diseases of Perennial Crops*. Wallingford: CABI Publishing.
- ASD Costa Rica (2014). *Guía de Variedades y Clones*. San José: ASD Costa Rica.
- Bafor, M. E., & Osagie, A. U. (1986). Changes in lipid class and fatty acid composition during maturation of mesocarp of oil palm (*Elaeis guineensis*) variety dura. *J. Sci. Food Agric.*, 37(9), 825-832. doi: 10.1002/jsfa.2740370902.
- Bah-Lias (2011). Oil palm NPKMg fertiliser trial (Sei Lakitan) EXPT EG00.1412A. In: *Bah Lias Annual Report Volume 1*. Bah Lias Research Station, PTTP London-Sumatra Indonesia, Medan, pp. 89-92.
- Bah, A., Husni, M. H. A., Teh, C. B. S., Rafii, M. Y., Syed-Omar, S. R., & Ahmed, O. H. (2014). Reducing runoff loss of applied nutrients in oil palm cultivation using controlled-release fertilizers. *Adv. Agric.*, 2014. doi: 10.1155/2014/285387.
- Balasundram, S. K., Robert, P. C., Mulla, D. J., & Allan, D. L. (2006). Relationship between oil palm yield and soil fertility as affected by topography in an Indonesian plantation. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 37(9-10), 1321-1337. doi: 10.1080/00103620600626817.
- Banabas, M., Turner, M. A., Scotter, D. R., & Nelson, P. N. (2008). Losses of nitrogen fertiliser under oil palm in Papua New Guinea: 1. Water balance, and nitrogen in soil solution and runoff. *Aust. J. Soil Res.*, 46(4), 332-339. doi: 10.1071/sr07171.
- Bedford, G. O. (1980). Biology ecology and control of palm rhinoceros beetles. *Annu.Rev. Entomol.*, 25, 309-339. doi: 10.1146/annurev.en.25.010180.001521.
- Beirnaert, A., & Vanderweyen, R. (1941). *Contribution a l'étude génétique et biométrique des variétés d' Elaeis guineensis Jacquin*. Institut National pour l' Etude Agronomique de Congo Belge, Yangambi.
- Bell, M. A., Fischer, R. A., Byerlee, D., Sayre, K. (1995). Genetic and agronomic contributions to yield gains: a case study for wheat. *Field Crops Res.*, 44(2-3), 55-65. doi: 10.1016/0378-4290(95)00049-6.
- Benítez-Sastoque, E. R. (2011). *Epidemiología de la Pudrición del cogollo de la palma de aceite*. Ph.D. Thesis. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Benítez, E., García, C., 2014. The history of research on oil palm bud rot (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Colombia. *Agronomía Colombiana*, 32(3), 390-398.

- Bille-Ngalle, H., Bell, J. M., Ngando-Ebongue, G. F., Nyobe, L., Ngangnou, F. C., & Ntsomboh, G. N. (2013). Morphogenesis of oil palm fruit (*Elaeis guineensis* Jacq.) in mesocarp and endocarp development. *J. Life Sci.*, 7(2), 153-158.
- Braconnier, S., & d'Auzac, J. (1985). Anatomical study and cytological demonstration of potassium and chlorine flux associated with oil palm and coconut stomatal opening. *Oléagineux*, 40, 547-551.
- Bredas, J., & Scuvie, L. (1960). Aperçu des influences climatiques sur les cycles de production du palmier à huile. *Oléagineux*, 15(4), 211-222.
- Breure, C. J. (1977). Preliminary results from an oil palm density × fertilizer experiment on young volcanic soils in West New Britain. In: Earp, D. A., & Newall, W. (Eds.). *International Developments in Oil Palm*. Proceedings of the Malaysian International Agricultural Oil Palm Conference, 14-17. June 1976. The Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Breure, C. J. (1982). Factors affecting yield and growth of oil palm tenera in West New Britain. *Oléagineux*, 37(5), 213-223.
- Breure, C. J. (1985). Relevant factors associated with crown expansion in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Euphytica*, 34(1), 161-175. doi: 10.1007/BF00022876.
- Breure, C. J. (1987). *Factors associated with the allocation of carbohydrates to bunch dry matter production in oil palm (Elaeis guineensis Jacq.)*. Ph.D. Thesis. Wageningen University, Wageningen.
- Breure, C. J. (1988). The effect of planting densities on yield trends in oil palm. *Exp. Agric.* 24(1), 37-52. doi: 10.1017/s0014479700015684.
- Breure, C. J. (1994). Development of leaves in oil palm (*Elaeis guineensis*) and determination of leaf opening rate. *Exp. Agric.*, 30(4), 467-472. doi: 10.1017/5001447900024728.
- Breure, C. J. (2003). The search for yield in oil palm: basic principles. In: Fairhurst, T., & Härdter, R. (Eds.). *The Oil Palm Management for Large and Sustainable Yields*. Potash & Phosphate Institute of Canada, Potash & Phosphate Institute, International Potash Institute, Singapore.
- Breure, C. J. (2010). Rate of leaf expansion: a criterion for identifying oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) types suitable for planting at high densities. *NJAS Wagening. J. Life Sci.*, 57(2), 141-147. doi: 10.1016/j.njas.2010.03.001.
- Breure, C. J., & Corley, R. H. V. (1992). Fruiting activity, growth and yield of oil palm 2. Observations in untreated populations. *Exp. Agric.*, 28(1), 111-121. doi: 10.1017/s001447970002305x.
- Breure, C. J., & Menendez, T. (1990). The determination of bunch yield components in the development of inflorescences in oil palm (*Elaeis guineensis*). *Exp. Agric.*, 26(1), 99-115. doi: 10.1017/s0014479700015441.
- Breure, C. J., Menendez, T., & Powell, M. S. (1990). The effect of planting density on the yield components of oil palm (*Elaeis guineensis*). *Exp. Agric.* 26(1), 117-124.

- Broekmans, A. F. M. (1957). Growth, flowering and yield of the oil palm in Nigeria. *J. West Afr. Inst. Oil Palm Res.*, 2, 187-220.
- Broeshart, H., Ferwerda, J. D., & Kovachich, W. G. (1957). Mineral deficiency symptoms of the oil palm. *Plant Soil*, 8(4), 289-300. doi: 10.1007/Bf01666319.
- Cahyasiwi, L., Wood, B., Lubis, F., & Caudwell, R. (2010). The economics of *Oryctes* attack in oil palm replants. *Proceedings of the International Oil Palm Conference*, 1-3 June 2010, Yogyakarta.
- Caliman, J. P. (1992). Oil palm and water deficit, production, adapted cropping techniques. *Oléagineux*, 47(5), 205-216.
- Caliman, J. P., Southworth, A., Jatmika, A., Bangun, D., Asmono, D., Sutarta, E. S., ... & Poeloengan, Z., 1998. Effect of drought and haze on the performance of oil palm. *Proceedings of the International Oil Palm Conference*, 23-25 September 1998, International oil Palm Research Institute, Medan.
- Carlson, K. M., Curran, L. M., Ratnasari, D., Pittman, A. M., Soares, B. S., Asner, G. P., Trigg, S. N., ... & Rodrigues, H. O. (2012). Committed carbon emissions, deforestation, and community land conversion from oil palm plantation expansion in West Kalimantan, Indonesia. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 109(19), 7559-7564. doi: 10.1073/pnas.1200452109.
- Carr, M. K. V. (2011). The water relations and irrigation requirement of oil palm (*Elaeis guineensis*): a review. *Exp. Agric.*, 47(4), 629-652. doi: 10.1017/s0014479711000494.
- Carter, C., Finley, W., Fry, J., Jackson, D., & Willis, L. (2007). Palm oil markets and future supply. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 109(4), 307-314. doi : 10.1002/ejlt.200600256.
- Chang, K.C., Foster, H. L., & Abas, Z. (1988). Monthly frond production of oil palm in Malaysia. *Oléagineux*, 43(12), 439-443.
- Chapman, K. R., Escobar, R., & Griffee, P. (2003). Cold tolerant or altitude adapted oil palm hybrid development initiatives in the Asia/Pacific region. *Assump. Univ. J. Technol.*, 6(3), 134-138.
- Cheong, S. P., & Ng, S. K. (1977). Copper deficiency of oil palms on peat. In: Earp, D.A., & Newall, W. (Eds.). *Proceedings of the Malaysian International Agricultural Oil Palm Conference*, 14-17 June 1976. The Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Chuah, J. H., & Lim, K.H. (1992). Water management and irrigation of oil palm on coastal soils: Sime Darby's experience. *Planter*, 65(761), 334-344.
- Chung, G. F. (2011). Management of Ganoderma diseases in oil palm plantations. *Planter*, 87(1022), 325-339.
- Chung, G. F. (2015). Effects of pests and diseases on oil palm yield (pp. 163-210). In: Lai, O.M., Tan, C. P., & Akoh, C. C. (Eds.). *Palm Oil: Production Processing Characterization, and Uses*. Elsevier Amsterdam.

