

Ciclos de carbono y nitrógeno en plantaciones de palma de aceite: claves para la productividad y la sostenibilidad*

Carbon and Nitrogen Cycling in Oil Palm Plantations: the Keys to Yield and Sustainability

AUTORES: Nelson, P.N.¹; Huth, M.I.²; Banabas, M.³; Webb, M.J.²; Goodrick, I.¹

CITACIÓN: Nelson, P., Huth, M. I., Banabas, M., Webb, M. J., & Goodrick, I. (2016). Ciclos de carbono y nitrógeno en plantaciones de palma de aceite: claves para la productividad y la sostenibilidad. *Palmas* 37(Especial Tomo I), pp. 214-224.

PALABRAS CLAVE: ciclos de carbono y nitrógeno, productividad, sostenibilidad, plantaciones de palma de aceite.

KEYWORDS: Carbon and nitrogen cycling, yield, sustainability, oil palm plantations.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Sofía Lemaitre Cepeda.

1 College of Science, Technology and Engineering, James Cook University, Australia

2 Agriculture Flagship, CSIRO, Australia

3 PNG Oil Palm Research Association, Papua New Guinea



PAUL NELSON

Profesor Asociado, Centro de Estudios Ambientales y de Sostenibilidad Tropical, Universidad James Cook, Australia

Associate Professor, Centre for Tropical Environmental and Sustainability Studies, James Cook University, Australia

Resumen

El alto rendimiento y la rentabilidad de las inversiones en palma de aceite dependen de la fijación de carbono producto de la fotosíntesis en las hojas, la cual está limitada por la radiación, la temperatura y la disponibilidad de agua y nutrientes, en particular el nitrógeno. Los ciclos de carbono y nitrógeno también son factores determinantes para la condición del suelo (en particular, la materia orgánica, la acidez y la actividad biológica), la salud de los ecosistemas acuáticos y las emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque la productividad y los efectos ambientales del cultivo se han estudiado extensamente, es difícil predecir cómo podrían verse afectados por los cambios en el genotipo, en las condiciones ambientales o en las prácticas de manejo, dada la complejidad de las interacciones entre

los ciclos de carbono y nitrógeno, y los factores antes mecanísticos, la integración de nuestro conocimiento a modelos mecanísticos predictivos es esencial para avanzar. Dicha integración se ha logrado recientemente para la palma de aceite utilizando el marco APSIM (www.apsim.info), el cual integra modelos de fisiología de cultivos y de ciclos de agua, carbono y nitrógeno. El modelo ha demostrado tener la capacidad de predecir el crecimiento vegetativo y el rendimiento apropiadamente, y de manera consistente en Papúa Nueva Guinea, en donde fue desarrollado. Ahora debe ser ensayado en un mayor rango de entornos. APSIM Oil Palm tiene un potencial considerable como herramienta para predecir el rendimiento y generar eficiencia al explorar escenarios cuya evaluación experimental no es plausible, tales como los efectos probables de una gestión de fertilizantes distinta, los efectos del tipo de clima y suelo en la productividad, la condición del suelo y el entorno.

Abstract

High yields and return on investment in oil palm all depend on the fixation of carbon by photosynthesis in the leaves, which is limited by radiation, temperature and the availability of water and nutrients, especially nitrogen. The carbon and nitrogen cycles are also key determinants of soil condition (particularly soil organic matter, acidity and biological activity), aquatic ecosystem health and greenhouse gas emissions. Although productivity and environmental effects of cultivation are well studied, it is difficult to predict how they might be affected by changes in genotype, environmental conditions or management practices, because of complex interactions between the carbon and nitrogen cycles and these factors. Integrating our knowledge into mechanistic predictive models is essential to move forward. Such integration has recently been achieved for oil palm using the APSIM framework (www.apsim.info), which integrates models of crop physiology and cycling of water, carbon and nitrogen. The model has been shown to predict vegetative growth and yield consistently well in Papua New Guinea, where it was developed. It now needs to be tested in a wider range of environments. APSIM Oil Palm has considerable potential as a tool for predicting yield and for efficiently exploring scenarios that are not feasible to assess experimentally, such as the likely effects of different fertilizer management, climate or soil type on productivity, soil condition and the environment.

Introducción

Los cultivadores de palma de aceite tienen muchas preguntas importantes con relación a la productividad y la sostenibilidad, que son difíciles de responder con un nivel de confianza aceptable o, incluso, conocido. Los mejoradores de palma querrán conocer los factores críticos que influyen en la conversión de la luz solar en aceite. Los gerentes de campo y los pequeños palmicultores desean saber cómo maximizar la productividad de racimos de fruta fresca (RFF) por unidad del costo de producción, del cual los fertilizantes representan una parte importante. Los gerentes de las plantas extractoras y de transporte desean conocer la cantidad de fruta que se va a producir en los meses y años venideros. Los propietarios de tierra

quieren saber cómo mantener de la mejor manera el valor de su activo, especialmente la fertilidad del suelo (en particular, el contenido de materia orgánica, la acidez y la actividad biológica del suelo), para mantener la productividad a largo plazo, especialmente si les falta tierra y no cuentan con recursos para mantener su fertilidad o mejorarla. Los gerentes de sostenibilidad de las empresas desean saber cómo las prácticas de manejo influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero y las reservas de C. Además, las comunidades locales que dependen de los ambientes acuáticos aguas abajo desean saber cómo el manejo influye en la escorrentía de nutrientes. Para responder estas y otras preguntas similares, las

únicas opciones actuales son los ensayos y los programas de monitorización, o las reglas generales con base en la experiencia, pero ambos presentan grandes desventajas.

