

## Indicadores de rendimiento de nutrientes en palma de aceite\*

### Nutrient Yield Indicators in Oil Palm



**THOMAS OBERTHÜR**

Instituto Internacional para la Nutrición de Plantas, IPNI, Programa del Sudeste Asiático. International Plant Nutrition Institute, Southeast Asia Program

**AUTORES:** T. Oberthür, Instituto Internacional para la Nutrición de Plantas, IPNI, Programa del Sudeste Asiático, R. Norton, Facultad de Veterinaria y Ciencias Agrícolas, Universidad de Melbourne (Australia), H. Sugianto, IPNI, Y. L. Lim, IPNI, C. Donough, IPNI, P.V.V. Ho, Wilmar International, S. Pramananda, Wilmar International, G. Singh, Wilmar International, S. P. Kam, IPNI.

**CITACIÓN:** Oberthür, T., Norton, R., Sugianto, H., Lim, Y. L., Donough, C., ... & Kam, S. P. (2019). Indicadores de rendimiento de nutrientes para palma de aceite. *Palmas*, 40(Especial Tomo I), 144-157.

**PALABRAS CLAVE:** equilibrio parcial de nutrientes, productividad por factor parcial, eficiencia de fertilizante, efectividad de fertilizante, evaluación comparativa.

**KEYWORDS:** Partial nutrient balance, partial factor productivity, fertilizer efficiency, fertilizer effectiveness, benchmarking.

\*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

## Resumen

El manejo eficaz y eficiente de los fertilizantes es una parte importante para lograr rendimientos sostenibles en la palma de aceite, tanto a corto como a largo plazo. Si bien las decisiones sobre su manejo se toman rutinariamente como parte de la estrategia agronómica general, es preciso contar con una manera de monitorear el rendimiento para poder tomar decisiones futuras a medida que las condiciones biofísicas y económicas cambian. El uso de un conjunto de indicadores de rendimiento de nutrientes (NPI, por su sigla en inglés) puede proporcionar información a los administradores para dirigir las acciones futuras, así como dar retroalimentación sobre el desempeño comparativo de grupos al interior de la plantación. Utilizando los registros de plantaciones se puede derivar una selección de NPI, incluyendo la productividad por factor parcial (PPF por su sigla en inglés; la cantidad de producto por cada unidad de nutriente fertilizante empleado), el equilibrio

parcial de nutrientes (PNB, por su sigla en inglés; la porción de nutrientes eliminados del producto, en comparación con la cantidad de nutriente fertilizante usada) y la eficiencia agronómica (AE, por su sigla en inglés; el aumento en el rendimiento, en comparación con la cantidad de nutriente fertilizante utilizada). De una plantación comercial en Borneo, con una media de rendimiento de  $24,0 \pm 4,6$  t RFF/ha, la media de PPF-N fue de  $174 \pm 39$  kg RFF/kg N, la de PPF-P de  $750 \pm 258$  kg RFF/kg P y la de PPF-K de  $85 \pm 19$  kg RFF/kg K. La media de PNB-N fue de  $0,53 \pm 0,12$ , la de PNB-P de  $0,29 \pm 0,10$  y la de PNB-K fue de  $0,33 \pm 0,07$ . Estos datos se pueden desagregar para identificar los indicadores de desempeño por grupo de manejo de suelos y edad de la palma. Igualmente, los NPI se pueden monetizar considerando la relación entre el valor del producto y el costo del fertilizante. Aunque esta evaluación comparativa del desempeño de la plantación proporciona información a los administradores para el manejo de los nutrientes, es necesario realizar trabajos adicionales para cuantificar de mejor manera la relación entre el momento de suministro y el rendimiento, y el destino de los nutrientes no eliminados, como en el tejido de la palma o en el suelo. Así se puede obtener una mejor apreciación de la función de respuesta de frecuencia para la palma de aceite.