- Combres, J. C., Pallas, B., Rouan, L., Mialet-Serra, I., Caliman, J. P., Braconnier, S., Soulie, J. C., & Dingkuhn, M. (2013). Simulation of inflorescence dynamics in oil palm and estimation of environment-sensitive phenological phases: a model based analysis. *Funct. Plant Biol.*, 40(3), 263-279. doi: 10.1071/fp12133.
- Comte, I., Colin, F., Whalen, J. K., Grunberger, O., & Caliman, J. P. (2012). Agricultural practices in oil palm plantations and their impact on hydrological changes, nutrient fluxes and water quality in Indonesia: a review. *Adv. Agron.*, 116, 71-124. doi: 10.1016/b978-0-12-394277-7.00003-8.
- Cooper, R. M., Flood, J., & Rees, R. W. (2011). *Ganoderma boninense* in oil palm plantations: current thinking on epidemiology, resistance and pathology. *Planter*, 87 (1024), 515-526.
- Corley, R. H. V., Ng, M., & Donough, C. R. (1995). Effects of defoliation on sex differentiation in oil palm clones. *Exp. Agric.*, 31(2), 177-190. doi: 10.1017/S0014479700025266.
- Corley, R. H. V. (1973a). Effects of plant density on growth and yield of oil palm. *Exp. Agric.*, 9, 169-180. doi: 10.1017/S0014479700005639.
- Corley, R. H. V. (1973b). Oil palm physiology: a review. In: Wastie, R. L., & Easp, D. A. (Eds.). *Proceedings of the International Oil Palm Conference*. November 16-10 1972. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Corley, R. H. V. (1976a). Inflorescence abortion and sex differentiation (pp. 37-54). In: Corley, R. H. V., Hardon, J. J., & Wood, B. J. (Eds.). *Oil Palm Research*. Amsterdam: Elsevier.
- Corley, R. H. V. (1976b). Photosynthesis and productivity (pp. 55-76). In: Corley, R.H.V., Hardon, J. J., Wood, B.J. (Eds.), *Oil Palm Research*. Elsevier Amsterdam.
- Corley, R. H. V. (1983). Photosynthesis and age of oil palm leaves. *Photosynthetica*, 17(1), 97-100.
- Corley, R. H. V. (1996). Irrigation of oil palms—a review. *J. Plant. Crops*, 24, 45-52.
- Corley, R. H. V. (1998). What Is the Upper Limit to Oil Extraction Ratio? In: Rajanaidu, N., Henson, I. E., & Jalani, B. S. (Eds.). *Proceedings of the 1996 International Conference on Oil and Kernel Production in Oil Palm*. September 27-28 1996. Palm Oil Research Institute Malaysia, Kuala Lumpur.
- Corley, R. H. V. (2001). Ripening, harvesting and oil extraction. *Planter*, 77(906), 507-524.
- Corley, R. H. V. (2006). Potential Yield of Oil Palm. An Update. *Symposium on Yield Potential in the Oil Palm*. International Society of Oil Palm Breeders, Phuket.
- Corley, R. H. V. (2009). How much palm oil do we need? *Environ. Sci. Policy*, 12(2), 134-139. doi: 10.1016/j.envsci.2008.10.011.
- Corley, R. H. V., & Breure, C. J. (1992). Fruiting activity, growth and yield of oil palm. Effects of fruit removal. *Exp. Agric.*, 28(1), 99-109 doi: 10.1017/s0014479700023048.

- Corley, R. H. V., & Gray, B. S. (1976). Yield and yield components. In: Corley, R. H. V., Hardon, J. J., & Wood, B. J. (Eds.). *Oil Palm Research*. Amsterdam: Elsevier.
- Corley, R. H. V., & Hew, C. K. (1976). Pruning (pp. 307-313). In: Corley, R. H. V., Hardon, J. J., & Wood, B. J. (Eds.). *Oil Palm Research*. Amsterdam: Elsevier.
- Corley, R. H. V., & Hong, T. K. (1982). Irrigation of oil palms in Malaysia (pp. 343-356). In: Pushparajah, E., & Chew, P.S. (Eds.). *The Oil Palm in Agriculture in the Eighties*. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Corley, R. H. V., & Lee, C. H. (1992). The physiological basis for genetic improvement of oil palm in Malaysia. *Euphytica*, 60(3), 179-184. doi: 10.1007/bf00039396.
- Corley, R. H. V., & Mok, C. K. (1972). Effects of nitrogen, phosphorus, potassium and magnesium on growth of the oil palm. *Exp. Agric.*, 8(4), 347-353. doi: 10.1017/s0014479700005470.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2003). *The Oil Palm*. Oxford: Blackwell Science.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The Oil Palm*. New York: John Wiley & Sons.
- Corley, R. H. V., Gray, B. S., & Kee, N. S. (1971a). Productivity of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Malaysia. *Exp. Agric.*, 7(02), 129-136. doi: 10.1017/S0014479700004907.
- Corley, R. H. V., Hardon, J. J., & Tan, G. Y. (1971b). Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica*, 20(2), 307-315. doi: 10.1007/bf00056093.
- Corley, R. H. V., Hew, C. K., Tam, T. K., & Lo, K. K. (1973). Optimal spacing for oil palms. In: Wastie, R. L., & Earp, D. A. (Eds.). *Proceedings of the International Oil Palm Conference*, 16-18 November 1972. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Cros, D., Flori, A., Nodichao, L., Omore, A., & Nouy, B. (2013). Differential response to water balance and bunch load generates diversity of bunch production profiles among oil palm crosses (*Elaeis guineensis*). *Trop. Plant Biol.*, 6(1), 26-36. doi: 10.1007/512042-013-9116-2.
- De Franqueville, H. (2003). Oil palm bud rot in Latin America. *Exp. Agric.*, 39(3), 225-240. doi: 10.1017/50014479703001315.
- Devendra, C. (2009). Intensification of integrated oil palm-ruminant systems. Enhancing increased productivity and sustainability in South-East Asia. *Outlook Agric.*, 38(1), 71-81. doi: 10.5367/000000009787762734.
- Devendra, C., & Thomas, D. (2002). Crop-animal interactions in mixed farming systems in Asia. *Agric. Syst.*, 71(1-2), 27-40. doi: 10.1016/S0308-521X(01)00034-8.
- Donough, C. (2003). Harvesting study at IJM plantations QTR centre. *Presentation for the Seminar on Managing Soils of Miri-Bintulu Area*. 8-11 December 2003, Sarawak.
- Donough, C., Witt, C., & Fairhurst, T. (2009). Yield intensification in oil palm plantations through best management practice. *Better Crops Plant Food*, 93, 12-14.