Los métodos actuales para predecir la producción y los efectos ambientales de las prácticas de manejo de la palma de aceite presentan varios problemas. Los ensayos y los programas de monitorización son costosos y tardan mucho tiempo en dar respuestas confiables, ya que es necesario que se evalúe todo el ciclo de aproximadamente 25 años de una plantación y la variabilidad climática. Las reglas generales, aprendidas por ensayo y error, pueden ser limitadas en su utilidad, dado que con frecuencia hay poca experiencia acumulada para ciertas plantaciones (ya que gran parte de la industria solo se encuentra en su primer ciclo de cultivo) y porque con frecuencia es difícil transferir estos conocimientos de una persona a otra. Sería útil reunir todo nuestro conocimiento colectivo de manera que pueda utilizarse para responder las preguntas relacionadas con la investigación y el manejo en situaciones nuevas en las cuales se carece de conocimientos. Esta recopilación de conocimientos en herramientas predictivas es el campo de la modelación de los sistemas agrícolas. Esto requiere comprender los ciclos del agua, del carbono y del nitrógeno a través del sistema suelo-planta-atmósfera y cómo estos ciclos interactúan entre sí, los genotipos del cultivo y el medio ambiente.

El objetivo de este trabajo es examinar los ciclos del C y el N a lo largo de un ciclo de cultivo, mediante un modelo de sistemas agrícolas desarrollado recientemente, y estudiar cómo el modelo podría utilizarse como herramienta para predecir la forma en que el manejo puede influir en la productividad del cultivo, las propiedades del suelo y los impactos ambientales.

Modelación de los flujos de carbono y nitrógeno

Los conocimientos sobre el crecimiento del cultivo y los ciclos de agua, carbono y nutrientes en los sistemas de producción de palma de aceite no se habían integrado en trabajos sino hasta hace poco tiempo mediante el marco APSIM (Huth *et al.*, 2014), que combina varios modelos en un único modelo de sis-

temas agrícolas para un determinado dominio del problema (Holzworth *et al.*, 2014, www.apsim.info). El desarrollo del módulo de crecimiento de palma de aceite en ese trabajo fue desarrollado sobre modelos previos de crecimiento de la palma de aceite, como OPSIM (van Kraalingen *et al.*, 1989), OPRODSIM (Henson *et al.*, 2007), WaNuLCAS (Van Noordwijk *et al.*, 2011) y ECOPALM (Combres *et al.*, 2013). Los modelos para los procesos ambientales y del suelo ya estaban disponibles en el marco APSIM (Holzworth *et al.*, 2014). Con APSIM-Oil Palm (palma de aceite), ya es posible predecir la productividad del cultivo y los impactos ambientales de escenarios con diferentes combinaciones de clima, tipo de suelo y manejo.

APSIM-Oil Palm fue desarrollado mediante el marco de modelación de plantas APSIM (Brown *et al.*, 2014) y los datos de crecimiento de las palmas de aceite a partir de ensayos de fertilización a largo plazo en Papúa Nueva Guinea (Huth *et al.*, 2014). Los módulos estándar *SoilWat* (agua en el suelo), *SoilN* (nitrógeno en el suelo) y *SurfaceOM* (materia orgánica superficial) de APSIM aportaron la capacidad para simular los procesos del agua, el N y la materia orgánica superficial (Probert *et al.*, 1998). El manejo de las palmas, incluidos el manejo de la siembra y de fertilizantes se especifica mediante un lenguaje de *scripting* de manejo (Moore *et al.*, 2014). APSIM-Oil Palm simuló bien el crecimiento y la productividad de la palma de aceite (Figura 1), lo que nos da confianza en que los ciclos de C y N están siendo simulados con precisión aceptable. La modelación de las reservas y flujos de C y N en el ciclo de la palma de aceite se realizó para la plantación Sangara en Papúa Nueva Guinea, en donde el crecimiento modelado de la palma de aceite fue el más cercano al crecimiento real de la misma.

La fijación de carbono y la productividad de RFF fueron mayores cuando la radiación solar, la disponibilidad de agua y el suministro de N fueron mayores, como cabría esperar (Figura 1). La productividad anual fluctuó en respuesta a la precipitación anual, e impulsada principalmente por el número de racimos. Las respuestas a los fertilizantes nitrogenados se diferenciaron sustancialmente entre los sitios.

Las reservas modeladas de C y N en el suelo se relacionaron con la edad del cultivo y la dosis de fertili-