## Abstract

Effective and efficient fertilizer management is an important part of achieving sustainable yields in oil palm in both the short and long term. While decisions on the management of fertilizers are made routinely as part of the overall agronomic strategy, it is important to have a way to monitor nutrient performance so future decisions can be made as biophysical and economic conditions change. The use of a suite of nutrient performance indicators (NPI) can provide plantation managers with information to guide future management, as well as provide feedback on comparative performance of groups within the plantation. Using plantation records, a selection of NPI's may be derived, including partial factor productivity (FPF, the amount of product for each unit of fertilizer nutrient used), partial nutrient balance (PNB, the amount of nutrient removed in the product compared to the amount of fertilizer nutrient used) and agronomic efficiency (AE, the increase in yield compared to the amount of fertilizer nutrient used). From a commercial plantation in Kalimantan, with a mean yield of  $24.0 \pm 4.6$  t FFB/ha, the mean FPF-N was  $174 \pm 39$  kg FFB/kg N, mean FPF-P was  $750 \pm 258$  kg FFB/kg P and mean FPF-K was  $85 \pm 19$  kg FFB/kg K. Mean PNB-N was  $0.53 \pm 0.12$ , mean PNB-P was  $0.29 \pm 0.10$  and mean PNB-K was  $0.33 \pm 0.07$ . These data can be disaggregated to identify performance indicators by soil management group, palm age, year and/or management group. As well, the NPI can be monetized by considering the ratio of value of the product to the cost of the fertilizer. Such benchmarking of plantation performance can provide managers with input to manage nutrients although there is further work to be undertaken to better quantify the relationship between the timing of nutrient supply to yield, the fate of nutrients not removed such as in palm tissue or in soil, and a better appreciation of the rate response function for oil palm.

## Introducción

Se estima que el 95 % del área plantada con palma de aceite en el Sudeste Asiático está conformada por suelos de fertilidad subóptima (Mutert, 2001), y las respuestas al uso de fertilizantes ha sido demostrada por ensayos en campo (Kee y Goh, 2006). Entre 1951 y 1991 (Davidson, 1993), las prácticas mejoradas de fertilizantes en Malasia han contribuido a una mejora del 30 % en el rendimiento del aceite de palma (de 1,3

a 5,4 t/ha). Igualmente, el fertilizante es un insumo costoso para la producción de palma de aceite en el Sudeste Asiático: el consumo total de N, P, K y Mg es de 22-35 kg/año/t producida de RFF (Ng & Thamboo, 1967; Ng *et al.*, 1968), y reemplazar estos nutrientes eliminados significa que el fertilizante representa más de 50 % de los costos de un cultivo (Veloo *et al.*, 2013).

El uso del fertilizante es una parte importante del manejo de la plantación de palma de aceite, y el despliegue estratégico de nutrientes afecta su desempe-

ño físico, financiero y ambiental. En consecuencia, es primordial contar con una revisión constante de la utilización de este como parte de una estrategia comercial de planeación-acción-monitoreo-revisión. Por lo general, la planeación se realiza a escala de la finca y luego en bloques con base en un presupuesto financiero, quizás con pruebas de suelos y plantas, y considerando el rendimiento del cultivo. La acción o la implementación del programa de fertilizantes, suele realizarse sin una medición directa de la respuesta en el rendimiento o la rentabilidad del mismo. Dado que los términos del comercio entre los costos del fertilizante y los precios del aceite de palma cambian, ajustar los planes de fertilizante requiere monitorear un rango de respuestas relacionadas con formas de evaluar la eficiencia del uso de nutrientes (NUE, por su sigla en inglés).

Los cultivos anuales tienen estrategias bien definidas para evaluar los NUE (Fixen *et al.*, 2015). A

partir de la información experimental y de campo se puede derivar un rango de indicadores de rendimiento de nutrientes (NPI) para ayudar a guiar los programas de fertilizantes (Dobermann, 2007). La Tabla 1 presenta un resumen de algunos NPI típicos, e indica cómo pueden derivarse y algunos aspectos de su interpretación. En una plantación comercial de palma de aceite, se registran los datos de rendimiento tomado<sup>1</sup> y el uso de fertilizante a nivel de bloque, los que pueden utilizarse en métodos simples y robustos como una aproximación de los beneficios adquiridos por el uso de fertilizante. Aunque la Tabla 1 presenta un rango de opciones simples, ningún indicador por sí solo representa la complejidad del desempeño de los nutrientes al interior o entre áreas o cultivos o actividades de manejo (Norton *et al.*, 2015). No obstante, en conjunto, junto con otros datos, se pueden combinar para monitorear y comparar las áreas de interés.