- Donough, C., Witt, C., & Fairhurst, T. (2010). Yield intensification in oil palm using BMP as a management tool. In: *Proceedings of the International Oil Palm Conference*. June 1-3 2010, Yogyakarta, Indonesian Oil Palm Research Institute.
- Donough, C. R., Cock, J., Oberthür, T., Indrasuara, K., Gatot, A. R., & Dolong, T. (2013). *Estimating oil content of commercially harvested oil palm fresh fruit bunches. A step towards increasing palm oil yields*. Poster Presented at the PIPOC 2013 International Palm Oil Congress and Exhibition, 19-21 November 2013, Kuala Lumpur.
- Dubos, B., Caliman, J. P., Corrado, F., Quencez, P., Siswo, S., & Tailleux, B. (1999). Importance of magnesium nutrition in oil palm. *Plant. Recherche Dév.*, 6(5), 25-39.
- Dufrène, E., & Saugier, B. (1993). Gas exchange of oil palm in relation to light, vapor-pressure deficit, temperature and leaf age. *Oléagineux*, 48(8-9), 347-356.
- Dufrène, E., Ochs, R., & Saugier, B. (1990). Oil palm photosynthesis and productivity linked to climatic factors. *Oléagineux*, 45(8-9), 345-353.
- Durand-Gasselín, T., Asmady, H., Flori, A., Jacquemard, J., Hayun, Z., Breton, F., & De Franqueville, H. (2005). Possible sources of genetic resistance in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) to basal stem rot caused by *Ganoderma boninense*—prospects for future breeding. *Mycopathologia*, 159(1), 93–100. doi: 10.1007/511046-004-4429-1.
- Evans, L. T., & Fischer, R.A. (1999). Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Sci.*, 39(6), 1544-1551. doi: 10.2135/cropsci1999.396.3961544x.
- Evans, L. T. (1993). *Crop Evolution, Adaptation and Yield*. Cambridge: Cambridge University Press.
- FAO, 2013. *FAOSTAT Database Collections*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, URL: faostat3.fao.org/home/E, accessed on 12.12.15.
- Fairhurst, T., & Griffiths, W. (2014). *Oil Palm: Best Management Practices for Yield Intensification*. International Plant Nutrition Institute (IPNI), Singapore.
- Fairhurst, T., & McLaughlin, D. (2009). *Sustainable Oil Palm Development on Degraded Land in Kalimantan*. World Wildlife Fund.
- Fermont, A. M., Asten, P. J. A. v., Tittoneil, P., Wijk, M. T. v., & Giller, K. E. (2009). Closing the cassava yield gap: an analysis from smallholder farms in East Africa. *Field Crops Res.*, 112(1), 24-36. doi: 10.1016/j.fcr.2009.01.009.
- Fischer, G., Tubiello, F. N., Van Velthuizen, H., & Wiberg, D. A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990-2080. *Technol. Forecast. Soc. Change*, 74(7), 1083-1107. doi: 10.1016/j.techfore.2006.05.021.
- Flood, J., & Hasan, Y. (2004). Basal stem rot – taxonomy, biology, epidemiology, economic status and control in Southeast Asia and Pacific islands. *Proceedings of the International Conference on Pests and Diseases of Importance to the Oil Palm Industry*. May 18-19 2004, Kuala Lumpur.

- Flood, J., Bridge, P. D., & Holderness, M. (2000). *Ganoderma* Diseases of Perennial Crops. CABI Publishing, Wallingford. doi: 10.1079/9780851993881.0000.
- Flood, J., Hasan, Y., & Foster, H. (2002). *Ganoderma* diseases of oil palm—an interpretation from Bah Lias Research Station. *Planter*, 78(921), 689-710.
- Fontanilla, C. A., Montoya, M. M., Ruiz, E., Sánchez, A. C., Arias, N., Guerreo, J. M., Castro, W., & Penagos, Y. (2014). Estimación de costos de manejo de la Pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite. *Palmas*, 35(2), 23-37.
- Foster, H. (2003). Assessment of oil palm fertilizer (pp. 231-257). In: Fairhurst, T., & Härdter, R. (Eds.). *Oil Palm: Management for Large and Sustainable Yields*. Potash & Phosphate Institute of Canada, Potash & Phosphate Institute, International Potash Institute, Singapore.
- Foster, H. L., & Chang, K. C. (1977). The diagnosis of the nutrient status of oil palms in West Malaysia. In: Earp, D. A., & Newall, W. (Eds.). *Malaysian International Agricultural Oil Palm Conference*, 14–17 June 1976. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Foster, H. L., Prabowo, N. E. (2002). Overcoming the limitations of foliar diagnosis in oil palm. *International Oil Palm Conference and Exhibition*, 8–12 July 2002, Bali, Indonesian Oil Palm Research Institute.
- Foster, H. L., & Prabowo, N. E. (2006). Partition and transfer of nutrients in the reserve tissues and leaves of oil palm. *Workshop on Nutrient Needs in Oil Palm*. October 17-18 2006, Singapore.
- Fry, J. (2009). The Challenges Facing Palm Oil in the 21st Century. *Presentation to the SCI. LMC International*, Oxford.
- Fuhrer, J. (2003). Agro-ecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 97(1-3), 1-20. doi: 10.1016/s0167-8809(03)00125-7.
- Gálvez-Intriago, D. A. (2014). *Análisis de mercado para la exportación de aceite de palma a Venezuela*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Gan, L. T. (1998). Critical operational challenges for maximising oil extractions in oil palm. *Planter*, 74(870), 487-499.
- Gaveau, D. L. A., Sloan, S., Molidena, E., Yaen, H., Sheil, D., Abram, N. K., ... & Meijaard, E. (2014). Four decades of forest persistence, clearance and logging on Borneo. *PLoS One*, 9(7), e101654. doi: 10.1371/journal.pone.0101654.
- Gerritsma, W. (1988). *Light Interception, Leaf Photosynthesis and Sink-Source Relations in Oil Palm*. Ph.D. Thesis. Wageningen: Wageningen University.
- Gerritsma, W., & Soebagyo, F.X. (1999). An analysis of the growth of leaf area of oil palms in Indonesia. *Exp. Agric.*, 35(3), 293-308. doi: 10.1017/S0014479799003038.
- Gillbanks, R. A. (2003). Standard agronomic procedures and practices (pp. 115-150). In: Fairhurst, T., & Härdter, R. (Eds.). *The Oil Palm. Management for Large and Sustainable Yields*. Potash & Phosphate Institute of Canada, Potash & Phosphate Institute, International Potash Institute, Singapore.

- Giller, K. E. (2001). *Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems*. Wallingford: CABI Publishing.
- Giller, K. E., & Fairhurst, T. H. (2003). Legume cover plants (pp. 151-162). In: Fairhurst, T., & Härdter, R. (Eds.). *The Oil Palm. Management for Large and Sustainable Yields*. Potash & Phosphate Institute of Canada, Potash & Phosphate Institute, International Potash Institute, Singapore
- Goh, K. J. (2000). Climatic requirements of the oil palm for high yields (pp. 1-17). In: Goh, K. (Ed.). *Managing Oil Palm for High Yields: Agronomic Principles*. Malaysian Society of Soil Science and Param Agricultural Surveys, Kuala Lumpur.
- Goh, K. J., Chew, P. S., & Teo, C. B. (1994). Maximising and maintaining oil palm yields on commercial scale in Malaysia. In: Chee, K. H. (Ed.). *Proceedings of the 1994 International Planters Conference on Management for Enhanced Profitability in Plantations*. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Goh, K. J., Härdter, R., & Fairhurst, T. (2003). Fertilizing for maximum return (pp. 279-306). In: Fairhurst, T., & Härdter, R. (Eds.). *The Oil Palm. Management for Large and Sustainable Yields*. Potash & Phosphate Institute of Canada, Potash & Phosphate Institute, International Potash Institute, Singapore.
- Goh, K. J., Kee, K. K., Chew, P. S., Gan, H. H., Heng, Y. C., & Ng, H. C. P. (2000). Concept of site yield potential and its applications in oil palm plantations. *OFIC 2000*. September 4, Kuala Lumpur.
- Government of Malaysia (2011). *Economic Transformation Programme: Accelerating Replanting of Oil Palm. Performance Management & Delivery Unit (PEMANDU)*. Kuala Lumpur.
- Griffiths, W., & Fairhurst, T. (2003). Implementation of best management practices in an oil palm rehabilitation project. *Better Crops Int.* 17, 16-19.
- Griffiths, W., Fairhurst, T., Rankine, I., Kerstan, A., & Taylor, C. (2002). Identification and elimination of yield gaps in oil palm. Use of OMP7 and GIS. *Proceedings of the 2002 International Oil Palm Conference and Exhibition*. July 8-12 2002, Bali.
- Gurmit, S. (1988). Zinc nutrition of oil palms on peat soils. In: *Proceedings of the International Oil Palm/Palm Oil Conferences: Progress and Prospects*. Agriculture. June 23-26 1987, Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur, pp. 321-328.
- Gurmit, S., Tan, Y. P., Rajah-Padman, C. V., & Lee, F. W. (1986). Experiences on the cultivation and management of oil palms on deep peat in United Plantations Berhad. *Second International Soil Management Workshop: Classification Characterization and Utilization of Peat Land*. April 17-18 1986, Thailand & Malaysia.
- Härdter, R. (1999). A review of magnesium nutrition in oil palm. In: *Branch Seminar on Reforming the Mindset of Plantation Management into the Next Millennium*. July 29 1999, Taipeng, Perak, Malaysia.
- Hardon, J. J., Williams, C. N., & Watson, I. (1969). Leaf area and yield in the oil palm in Malaya. *Exp. Agric.*, 5(1), 25-32. doi: 10.1017/S0014479700009935.