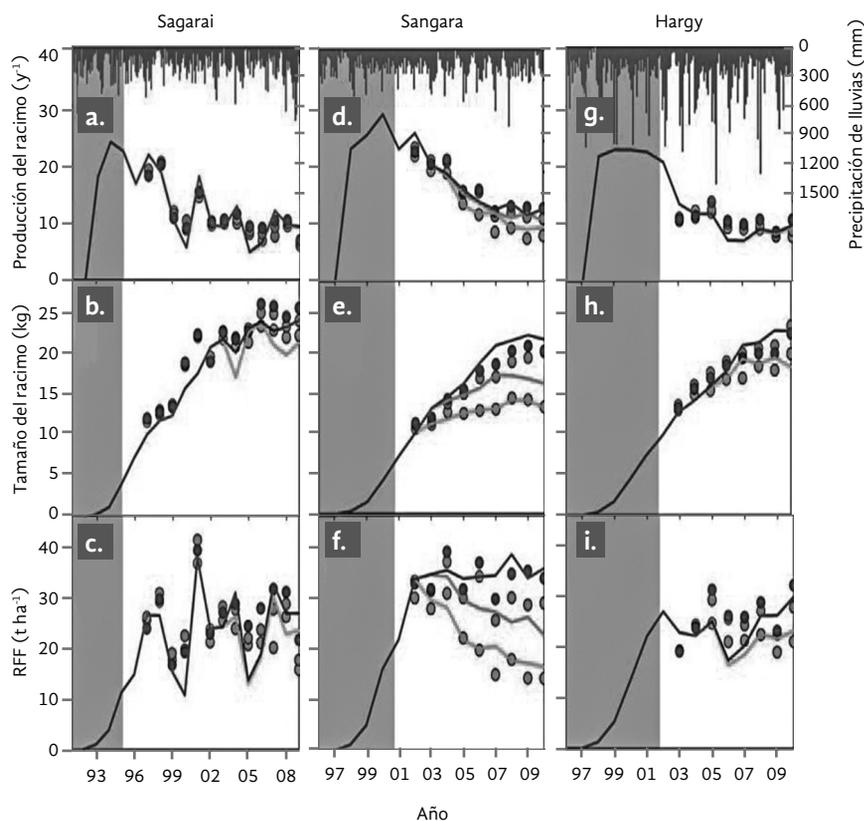


Figura 1. Productividad anual de racimos de fruta fresca (RFF) y componentes de productividad en ensayos de fertilización en tres sitios en Papúa Nueva Guinea. Los valores reales son puntos y los valores modelados son líneas. Los tratamientos de fertilización comenzaron después de finalizar el período sombreado con gris, y los parámetros se muestran para tres dosis de aplicación de fertilizantes nitrogenados (círculo sin relleno, círculos en gris claro y oscuro, siendo 0,57 y 227 kg N ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente).

Reimpreso de Huth *et al.*, (2014). *Environmental Modelling and Software* 62, 327-350. Tomado con autorización de Elsevier.

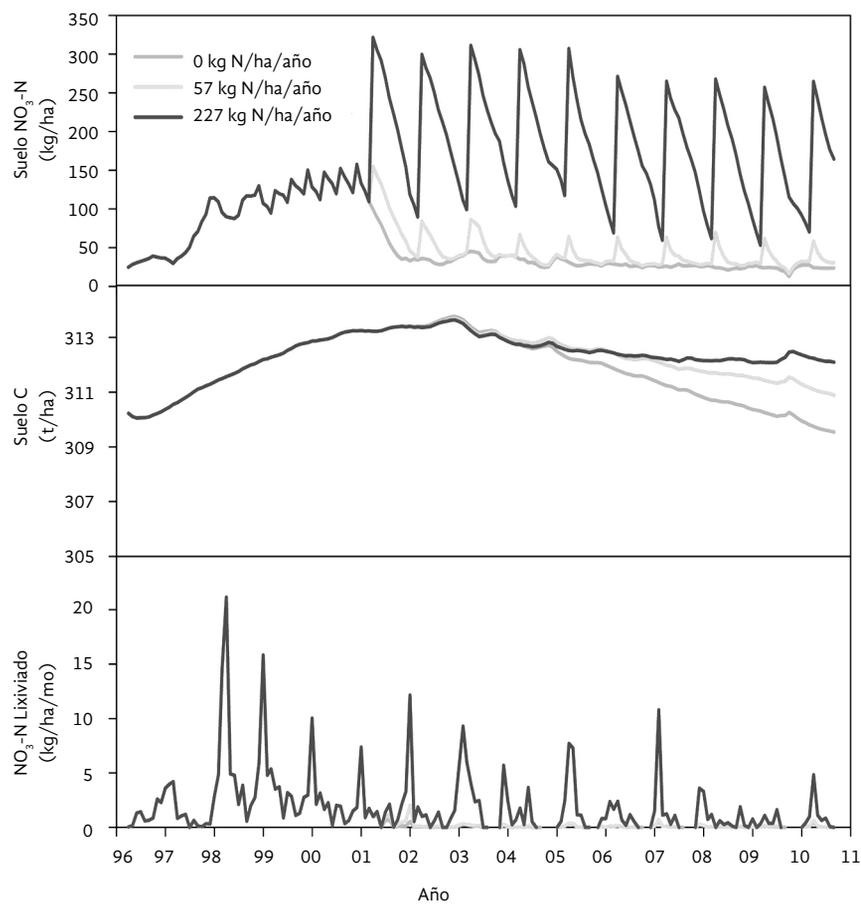
zantes (Figura 2). La cantidad total de C (y N orgánico, que está estrechamente relacionado con el C orgánico) almacenado en el suelo aumentó durante la fase en desarrollo, a medida que las palmas previamente derribadas se descomponían. A partir de ahí, la reserva de C en el suelo se mantuvo cuando se aplicaron dosis altas de fertilizantes nitrogenados, o disminuyó cuando se aplicó poco o nada de N. La diferencia se debió a las desigualdades en la productividad primaria neta entre los tratamientos. Una proporción relativamente alta de la producción primaria neta se extrae en los RFF, pero la restante, principalmente la producción de hojas, se adiciona al suelo y equilibra la pérdida de C a través de la respiración microbiana. Cuando no se aplicaron fertilizantes, no hubo cambio neto en el contenido modelado de C en el suelo a lo largo del ciclo de cultivo, mientras que la adición de fertilizantes dio como resultado un incremento neto.