- Hartley, C.W. S. (1988). *The Oil Palm (Elaeis Guineensis Jacq.)*. London: Longman Group Limited.
- Harun, M. H., & Noor, M. R. M. D. (2002). Fruit set and oil palm bunch components. *J. Oil Palm Res.*, 14(2), 24-33.
- Heel, W. A. v., Breure, C. J., & Menendez, T. (1987). The early development of inflorescences and flowers of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seen through the scanning electron microscope. *Blumea*, 32, 67-78.
- Heffer, P. (2013). *Assessment of Fertilizer Use by Crop at the Global Level 2010-2010/11*. International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris.
- Henry, P. (1958). Croissance et développement chez *Elaeis guineensis* Jacq. de la germination a la première floraison. *Revue Générale de Botanique*, 66, 5-34.
- Henry, P. (1960). Recherches cytologiques sur l'appareil floral et la graine chez *Elaeis guineensis* et *Cocos nucifera*. La formation de l'appareil floral. *Revue Générale de Botanique*, 68, 111-133.
- Henson, I. E. (1991a). Adaptation to light environment by leaves of oil palm (*Elaeis guineensis*). *PORIM Bull.*, 22, 1-8.
- Henson, I. E. (1991b). Age-related changes in stomatal and photosynthetic characteristics of leaves of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Elaeis*, 3(2), 336-348.
- Henson, I. E. (1992). Estimating potential productivity of oil palm. In: Rao, V., Henson, I. E., & Rajanaidu, N. (Eds.). *Proceedings of the 1990 ISOPB International Workshop on Yield Potential in the Oil Palm in Phuket*. October 29-30, Thailand.
- Henson, I. E. (2000). Modelling the effects of 'haze' on oil palm productivity and yield. *J. Oil Palm Res.*, 12(1), 123-134.
- Henson, I. E. (2001). Marco analítico para identificar los factores que determinan las tasas de extracción de aceite. *Palmas*, 22(3), 29-38.
- Henson, I. E. (2002). Oil palm pruning and relationships between leaf area and yield – A review of previous experiments. *Planter*, 78, 351-362.
- Henson, I.E. (2004). Estimating maintenance respiration of oil palm. *Oil Palm Bull.*, 48, 1-10.
- Henson, I. E. (2005). Modelling seasonal variation in oil palm bunch production using a spreadsheet programme. *J. Oil Palm Res.*, 17(1), 27-40.
- Henson, I. E. (2006). Modelling the impact of climatic and climate-related factors on oil palm growth and productivity. *MPOB Technol.*, 28, 1-43.
- Henson, I. E. (2007). Modelling oil palm yield based on source and sink. *Oil Palm Bull.*, 54, 27-51.
- Henson, I. E., & Chang, K. C. (1990). Evidence for water as a factor limiting performance on field palms in West Malaysia. *Proceedings of the PORIM International Palm Oil Development Conference*. 5–9 September 1989, Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur.

- Henson, I. E., & Chai, S.H., 1997. Analysis of oil palm productivity. Biomass distribution, productivity and turnover of the root system. *Elaeis*, 9(2), 78-92.
- Henson, I. E., & Dolmat, M. T. (2004). Seasonal variation in yield and developmental processes in an oil palm density trial on a peat soil: 2. Bunch weight components. *J. Oil Palm Res.*, 16(2), 106-120.
- Henson, I. E., & Harun, M. H. (2005). The influence of climatic conditions on gas and energy exchanges above a young oil palm stand in North Kedah, Malaysia. *J. Oil Palm Res.*, 17, 73-91.
- Henson, I. E., Harun, M. H., & Chang, K. C. (2008). Some observations on the effects of high water tables and flooding on oil palm, and a preliminary model of oil palm water balance and use in the presence of a high water table. *Oil Palm Bull.*, 56, 14-22.
- Ho, C. L., & Tan, Y. C. (2015). Molecular defense response of oil palm to *Ganoderma* infection. *Phytochemistry*, 114, 168-177. doi: 10.1016/j.phytochem.2014.10.016.
- Hoffmann, M. P., Castaneda-Vera, A., Wijk, M. T. v., Giller, K. E., Oberthür, T., Donough, C., & Whitbread, A. M. (2014). Simulating potential growth and yield of oil palm (*Elaeis guineensis*) with PALMSIM: model description, evaluation and application. *Agric. Syst.*, 131, 1-10. doi: 10.1016/j.agry.2014.07.006.
- Hoffmann, M. P., Donough, C., Oberthür, T., Castaneda-Vera, A., Wijk, M. T., Lim, C. H., ... & Whitbread, A. M. (2015). Benchmarking yield for sustainable intensification of oil palm production in Indonesia using PALMSIM. *Planter*, 91(1067), 81-96.
- Hoong, H. W., & Donough, C. R. (1998). Recent trends in oil extraction rate (OER) and kernel extraction rate (KER) in Sabah. *Planter*, 74(865), 181-202.
- Hoong, H., 2007. *Ganoderma* disease of oil palm in Sabah. *Planter*, 83(974), 299-313.
- Hushiarian, R., Yusof, N. A., & Dutse, S. W. (2013). Detection and control of *Ganoderma boninense*: strategies and perspectives. *Springer Plus*, 2(555), 12 p. doi: 10.1186/2193-1801-2-555.
- Ibrahim, M. H., Jaafar, H. Z. E., Harun, M. H., & Yusop, M. R. (2010). Changes in growth and photosynthetic patterns of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings exposed to short-term CO₂ enrichment in a closed top chamber. *Acta Physiol. Plant.*, 32(2), 305-313. doi: 10.1007/s11738-009-0408-y.
- Idris, A. S., Ismail, S., & Ariffin, D. (2004). Innovative technique of sanitation for controlling *Ganoderma* at replanting. *MPOB Information Series*, 213, 4 p.
- Jacquemard, J. C., & Baudouin, L. (1998). *Oil Palm*. London: MacMillan.
- Jalani, B. S., Basiron, Y., Arrifin, D., Chan, K. W., & Rajanaidu, D. (2002). Prospects of elevating national oil palm productivity: a Malaysian perspective. *Oil Palm Ind. Econ. J.*, 2(2), 1-9.
- Jelsma, I., Giller, K., & Fairhurst, T. (2009). *Smallholder Oil Palm Production Systems in Indonesia: Lessons from the NESP Ophir Project*. Wageningen: Wageningen University and Research Centre.

- 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. *J. Theor. Biol.*, 187(2), 241-260. doi: 10.1006/jtbi.1997.0433.
- Jourdan, C., & Rey, H. (1997). Architecture and development of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant Soil*, 189 (1), 33-48. doi: 10.1023/A:1004290024473.
- Kee, K. K., & Soh, A.C. (2002). Management of oil palms on slope lands in Malaysia. *Proceedings of the International Oil Palm Conference*. July 2002, Bali, Indonesian Oil Palm Research Institute.
- Khalid, M. R., & Shuib, A. R. (2014). Field evaluation of harvesting machines for tall oil palms. *J. Oil Palm Res.*, 26(1), 125-132.
- Khalid, H., Zin, Z. Z., & Anderson, J. M. (2000). Soil nutrient dynamics and palm growth performance in relation to residue management practices following replanting of oil palm plantations. *J. Oil Palm Res.*, 12(1), 25-45.
- Khasanah, N. M., van Noordwijk, M., Ningsih, H., & Rahayu, S. (2015). Carbon neutral? No change in mineral soil carbon stock under oil palm plantations derived from forest or non-forest in Indonesia. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 211, 195-206. doi: 10.1016/j.agee.2015.06.009.
- Khaw, C. H., & Ng, S. K. (1998). Performance of commercial scale clonal oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantings in Malaysia. *Acta Hort.*, 461, 251-258. doi: 10.17660/ActaHortic.1998.461.27.
- Kim, H., Kim, H., Madhavan, M., & Suarez, A. (2013). *Measuring Environmental Externalities to Agriculture in Africa. Case Study: Ghana Palm Oil Sector*. Rome: The George Washington University and the FAO.
- Kimball, B. A., Mauney, J. R., Nakayama, F. S., & Idso, S. B. (1993). Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation. *Vegetatio*, 104, 65-75. doi: 10.1007/bf00048145.
- Koh, L. P., Miettinen, J., Liew, S. C., & Ghazoul, J. (2011). Remotely sensed evidence of tropical peat land conversion to oil palm. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 108(12), 5127-5132. doi: 10.1073/pnas.1018776108.
- Könönen, M., Jauhiainen, J., Laiho, R., Kusin, K., & Vasander, H. (2015). Physical and chemical properties of tropical peat under stabilised land uses. *Mires Peat*, 16, 1-13.
- Kraalingen, D. W. G. v., Breure, C. J., & Spitters, C. J. T. (1989). Simulation of oil palm growth and yield. *Agric. Forest Meteorol.*, 46(3), 227-244.
- Kraip, J., & Nake, S. (2006). *Response of oil palm (Elaeis guineensis Jacq.) to additions of nitrogen, phosphorus and potassium from planting to 7 years after planting: PNG OPRA Trial 501*. Papua New Guinea: Oil Palm Research Association.
- Kushairi, A., Tarmizi, A. H., Zamzuri, I., Ong-Abdullah, M., Samsul-Kamal, R., Ooi, S. E., & Rajanaidu, N. (2010). Production, performance and advances in oil palm tissue culture. *International Seminar on Advances in Oil Palm Tissue Culture*. May 29 2010, Yogyakarta.