El contenido modelado de N mineral en el suelo fue sensible a la edad del cultivo y al manejo (Figura 2). Se elevó durante la fase en desarrollo, a medida que las

palmas de aceite recientemente derribadas y el cultivo de cobertura leguminosa se descomponían y el N orgánico que contenían se mineralizó a amonio y nitrato. Las palmas derribadas contenían N absorbido a lo largo de los últimos 25 años y el cultivo de cobertura leguminosa contenía N absorbido antes que el dosel de la palma se cerrara. Las pérdidas por lixiviación de N mineral fueron grandes durante la fase en desarrollo, debido a que las cantidades disponibles fueron mayores de lo que las palmas podían absorber. A partir de ahí, durante la fase en producción, el contenido de N mineral del suelo estuvo estrechamente relacionado con la aplicación de fertilizantes, la adsorción por las palmas y las pérdidas por lixiviación. La dosis óptima agronómica de N fue de aproximadamente 50-100 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en este sitio. Las dosis de aplicación por encima de esta dieron como resultado un alto contenido de nitratos en el suelo y elevadas pérdidas por lixiviación.

Los intercambios modelados de N entre el sistema suelo-planta y la atmósfera también fueron sen-

Figura 2. Reservas moderadas de C y N en el suelo, y pérdidas mensuales de N por lixiviación en un ciclo de cultivo en Sangara, Papúa Nueva Guinea, con tres dosis de aplicación de fertilizante nitrogenado (de 2001 a 2011). La dosis comercial de fertilizante nitrogenado para las palmas en producción en esta plantación fue de aproximadamente 100 kg N ha⁻¹ año⁻¹.



sibles a la edad del cultivo y el manejo (Figura 3). La fijación de nitrógeno fue alta al inicio de la fase del cultivo y disminuyó a niveles insignificantes cuando se cerró el dosel de las palmas. Se mantuvo en niveles insignificantes en toda la fase en producción en los tratamientos fertilizados. Sin embargo, donde no se adicionó fertilizante, las tasas de fijación aumentaron a medida que el cultivo envejecía, presumiblemente debido al menor contenido de N mineral y más luz en esas condiciones. Las pérdidas de N a la atmósfera fueron sensibles a la cantidad de N mineral en el suelo y el contenido de agua en el suelo. La mayor parte de la pérdida de N gaseoso fue en forma de N₂, pero se emitieron cantidades significativas del gas de efecto invernadero N₂O con dosis excesivas de fertilizantes. Con dosis bajas adecuadas de fertilizantes nitrogenados, las emisiones de N₂O fueron bajas en la fase en producción, lo que estuvo de acuerdo con las mediciones realizadas en este sitio (Banabas, 2007).

Medición de las reservas de carbono y nitrógeno en el suelo

Las reservas de C y N en las mismas palmas de aceite se entienden razonablemente bien y pueden calcularse mediante las relaciones alométricas existentes. Sin embargo, hay muchos menos datos disponibles sobre los cambios en las reservas de C y N a largo plazo en suelos sembrados con palma. Por otro lado, la mayor parte del C y N en el sistema se encuentra en el suelo, por lo que las cantidades involucradas tienen una gran influencia en los procesos de los ciclos. Por tanto, la medición precisa de las reservas de C y N en el suelo es fundamental para iniciar simulaciones realistas y monitorizar los cambios reales a lo largo del tiempo. Teniendo en cuenta que no hay datos de monitorización a largo plazo disponibles, examinamos los cambios en las reservas de C en un período de 25 años mediante una cronosecuencia en plantacio-