- Laborte, A. G., Bie, K. d., Smaling, E. M. A., Moya, P. F., Boling, A. A., & Van Ittersum, M. K. (2012). Rice yields and yield gaps in Southeast Asia: past trends and future outlook. *Eur. J. Agron*, 36(1), 9-20. doi: 10.1016/j.eja.2011.08.005.
- Lamade, E., Bonnot, F., Pamin, K., & Setyo, I. E. (1998). Quantitative approach of oil palm phenology in different environments for LaMe Deli and Yangambi Deli materials investigations in the inflorescence cycles process. *Proceedings of the International Oil Palm Conference*. September 23-25 1998. Indonesian Oil Palm Research Institute, Medan.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., ... & Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environ. Change*, 11(4), 261-269. doi: 10.1016/S0959-3780(01)00007-3.
- Laurance, W. F. (2007). Forest destruction in tropical Asia. *Curr. Sci.*, 93(11), 1544-1550.
- Lee, W. K., & Ong, B. K. (2006). The unseen flood: waterlogging in large oil palm plantations. *JURUTERA*, January, 28-31.
- Lee, J. S. H., Ghazoul, J., Obidzinski, K., & Koh, L. P. (2013). Oil palm smallholder yields and incomes constrained by harvesting practices and type of smallholder management in Indonesia. *Agron. Sustain. Dev.*, 34(2), 501-513. doi: 10.1007/s13593-013-0159-4.
- Legros, S., Mialet-Serra, I., Caliman, J. P., Siregar, F. A., Clement-Vidal, A., & Dingkuhn, M. (2009a). Phenology and growth adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to photo period and climate variability. *Ann. Bot.*, 104(6), 1171-1182. doi: 10.1093/aob/mcp214.
- Legros, S., Mialet-Serra, I., Caliman, J. P., Siregar, F. A., Clement-Vidal, A., Fabre, D., & Dingkuhn, M. (2009b). Phenology, growth and physiological adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to sink limitation induced by fruit pruning. *Ann. Bot.*, 104 (6), 1183-1194. doi: 10.1093/aob/mcp216.
- Lim, K. C., & Chan, K.W. (1998). Bunch component studies over the past two decades. In: Rajanaidu, N., Henson, I. E., & Jalani, B. S. (Eds.). *Proceedings of the 1996 International Conference on Oil and Kernel Production in Oil Palm*. September 27-28 1996. Palm Oil Research Institute Malaysia, Kuala Lumpur.
- Lim, K. H., Lim, S. S., Parish, F., & Suharto, R. (2012). *RSPO Manual on Best Management Practices (BMPs) for Existing Oil Palm Cultivation on Peat*. Kuala Lumpur: RSPO.
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 34, 179-204. doi: 10.1146/annurev.enviro.041008.093740.
- Lopez, G. (2010). Bud rot, sudden wilt, red ring and lethal wilt of oil palm in the Americas. *Palmas*, 31(1), 43-53.
- Ludwig, F., Biemans, H., Jacobs, C., Supit, I., Diepen, K.V., & Fawell, J. (2011). *Water Use of Oil Crops: Current Water Use and Future Outlooks*. Brussels: International Life Sciences Institute (ILSI) Europe.

- Malay Mail Online (2015). Recent Malaysian Flood to Dent Palm Oil Supply in Q1. Kuala Lumpur. Disponible en: <http://www.themalaymailonline.com/money/article/recent-malaysian-flood-to-dent-palm-oil-supply-in-q1>. Accessed on 27.07.15.
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M., & Valverde, M. C. (2009). Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *Int. J. Climatol.*, 29(15), 2241-2255. doi: 10.1002/joc.1863.
- Mariau, D. (1976). Insect pests in West Africa (pp. 369-383). In: Corley, R. H. V., Hardon, J.J., & Wood, B.J. (Eds.). Amsterdam: Oil Palm Research, Elsevier.
- Mariau, D., & Lecoustre, R. (2000). Rôle de facteurs eco-climatiques et edaphiques sur la fécondité au champ de *Coelaenomenodera lameensis*, mineur des feuilles dupalmier à huile en Afrique de l'Ouest. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 20(1), 7-21. doi: 10.1017/S1742758400017781.
- Martínez, G., Sarria, G. A., Torres, G. A., & Varón, F. (2010). *Phytophthora palmivora* es el agente causal de la Pudrición del cogollo de la palma de aceite. *Palmas*, 31(Especial, Tomo I), 334-344.
- Melling, L., & Henson, I. E. (2011). Greenhouse gas exchange of tropical peatlands – a review. *J. Oil Palm Res.*, 23, 1087-1095.
- Miettinen, J., Shi, C. H., Liew, S. C. (2011). Deforestation rates in insular Southeast Asia between 2000 and 2010. *Global Change Biol.*, 17(7), 2261-2270. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02398.x.
- Miettinen, J., Hooijer, A., Shi, C., Tollenaar, D., Vernimmen, R., Liew, S. C., Malins, C., Page, S. E. (2012). Extent of industrial plantations on Southeast Asian peatlands in 2010 with analysis of historical expansion and future projections. *GCB Bioenergy*, 4(6), 908-918. doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01172.x.
- Mite, F., Carrillo, M., & Espinosa, J. (1999a). Fertilizer use efficiency in oil palm is increased under irrigation in Ecuador. *Better Crops Int.*, 13(1), 30-32.
- Mite, F., Carrillo, M., & Espinosa, J. (1999b). Influencia de la fertilización y el riego sobre el desarrollo, nutrición y rendimiento de la palma africana en Ecuador. *Informaciones Agronómicas*, 36, 1-5.
- Molenaar, J. W., Persch-Ort, M., Lord, S., Taylor, C., & Harms, J. (2013). *Oil Palm Smallholders. Developing a Better Understanding of Their Performance and Potential*. Jakarta: International Finance Corporation.
- Monteith, J. L. (1972). Solar-radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, 9(3), 747-766. doi: 10.2307/2401901.
- Monteith, J. L. (1977). Climate and efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B. Biol. Sci.*, 281(980), 277-294. doi: 10.1098/rstb.1977.0140.
- Murdiyarso, D., Hergoualc'h, K., & Verchot, L.V. (2010). Opportunities for reducing greenhouse gas emissions in tropical peatlands. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 107(46), 19655-19660. doi: 10.1073/pnas.0911966107.