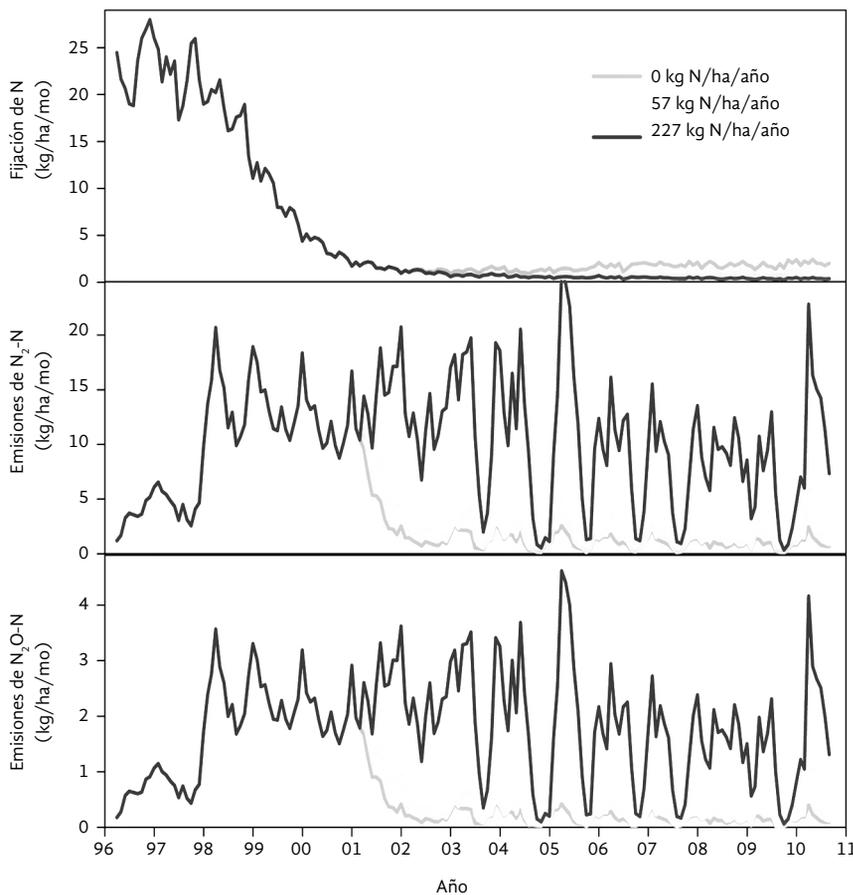


Figura 3. Intercambios modelados de N entre el sistema suelo-planta y la atmósfera (valores mensuales) a lo largo de un ciclo de cultivo en Sangara, Papúa Nueva Guinea, con tres dosis de aplicación de fertilizante nitrogenado (de 2001 a 2011). La dosis comercial de fertilizante nitrogenado en esta plantación fue de aproximadamente 100 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

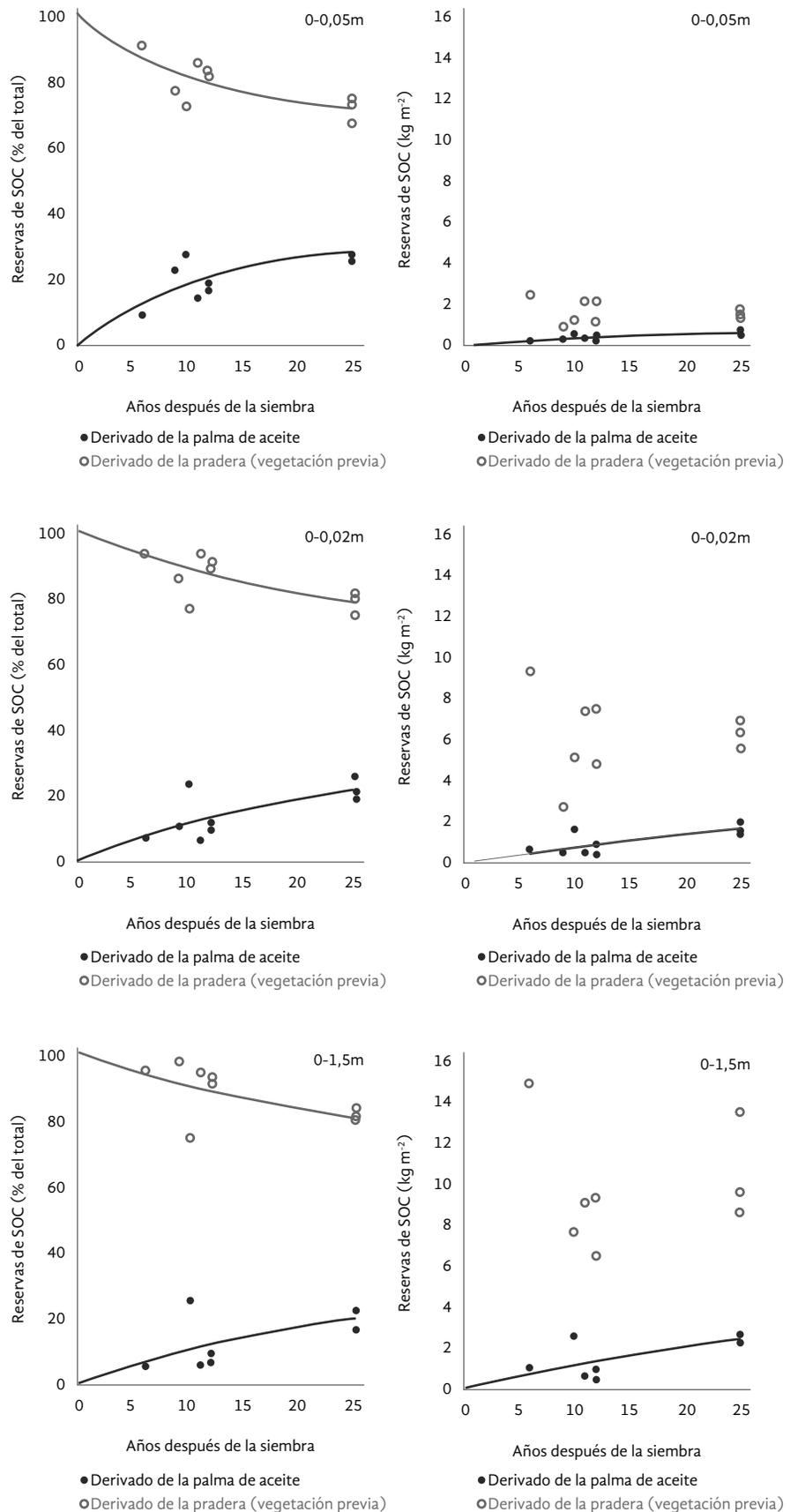
nes sembradas en praderas en Papúa Nueva Guinea (Goodrick *et al.*, 2015). Además, utilizamos isótopos de C para cuantificar la pérdida de carbono orgánico del suelo (SOC, por sus siglas en inglés) derivada de las praderas y la ganancia derivada de la palma de aceite durante este período.