- Murphy, D. J. (2009). Oil palm: future prospects for yield and quality improvements. *Lipid Technol.*, 21(11/12), 257-260. doi: 10.1002/lite.200900067.
- Murphy, D. J. (2014). The future of oil palm as a major global crop: opportunities and challenges. *J. Oil Palm Res.*, 26(1), 1-24.
- Murtalaksono, K., Darmosarkoro, W., Sutarta, E. S., Siregar, H. H., Hidayat, Y., Yusuf, M.A. (2011). Feasibility of soil and water conservation techniques on oil palm plantation. *AGRIVITA*, 33(1), 63-69.
- Mutert, E., Fairhurst, T. H., von Uexküll, H. R. (1999). Agronomic management of oil palms on deep peat. *Better Crops Int.*, 13(1), 22-27.
- Neumann, K., Verburg, P. H., Stehfest, E., & Müller, C. (2010). The yield gap of global grain production: a spatial analysis. *Agric. Syst.*, 103(5), 316-326. doi: 10.1016/j.agry.2010.02.004.
- Ng, S. K. (1977). Review of oil palm nutrition and manuring—scope for greater economy in fertilizer usage. In: Earp, D. A., & Newall, W. (Eds.). *Proceedings of the Malaysian International Agricultural Oil Palm Conference*. June 14-17 1976. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Ng, S.K. (1983). Advances in oil palm nutrition: agronomy and productivity in Malaysia. *PORIM Occas, Paper 12*, 1-20.
- Ng, S. K. (1986). Phosphorus nutrition and fertilization of oil palms. *Oléagineux*, 41,307-313.
- Ng, S.K. (2002). Nutrition and nutrient management of oil palm—New thrust for the future perspective. In: Pasricha, N. S., & Bansal, S. K. (Eds.). *International Symposium on the Role of Potassium*. Potash Research Institute of India and International Potash Institute, New Delhi.
- Ng, H. C. P., Chew, P. S., Goh, K. J., & Kee, K. K. (1999). Nutrient requirements and sustainability in mature oil palms – an assessment. *Planter*, 75(880), 331-345.
- Ng, S.K., Cheong, T. K., Haw, K. C., Ooi, H. S.H., Yee, L. K., Kayaroganam, P., Uexküll, H. R. v., & Härdter, R. (2003). Clonal oil palm production, yield performance, and nutritional requirements (pp. 99-114). In: Fairhurst, T., & Härdter, R. (Eds.). *The Oil Palm—Management for Large and Sustainable Yields*. Potash & Phosphate Institute of Canada, Potash & Phosphate Institute, International Potash Institute, Singapore.
- Nkongho, R. N., Feintrenie, L., & Levang, P. (2014). Strengths and weaknesses of the smallholder oil palm sector in Cameroon. *Oilseeds and fats, Crops and Lipids*, 21(2), D208.
- Nouy, B., Baudouin, L., Djegui, N., & Omore, A. (1999). Le palmier à huile en conditions hydriques limitantes. *Plant. Recherche Dév.*, 6, 31-45.
- Ochs, R., & Daniel, C. (1976). Research on techniques adapted to dry regions (pp. 315–330). In: Corley, R. H. V., Hardon, J. J., & Wood, B.J. (Eds.). *Oil Palm Research*. Amsterdam: Elsevier.
- Ochs, R., & Ollagnier, M. (1977). Effect of fertilizers on composition of lipids produced by perennial tropical oil plants and on their yield. *Oléagineux*, 32(10), 409-426.

- Ojuederie, B. M., Iremiren, G. O., & Utulu, S. N. (1983). Effects of various inter-row slashing regimes and size of weeded rings on the early growth, flowering and bunch yield of the oil palm. *J. Nig. Inst. Oil Palm Res.*, 6(24), 322-334.
- Okwuagwu, C. O., Okoye, M. N., Okolo, E. C., Ataga, C. D., & Uguru, M. I. (2008). Genetic variability of fresh fruit bunch yield in Deli/dura × tenera breeding populations of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Nigeria. *J. Trop. Agric.*, 46(1-2), 52-57.
- Olivin, J. (1968). Étude pour la localisation d'un bloc industriel de palmiers à huile. *Oléagineux*, 23(8-9), 499-504.
- Olivin, J. (1986). Study for the siting of a commercial oil palm plantation. *Oléagineux*, 41(3), 113-118.
- Ong-Abdullah, M., Ordway, J. M., Jiang, N., Ooi, S. E., Kok, S.Y., Sarpan, N., ... & Martienssen, R. A. (2015). Loss of Karma transposon methylation underlies the mantled somaclonal variant of oil palm. *Nature*, 525(7570), 533-537. doi: 10.1038/nature15365.
- Oo, K. C., Lee, K. B., & Ong, A. S. H. (1986). Changes in fatty acid composition of the lipid classes in developing oil palm mesocarp. *Phytochemistry*, 25(2), 405-407.
- Osman, J., & Kueh, H. S. (1996). Evaluation of micronutrients omission on the performance of oil palm grown on deep peat. *Proceedings of the Soil Science Conference of Malaysia 1996*. April 15–17 April 1996, Kuching, Sarawak.
- Othman, H., Mohammed, A. T., Darus, F. M., Harun, M. H., Zambri, M. P. (2011). Best management practices for oil palm cultivation on peat: ground water-table maintenance in relation to peat subsidence and estimation of CO₂ emissions at Sessang, Sarawak. *J. Oil Palm Res.*, 23, 1078-1086.
- PORLA (1995). *Fresh Fruit Bunch Grading Manual*. Kuala Lumpur: Palm Oil Registration and Licensing Authority.
- Paeth, H., Born, K., Girmes, R., Podzun, R., & Jacob, D. (2009). Regional climate change in tropical and northern Africa due to greenhouse forcing and land use changes. *J. Clim.*, 22(1), 114-132. doi: 10.1175/2008jcli2390.1.
- Palat, T., Nakharin, C., Clendon, J. H., & Corley, R. H. V. (2008). A review of 15 years of oil palm irrigation research in southern Thailand. *Indian National Conference on Oil Palm*. Andhra Pradesh, India.
- Palat, T., Chayawat, N., & Corley, R. H. V. (2012). Maximising oil palm yield by high density planting and thinning. *Planter*, 88, 241-256.
- Pallas, B., Mialet-Serra, I., Rouan, L., Clement-Vidal, A., Caliman, J. P., & Dingkuhn, M. (2013). Effect of source/sink ratios on yield components, growth dynamics and structural characteristics of oil palm (*Elaeis guineensis*) bunches. *Tree Physiol.*, 33(4), 409-424. doi: 10.1093/treephys/tpt015.

- Paramananthan, S. (2000). Soil requirements of oil palm for high yields (pp.18-38). In: Goh, K. J. (Ed.). *Managing Oil Palm for High Yields: Agronomic Principles*. Kuala Lumpur: Malaysian Society of Soil Science and Param Agricultural Surveys.
- Paramananthan, S. (2003). Land selection for oil palm (pp. 27-58). In: Fairhurst, T., & Härdter, R. (Eds.). *The Oil Palm—Management for Large and Sustainable Yields*. Singapore: Potash & Phosphate Institute of Canada, Potash & Phosphate Institute, International Potash Institute.
- Paramananthan, S. (2013). Managing marginal soils for sustainable growth of oil palms in the tropics. *J. Oil Palm Environ.*, 4, 1-16.
- Paramananthan, S., Chew, P., Goh, K. (2000). Towards a practical framework for land evaluation for oil palm in the 21st Century. *Proceedings of the International Planters Conference "Plantation Tree Crops in the New Millennium: the Way Ahead"*. May 17-20, Kuala Lumpur.
- Paterson, R. R. M. (2007). *Ganoderma* disease of oil palm—a white rot perspective necessary for integrated control. *Crop Prot.*, 26(9), 1369-1376. doi : 10.1016/j.cropro.2006.11.009.
- Paul, M. J. & Foyer, C. H. (2001). Sink regulation of photosynthesis. *J. Exp. Bot.*, 52(360), 1383-1400. doi: 10.1093/jexbot/52.360.1383.
- Prabowo, N. E., Tohiruddin, L., Tandiono, J., & Foster, H. L. (2011). Prediction of Expected Yields of Oil Palm from the Weights of Leaf Nutrients. *Proc. Int. Palm Oil Conference Agriculture, biotechnology and sustainability*. Vol. II. Malaysian Palm Oil Board, Kuala Lumpur.
- Prasad, M. V., Sarkar, A., & Jameema, J. (2010). Performance of oil palm production technologies. *Indian J. Ext. Educ.*, 10(3), 10-15.
- Prasetyo, J. H. H., Sitepu, B., Djuhjana, J., & Nelson, S. P. C. (2014). Ekona × Deli dura materials: promising high oil-to-bunch dura materials. *Oil Palm Bull.*, 68, 1-4.
- Puan, C. L., Goldizen, A. W., Zakaria, M., Hafidzi, M. N., & Baxter, G. S. (2011). Relationships among rat numbers, abundance of oil palm fruit and damage levels to fruit in an oil palm plantation. *Integr. Zool.*, 6(2), 130-139. doi: 10.1111/j.1749-4877.2010.00231.x.
- Pulver, E., & Guerrero, J. M. (2014). Improving the Competitiveness of Small Scale Oil Palm Farmers and Production in Latin America and the Caribbean: Bridging the Yield Gap. Cali: Fondo Latinoamericano de Innovación en Palma de Aceite (FLIPA).
- Purvis, C. (1956). The root system of the oil palm: its distribution, morphology, and anatomy. *J. West Afr. Inst. Oil Palm Res.*, 4, 60-82.
- RSPO (2015). *Smallholders*. Kuala Lumpur: RSPO. Disponible en: www.rspo.org/smallholders (accedido en 24.07.15).
- Rafflegeau, S., Michel-Dounias, I., Tailliez, B., Ndigui, B., & Papy, F. (2010). Unexpected N and K nutrition diagnosis in oil palm smallholdings using references of high-yielding industrial plantations. *Agron. Sustain. Dev.*, 30(4), 777-787. doi: 10.1051/agro/2010019.

- Rafii, M. Y., Isac, Z. A., Kushairi, A., Saleh, G. B., & Latif, M. A. (2013). Variation in yield components and vegetative traits in Malaysian oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) dura × pisifera hybrids under various planting densities. *Ind. Crops Prod.*, 46,147-157. doi: 10.1016/j.indcrop.2012.12.054.
- Rajanaidu, N., & Kushairi, A. (2006). Oil palm planting materials and their yield potential. *Presentation for the International Seminar on Yield Potential in Oil Palm*. November 27-28, Phuket, Thailand.
- Rajanaidu, N., Kushairi, A., Din, A., Isa, Z. A., Maizura, I., & Noh, A. (2005). Oil palm planting materials: current developments and competitiveness with other oil bearing crops. *Proceedings of the 2005 International Palm Oil Congress: Technological Breakthroughs and Commercialization. The Way Forward*. September 25-29. Malaysian Palm Oil Board, Selangor.
- Rajaratnam, J. A. (1973). Effect of boron deficiency on the production of oil palm in Malaysia. *Oléagineux*, 28(7), 329-332.
- Rajaratnam, J. A., & Lowry, J. B. (1974). The role of boron in the oil palm (*Elaeis guineensis*). *Ann. Bot.*, 38, 193-200.
- Rankine, I. R., & Fairhurst, T. H. (1999a). *Field Handbook: Oil Palm Series*. Volume 1: Nursery. Singapore: Potash & Phosphate Institute (PPI).
- Rankine, I. R., & Fairhurst, T. H. (1999b). *Field Handbook: Oil Palm Series*. Volume 3: Mature. Singapore: Potash & Phosphate Institute (PPI).
- Rao, V., & Law, I. H. (1998). The problem of poor fruit set in parts of East Malaysia. *Planter*, 74(870), 21.
- Rao, V., Palat, T., Chayawat, N., & Corley, R. H. V. (2008). The Univanich oil palm breeding programme and progeny trial results from Thailand. *Planter*, 84(989), 519-531.
- Rees, A. R. (1964). The apical organization and phyllotaxis of the oil palm. *Ann. Bot.*, 28(1), 57-69.
- Rees, A. R., & Tinker, P. B. (1963). Dry-matter production and nutrient content of plantation oil palms in Nigeria. Growth and dry-matter production. *Plant Soil*, 19(1), 19-32. doi: 10.1007/BF01347859.
- Rhebergen, T., Hoffmann, M., Zingore, S., Oberthür, T., Acheampong, K., Dwumfour, G., ... & Fairhurst, T. (2014). The effects of climate, soil and oil palm management practices on yield in Ghana. *International Oil Palm Conference*. June 17-19, Bali.
- Roslan, A., & Idris, A. S. (2012). Economic impact of *Ganoderma* incidence on Malaysian oil palm plantation—a case study in Johor. *Oil Palm Ind. Econ. J.*, 12(1), 24-30.
- Ryan, M. G. (1991). Effects of climate change on plant respiration. *Ecol. Appl.*, 1(2), 157-167. doi: 10.2307/1941808.
- Sambanthamurthi, R., Sundram, K., & Tan, Y. A. (2000). Chemistry and biochemistry of palm oil. *Prog. Lipid Res.*, 39(6), 507-558. doi: 10.1016/S0163-7827(00)00015-1.

- Samedani, B., Juraimi, A. S., Abdullah, S. A. S., Rafii, M. Y., Rahim, A. A., & Anwar, M. P. (2014a). Effect of cover crops on weed community and oil palm yield. *Int. J. Agric. Biol.*, *16*, 23-31.
- Samedani, B., Juraimi, A. S., Rafii, M. Y., Awadz, S. A. S., Anwar, M. P., & Anuar, A. R. (2014b). Effect of cover crops on weed suppression in oil palm plantation. *Int. J. Agric. Biol.*, *17*(2), 251-260.
- Sharma, M. (2007). Challenges facing the Malaysian palm oil industry –multi-pronged strategies for raising oil yield, productivity and profitability. *Planter*, *83*(981), 797-833.
- Shaul, O. (2002). Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *Biometals*, *15*(3), 309-323. doi: 10.1023/A:1016091118585.
- Sidhu, M., Kim, M., & Sinuraya, Z. (2001). Yield responses of oil palm to NPK fertilizer application on an alluvial soil in Indonesia. *Planter*, *77*(908), 635-651. doi: 10.1093/jxb/40.6.647.
- Simon, S., Hendry, T., Chang, S. W., & Kiaw, C. W. (1998). Early yield performance of clonal oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantings in PPB Oil Palms Bhd Sabah—a case study. *Planter*, *74*(866), 257-269.
- Smith, B. G. (1989). The effects of soil water and atmospheric vapour pressure deficit on stomatal behaviour and photosynthesis in the oil palm. *J. Exp. Bot.*, *40*(215), 647-651. doi: 10.1093/jxb/40.6.647.
- Soh, A. C. (2004). Selecting the ideal oil palm: what you see is not necessarily what you get. *J. Oil Palm Res.*, *16*(2), 121-128.
- Soh, A.C. (2012). The future of oil palm clones in Malaysia. *J. Oil Palm Environ.*, *3*, 93-97.
- Soh, A. C. (2015). Breeding and genetics of the oil palm (pp. 31-58). In: Lai, O. M., Tan, C. P., Akoh, C. C. (Eds.). *Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses*. Urbana: AOCS Press.
- Soh, A. C., Wong, G., Tan, C. C., Chew, P. S., Chong, S. P., Ho, Y. W., ... & Kumar, K. (2011). Commercial-scale propagation and planting of elite oil palm clones: research and development towards realization. *J. Oil Palm Res.*, *23*(1), 935-952.
- Sparnaaij, L. D. (1960). The analysis of bunch production in the oil palm. *J. West Afr. Inst. Oil Palm Res.*, *3*, 109-180.
- Squire, G. R. (1986). A physiological analysis for oil palm trials. *PORIM Bull.*, *12*, 12-31.
- Squire, G. R., Corley, R. H. V. (1987). Oil palm (pp.141-167). In: Sethuraj, M. R., Raghavendra, A.S. (Eds.). *Tree Crop Physiology*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Stibig, H. J., Achard, F., Carboni, S., Ra'si, R., & Miettinen, J. (2014). Change in tropical forest cover of Southeast Asia from 1990 to 2010. *Biogeosciences*, *11*, 247-258. doi: 10.5194/bg-11-247-2014.
- Surre, C. (1968). Les besoins en eau du palmier à huile. *Oléagineux*, *3*, 165-167.