El estudio de la cronosecuencia mostró un incremento neto de C en el suelo en las plantaciones de palma de aceite sembradas en las praderas (Figura 4). Hubo un aumento constante, pero pequeño, del C derivado de las palmas a lo largo del período de 25 años y ninguna pérdida significativa del C original derivado de la pradera. Ese resultado corresponde con un reciente estudio de 20 plantaciones en Indonesia, que no halló ninguna variación neta general en las reservas de C en suelo sembrado con palma de aceite (Khasanah *et al.*, 2015). Con base en estas mediciones de campo, la modelación de las reservas de C en el suelo mediante APSIM (Figura 2) parece razonable.

Durante nuestras mediciones y modelación de las reservas de carbono en el suelo, resultó evidente que los métodos de muestreo existentes no eran óptimos para cuantificar las tendencias a largo plazo (es decir, más de un ciclo de cultivo) en las propiedades del suelo o las cantidades totales de agua, C y N en el suelo en una plantación. El problema se debe en gran medida a la alta variabilidad espacio-temporal en la escala de 0-10 m. Aunque esta variabilidad es bien conocida, los diseños estándar existentes de muestreo de suelos no la tuvieron en cuenta de manera adecuada para efectuar monitorización a largo plazo (especialmente de un ciclo de cultivo a otro) o cuantificar las reservas por unidad de área sembrada (Nelson *et al.*, 2014). Por tanto, propusimos diseños de muestreo mejorados y probamos su capacidad para tomar en cuenta esta variabilidad espacio-temporal. Evaluamos los diseños de muestreo de los transectos lineales mediante la superposición de ellos en mapas de propiedades del suelo desarrollados a partir de un programa de muestreo de

Figura 4. Reservas de carbono orgánico en el suelo (SOC, por sus siglas en inglés) en plantaciones sembradas en praderas, para tres intervalos de profundidad, expresadas en proporción de la reserva total y como cantidades absolutas. Las líneas muestran un modelo exponencial de los cambios en las reservas. No se muestran líneas para las reservas absolutas de carbono derivado de la pradera, ya que no se relacionaron significativamente con los años después de la siembra.

Reimpreso de Goodrick *et al.*, (2015). *Global Change Biology Bioenergy* 7, 262-272. Tomado con autorización de John Wiley & Sons.



alta resolución (Nelson *et al.*, 2015a). Probamos varias orientaciones de los transectos (Figura 5) y densidades de los puntos de muestreo. Se encontró que la variabilidad espacio-temporal a escala de árbol podía explicarse adecuadamente al obtener una muestra compuesta conformada por aproximadamente 50 muestras tomadas a lo largo de un transecto que cruza seis hileras en ángulo oblicuo (Figura 5). El muestreo según este diseño permitirá que se cuantifiquen las tendencias en las propiedades del suelo a lo largo del tiempo, incluidos los contenidos de C y N.

Discusión

La productividad y los impactos ambientales de la palma de aceite están estrechamente ligados a los ciclos del agua, del carbono y del nitrógeno que interactúan entre sí, al genotipo del cultivo, al tipo de suelo y al manejo. El modelo de sistemas de cultivos recientemente desarrollado, APSIM Oil Palm, propor-

ciona una herramienta para los científicos, y potencialmente también para los gerentes, para predecir los posibles efectos de cultivos en nuevas áreas, o de cambios en las prácticas de manejo en las ya existentes. Esta aplicación para la toma de decisiones de manejo ya la está logrando un grupo de cultivadores de cereales líderes en Australia, mediante la utilización de una herramienta basada en APSIM denominada Yield Prophet® (Holzworth *et al.*, 2014). Los posibles usos de APSIM Oil Palm podrían incluir:

- Predecir la productividad en nuevas situaciones de clima, tipo de suelo o uso previo del suelo.
- Predecir la respuesta de la productividad y la eficiencia en el uso de N a los cambios en el manejo, como los diferentes tipos, dosis y frecuencias de aplicación de fertilizantes nitrogenados (en situaciones específicas de suelo y clima).
- Pronosticar la productividad de RFF en los próximos meses o años.