- Sushil, K., & Mukhtar, A. (2008). Impact of various methods of management of rhinoceros beetle, *Oryctes rhinoceros* Linn. in oil palm. *J. Appl. Zool. Res.*, 19(2), 157-162.
- Sutarta, E. S., Rahutomo, S. (2016). *New Standard for FFB Yield of IOPRI's Planting Materials Based on Land Suitability Class*. Medan: Indonesian Oil Palm Research Institute.
- Syed, R. A., Law, I. H., & Corley, R. H. V. (1982). Insect pollination of oil palm: introduction, establishment and pollinating efficiency of *Elaeidobius kamerunicus* in Malaysia. *Planter*, 58(681), 547-561.
- Tam, T. K. (1973). Culling and selection in oil palm nurseries (pp. 104-113). In: Wastie, R. L., Earp, D. A. (Eds.). *Advances in Oil Palm Cultivation. Proceedings of the International Palm Conference*. November 16-18 1972, Kuala Lumpur.
- Tans, P., & Keeling, R. (2015). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Mauna Loa, Hawaii: Earth System Research Laboratory, Boulder, USA.
- Tapia, E., & Velasco, B. (2015). *Una enfermedad merma la bonanza de la palma africana*. El Comercio, Quito. Disponible en: <http://www.elcomercio.com/actualidad/enfermedad-bonanza-palma-africana.html> (accesado en 02.12.15).
- Teoh, K. C., & Chew, P. S. (1988). Potassium in the oil palm eco-system and some implications to manuring practice. In: Hassan, A. H., Soon, C. P., Wood, B. J., & Pushparajah, E. (Eds.). *International Oil Palm/Palm Oil Conferences: Progress and Prospects—Agriculture*. June 23–26 1987. Palm Oil Research Institute of Malaysia & Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Tinker, P. B. (1984). Site-specific yield potentials in relation to fertilizer use (pp. 193-208). In: Peter, A. v. (Ed.). *Nutrient Balances and Fertilizer Needs in Temperate Agriculture*. Bern, Switzerland: International Potash Institute.
- Toh, P. Y., & Poon, Y.C. (1981). Effect of water management on field performance of oil palms on acid sulphate soils in Peninsular Malaysia. *Symposium on Acid Sulphate Soils*. Bangkok.
- Tohiruddin, L., Prabowo, N. E., & Foster, H. L. (2006). Comparison of the response of oil palm to fertilisers at different locations in North and South Sumatra. *International Oil Palm Conference*. June 19-23, Nusa Dua, Bali, Indonesian Oil Palm Research Institute.
- Tohiruddin, L., Tandiono, J., Silalahi, A. J., Prabowo, N. E., & Foster, H. L. (2010). Effects of N, P and K fertilizers on leaf trace element levels of oil palm in Sumatra. *J. Oil Palm Res.*, 22, 869-877.
- Uexküll, H. R. v., & Fairhurst, T. (1991). Fertilizing for high yield and quality—the oil palm. *IPI Bull.*, 12.
- Uexküll, H. v., Henson, I. E., & Fairhurst, T. (2003). Canopy management to optimize yield (pp. 163–180). In: Fairhurst, T., & Härdter, R. (Eds.). *Oil Palm Management for Large and Sustainable Yields*. Singapore: Potash & Phosphate Institute of Canada, Potash & Phosphate Institute, International Potash Institute.

- Univanich (2011). *Some Best Practices in Thailand's Oil Palm Industry*. Krabi, Thailand: Univanich Palm Oil PCL.
- USDA (2014). *Oilseeds: World Markets and Trade*. Washington, D.C.: USDA Foreign Agricultural Service.
- USDA-FAS (2012). *Malaysia: Stagnating Palm Oil Yields Impede Growth. Commodity Intelligence Report*. Washington, D.C.: USDA Foreign Agricultural Service.
- USDA-FAS (2015). *Production, Supply and Distribution online database, oil seeds, Table 11: Palm Oil: World Supply and Distribution*. Washington, D.C.: USDA Foreign Agricultural Service.
- USDA-FAS (2016). *Production, Supply and Distribution Online: Oilseeds*. Washington, D.C.: USDA Foreign Agricultural Service.
- van Ittersum, M. K., & Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Res.*, 52(3), 197-208. doi: 10.1016/S0378-4290(97)00037-3.
- van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Res.*, 143, 4-17. doi: 10.1016/j.fcr.2012.09.009.
- van Noordwijk, M., Lawson, G., Hairiah, K., & Wilson, J. (2015). Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity (pp. 221-257). In: Ong, C. K., Black, C. R., & Julia, W. (Eds.). *Tree-Crop Interactions: Agroforestry in a Changing Climate*. Wallingford: CAB International.
- van der Linden, A., Oosting, S. J., van de Ven, G. W. J., de Boer, I. J. M., & van Ittersum, M. K. (2015). A framework for quantitative analysis of livestock systems using theoretical concepts of production ecology. *Agric. Syst.*, 139, 100-109. doi: 10.1016/j.agry.2015.06.007.
- Virdiana, I., Hasan, Y., Aditya, R., & Flood, J. (2010). Testing the effects of oil palm replanting practices (windrowing, fallowing and poisoning) on incidence of *Ganoderma*. *Proceedings of the International Oil Palm Conference*. June 1-3, Yogyakarta, Indonesian Oil Palm Research Institute.
- Vossen, H. A. M. v. d. (1970). Nutrient status and fertilizer responses of oil palms in Ghana. *Ghana J. Agric. Sci.*, 3, 109-129.
- Wahid, M. B., & Simeh, M. A. (2010). Accelerated oil palm replanting: the way forward for a sustainable and competitive industry. *Oil Palm Ind. Econ. J.*, 10(2), 29-38.
- Wairegi, L. W. I., Asten, P. J. A. v. (2012). Norms for multivariate diagnosis of nutrient imbalance in arabica and robusta coffee in the East African Highlands. *Exp. Agric.*, 48(3), 448-460. doi: 10.1017/50014479712000142.
- Wairegi, L. W. I., Asten, P. J. A. v., Tenywa, M. M., & Bekunda, M. A. (2010). Abiotic constraints override biotic constraints in East African highland banana systems. *Field Crops Res.*, 117(1), 146-153.

- Webb, M. (2009). A conceptual framework for determining economically optimal fertiliser use in oil palm plantations with factorial fertiliser trials. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 83(2), 163-178. doi: 10.1007/s10705-008-9207-x.
- Witt, C., Fairhurst, T., & Griffiths, W. (2005). Key principles of crop and nutrient management in oil palm. *Better Crops Plant Food*, 89, 27-31.
- Woittiez, L. S., Slingerland, M., & Giller, K. E. (2015). Yield gaps in Indonesian smallholder plantations: causes and solutions. *International Palm Oil Congress and Exhibition*. October 6-8, Kuala Lumpur.
- Wood, B. (1968). *Pests of Oil Palms in Malaysia and Their Control*. Kuala Lumpur: Incorporated Society of Planters.
- Wood, B. J. (1977). The economics of crop protection in oil palms. *PANS*, 23(3), 253-267.
- Wood, B. J. (1985). Some consequences of weevil pollination of the oil palm in South East Asia. *Oil Palm Symposium*. March 27-28, Medan.
- Wood, B. J., & Chung, G. F. (2003). A critical review of the development of rat control in Malaysian agriculture since the 1960. *Crop Prot.*, 22(3), 445-461. doi: 10.1016/S0261-2194(02)00207-7.
- Wood, B.J., Corley, R.H.V., Goh, K.H., 1973. Studies on the effect of pest damage on oil palm yield. In: Wastie, R.L., & Earp, D.A. (Eds.). *Advances in Oil Palm Cultivation: Proceedings of the International Oil Palm Conference*. November 1972. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Wood, B. J., & Liau, S. S. (1984). A long-term study of *Rattus tiomanicus* populations in an oil palm plantation in Johore, Malaysia: Recovery from control and economic aspects. *J. Appl. Ecol.*, 21(2), 465-472. doi: 10.2307/2403422.
- Yahya, A., Su, V. H., El Pebrian, D., & Ishola, T. A. (2013). Performance and economic comparisons of manual and mechanised fertiliser applications for mature oil palm. *Planter*, 89(1046), 323-340.
- Yang, W., Peng, S., Laza, R. C., Visperas, R. M., & Dionisio-Sese, M. L. (2008). Yield gap analysis between dry and wet season rice crop grown under high-yielding management conditions. *Agron. J.*, 100(5), 1390-1395. doi: 10.2134/agronj2007.0356.
- Yeow, K. H., Tam, K. T., Poon, Y. C., & Toh, P. Y. (1982). Recent innovation in agronomic practice: palm replacement during immaturity (pp. 357-365). In: Pushparajah, E., & Chew, P. S. (Eds.). *The Oil Palm in Agriculture in the Eighties*. Kuala Lumpur: Incorporated Society of Planters.
- Zakaria, Z. Z., Foster, H. L., Mohammed, A. T., Dolmat, M. T., Bachik, A. T., & Bidin, A. (1990). Yield responses to phosphate fertilizer in oil palm. *Proceedings of the Workshop on Phosphate Sources for Acid Soils in the Humid Tropics of Asia*. November 6-7, Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur.

- Zeven, A. (1967). *The Semi-Wild Oil Palm and Its Industry in Africa*. Wageningen: Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdocumentatie.
- Zin, Z. Z., Hamdan, A. B., & Gurmit, S. (1993). Palm oil extraction rates in peninsular Malaysia: the effect of fertilizers. *National Seminar on Palm Oil Extraction Rate: Problems and Issues*. Kuala Lumpur.
- Zuidema, P. A., Leffelaar, P. A., Gerritsma, W., Mommer, L., & Anten, N. P. R. (2005). A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agric. Syst.*, 84(2), 195-225. doi: 10.1016/j.agsy.2004.06.015.