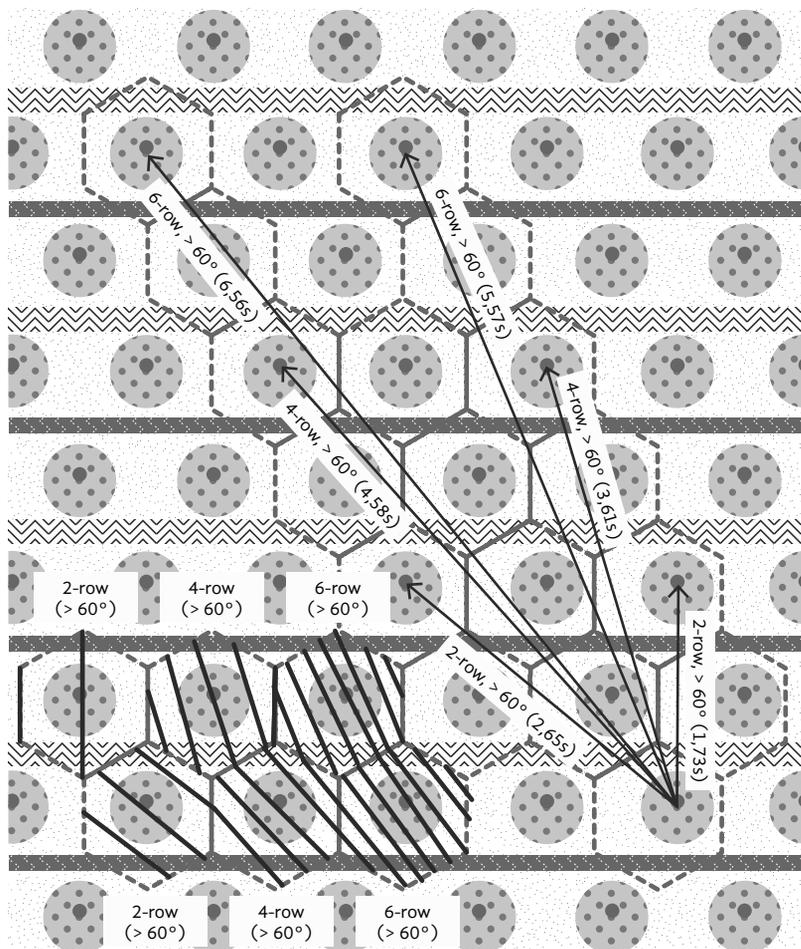


Figura 5. Sección de una plantación de palma de aceite, que muestra los seis transectos de muestreo de suelo evaluados, con las longitudes entre paréntesis (s = distribución triangular de siembra de las palmas). También se muestran las “unidades de árbol” (la unidad de repetición en la plantación) atravesadas por los transectos y, en la parte inferior izquierda de la figura, la cobertura equivalente de una unidad de árbol por cada transecto.

Reimpreso de Nelson *et al.*, (2015a). *Plant and Soil*. 394, 421-429. Tomado con autorización de Springer.

- Transecto
- - - Unidad de árbol
- Estípide de palma
- ~ ~ ~ Canal de pila
- ▬ Canal de cosecha
- Plato de la palma

- Predecir las tendencias en las condiciones del suelo, incluidos el contenido de C orgánico, la actividad biológica y la acidificación del suelo. El principal determinante del contenido de C orgánico en el suelo y la actividad biológica es la entrada de materia orgánica (Baldock y Nelson, 2000), que se puede predecir por la productividad primaria neta menos la retirada de RFF. La acidificación del suelo se puede predecir de manera similar a partir de los procesos del ciclo de nitrógeno y la exportación de cationes no ácidos en los RFF (Nelson *et al.*, 2015b).
- Predecir las emisiones de gases de efecto invernadero para el componente de campo de los modelos de presupuesto de gases de efecto invernadero (por ejemplo, Chase y Henson, 2010, Henson *et al.*, 2012a, b), incluidos los intercambios entre las emisiones de CO₂ y N₂O en situaciones específicas de suelo, clima y uso previo del suelo.
- Predecir los efectos del manejo en la calidad del agua aguas abajo, especialmente las pérdidas de N en los entornos aguas abajo.
- Evaluación de las limitaciones y opciones para mejorar los sistemas de los pequeños palmicultores.
- Capacitación para gerentes y cultivadores sobre las interacciones entre el crecimiento del cultivo, el medio ambiente y el manejo en todo el ciclo de cultivo.

Para que estos usos potenciales se hagan realidad, APSIM Oil Palm se debe seguir desarrollando y probando en una mayor variedad de situaciones. Esto requerirá la recopilación de datos sobre el suelo y meteorológicos adecuados para los lugares donde se utilizará. Con frecuencia estos datos no están disponibles, pero existen métodos para recolectarlos o generarlos (Huth *et al.*, 2014, Wockner *et al.*, 2014, Nelson *et al.*, 2015a).

APSIM Oil Palm abarca los procesos críticos que determinan el crecimiento y la productividad de la palma de aceite, pero no incorpora todos los procesos conocidos. Si estas limitaciones impiden la apli-

cación del modelo, sería posible superarlas con más investigación y desarrollo. Por ejemplo, APSIM Oil Palm fue desarrollado con los datos de crecimiento para Dami tenera *Elaeis guineensis*, pero sería posible desarrollar las configuraciones para otros cultivos o híbridos con *E. oleifera*. Otros módulos de cultivo en APSIM, como el módulo de trigo, tienen parámetros para diferentes cultivos. APSIM también se ha utilizado para modelar las interacciones genotipo x medio ambiente x manejo para otros cultivos (Holzworth *et al.*, 2014). Con respecto al suministro y absorción de nutrientes, se supone que otros nutrientes diferentes al N están en cantidad adecuada, y la respuesta a su suministro no está modelada actualmente. Puede ser posible construir módulos para el ciclo de otros nutrientes, como el potasio (K), en particular (Scanlan *et al.*, 2015). También serían posibles nuevas mejoras, tales como el mejoramiento de los parámetros de los cultivos de cobertura, la simulación de la capa freática y sus efectos, la variabilidad espacial en los procesos, y los procesos fisiológicos, como la producción de aceite. Estas y otras mejoras potenciales son posibles dentro del marco APSIM.

Conclusión

Los conocimientos sobre los ciclos del agua, del carbono y del nitrógeno en el sistema de palma de aceite están actualmente integrados en un marco de modelación. El modelo APSIM Oil Palm puede permitir una investigación más específica y una mejor toma de decisiones en el futuro. Sin embargo, primero es necesario probarlo en una mayor variedad de situaciones, lo que requerirá la recopilación de conjuntos de datos adecuados y la colaboración entre agrónomos y modeladores.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Centro Australiano para la Investigación Agrícola Internacional (SMCN-2009-013).

Referencias bibliográficas

- Baldock, J.A., and Nelson, P.N. (2000). Soil organic matter. In: M.E. Sumner *et al.* (eds.) *Handbook of Soil Science*. Boca Raton, U.S.A.: CRC Press.
- Banabas, M. (2007). *Study of Nitrogen Loss Pathways in Oil Palm (Elaeis guineensis Jacq.) Growing Agro-Ecosystems in Volcanic Ash Soils in Papua New Guinea*. PhD thesis. Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- Brown, H.E., Huth, N.I., Holzworth, D.P., Teixeira, E.I., Zyskowski, R.F., Hargreaves, J.N.G., Moot, D.J. Plant modelling framework: software for building and running crop models on the APSIM platform. *Environ. Model. Softw.* 62: 385-398.
- Chase, L.D.C., Henson, I.E. (2010). A detailed greenhouse gas budget for palm oil production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8, 199-214.
- 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, 263-279.
- Goodrick, I., Nelson, P.N., Banabas, M., Wurster, C., Bird, M.I. (2015). Soil carbon balance following conversion of grassland to oil palm. *Global Change Biology Bioenergy* 7, 263-272.
- Henson, I.E., Ruiz Romero, R., Romero, H.M. (2012a). The greenhouse gas balance of the oil palm industry in Colombia: a preliminary analysis. I. Carbon sequestration and carbon offsets. *Agronomía Colombiana*, 30, 359-369.
- Henson, I.E., Ruiz Romero, R., Romero, H.M. (2012b). The greenhouse gas balance of the oil palm industry in Colombia: a preliminary analysis. II. Greenhouse gas emissions and the carbon budget. *Agronomía Colombiana*, 30, 370-378.
- Henson, I.E., Yahya, Z., Noor, M.R.M., Harun, M.H., Mohammed, A.T., (2007). Predicting soil water status, evapotranspiration, growth and yield of young oil palm in a seasonally dry region of Malaysia. *J. Oil Palm Res.* 19, 398-415.
- Holzworth, D.P., Huth, N.I., deVoil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E., Snow, V.O., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H.E., Whish, J.P.M., Verrall, S., Fainges, J.L.W.B., Peake, A.S., Poulton, P.L., Hochman, Z., Thorburn, P.J., Gaydon, D.S., Dalgliesh, N.P., Rodriguez, D., Cox, H., Chapman, S., Doherty, A., Teixeira, E., Sharp, J., Cichota, R., Vogeler, I., Li, F.Y., Wang, E., Hammer, G.L., Robertson, M.J., Dimes, J., Carberry, P.S., Hargreaves, J.N.G., MacLeod, N., McDonald, C., Harsdorf, J., Wedgwood, S., Keating, B.A., (2014). APSIM - evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environ. Model. Softw.* 62, 327-350.
- Huth, N.I., Banabas, M., Nelson, P.N., Webb, M.J. (2014). Development of an oil palm cropping systems model: Lessons learned and future directions. *Environmental Modelling and Software* 62, 411-419.
- Khasanah, N.M., Noordwijk, M.V., Ningsih, H. & Rahayua, S. (2015). Carbon neutral? No change in mineral soil carbon stock under oil palm plantations derived from forest or non-forest in Indonesia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 211, 195-206.
- Moore, A., Holzworth, D., Herrmann, N., Brown, H., deVoil, P., Snow, V., Zurcher, E., Huth, N. (2014). Modelling the manager: representing rule-based management in farming systems simulation models. *Environ. Model. Softw.* 62, 399-410.
- Nelson, P.N., Webb, M.J., Banabas, M., Nake, S., Goodrick, I., Gordon, J., O'Grady, D., Dubos, B. (2014). Methods to account for tree-scale variation in soil- and plant-related parameters in oil palm plantations. *Plant and Soil* 374, 459-471. Plus Erratum *Plant and Soil* 378, 415.

- Nelson, P.N., Banabas, M., Goodrick, I., Webb, M.J., Huth, N.I., O'Grady, D. (2015a). Soil sampling in oil palm plantations: a practical design that accounts for lateral variability at the tree scale. *Plant and Soil*. 394, 421-429'
- Nelson, P.N., Banabas, M., Huth, N.I., Webb, M.J. (2015b). Quantifying trends in soil fertility under oil palm: practical challenges and approaches. In: Webb, M.J., Nelson, P.N., Bessou, C., Caliman, J-P., Sutarta, E.S. (eds.) *Sustainable Management of Soil in Oil Palm Plantings. Proceedings of a workshop held in Medan, Indonesia, 7-8 November 2013*. ACIAR Proceedings No. 144. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra, pp. 60-64.
- Probert, M.E., Dimes, J.P., Keating, B.A., Dalal, R.C., Strong, W.M. (1998). APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. *Agric. Syst.* 56, 1-18.
- Scanlan, C.A., Huth, N.I., Bell, R.W. (2015). Simulating wheat growth response to potassium availability underfield conditions with sandy soils. I. Model development. *Field Crops Research*.
- van Kraalingen, D.W.G., Breure, C.J., Spitters, C.J.T. (1989). Simulation of oil palm growth and yield. *Agric. For. Meteorol.* 46, 227-244.
- van Noordwijk, M., Lusiana, B., Khasanah, N., Mulia, R. (2011). *WaNuLCAS Version 4.0: Background on a Model of Water, Nutrient and Light Capture in Agroforestry Systems*. World Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor, Indonesia, p. 224.
- Wockner, G., Dalgliesh, N., Y. Dang, Price, L., Voller, J. (2014). *Measuring and managing soil water*. Revised version 1.38. CSIRO, GRDC.