**Tabla 1.** Indicadores seleccionados del rendimiento de nutrientes a nivel de producción y financiero para evaluaciones de palma de aceite y otros cultivos\*. Fuente: Dobermann (2007); Fixen *et al.* (2015).

Indicador NUE	Descripción	Interpretación
Productividad de factor parcial $PPF = Y/F$	Rendimiento por unidad de nutriente aplicada.	El PPF proporciona información sobre las tendencias de productividad a largo plazo de un sistema de cultivos, en comparación con los insumos de nutrientes que recibe.
Equilibrio parcial de nutrientes $PNB = Y*N/F$	Proporción de la cantidad de nutrientes eliminados en los productos cosechados y la de nutrientes aplicados.	El PNB es un indicador a largo plazo de las tendencias de eliminación de nutrientes, y es más útil al combinarlo con información sobre la fertilidad del suelo.
Eficiencia agronómica $AE = (Y-Y_0)/F$	Aumento en el rendimiento, en comparación con el <i>rendimiento sin fertilizante</i> y con el adicional por unidad de nutriente aplicada.	El AE es un indicador a corto plazo del impacto de los nutrientes aplicados sobre la productividad.
Relación de nutriente a precio de producto (NOP) $NOP = \$F/\$Y$	El costo del fertilizante en relación con el precio recibido por el producto.	Esta relación indica el aumento en el rendimiento que se requiere para suplir el costo del fertilizante utilizado.
Relación de costo y valor $VCR = (Y-Y_0)*\$Y/F*\$F$ $o = AE/NOP$	El aumento en los retornos con base en el costo del fertilizante.	Este es el beneficio marginal sobre la inversión financiera en el fertilizante.

Continúa →

1 El rendimiento ‘tomado’ (Oberthür *et al.*, 2012a) es la porción realmente cosechada (o recuperada) del total de racimos de fruto del cultivo disponibles durante la cosecha. El cultivo total disponible es el rendimiento

biológico o “hecho”, producido por las palmas en el periodo anterior de desarrollo de racimos de dos años (Breure, 2003), utilizando los recursos naturales disponibles y los insumos administrados.

**Continuación Tabla 1.** Indicadores seleccionados del rendimiento de nutrientes a nivel de producción y financiero para evaluaciones de palma de aceite y otros cultivos\*. Fuente: Dobermann (2007); Fixen *et al.* (2015).

Indicador NUE	Descripción	Interpretación
Relación de valor parcial y costo $PVRC = \frac{Y * \$Y}{F * \$F}$ $o = PPF / VCR$	El aumento relativo en el beneficio sobre el aumento relativo en el costo del fertilizante.	Donde los valores de AE son menos seguros, esta configuración que utiliza PPF da un beneficio parcial de presupuesto sobre la inversión en fertilizante.

\*(Y = rendimiento tomado; Y0 = rendimiento no fertilizado; F = nutriente aplicado en fertilizante; N = concentración de nutrientes en producto eliminado; \$Y = valor del rendimiento; \$ F = costo del fertilizante).

Nota: para calcular el uso anual de fertilizante, se utilizaron los del periodo de 30 a seis meses antes de la cosecha.

La aplicación de métricas de NPI a cultivos perennes en situaciones comerciales es menos común debido a los largos ciclos de producción, el uso de fertilizantes con varios nutrientes y la variación entre los tipos de suelo y los años. Weih (2014) y Srivastava & Malhotra (2017) presentaron descripciones generales para evaluar el NUE en estos cultivos, pero no hay mucho más sobre el tema en la literatura. Parte de este problema es que existen pocos datos sobre la respuesta marginal de cultivos perennes, como la palma de aceite, a respuestas de nutrientes individuales que sean relevantes para estimar la eficiencia agronómica (AE, Tabla 1). Este artículo discute cómo se pueden derivar las métricas en granjas o plantaciones comerciales, para luego utilizarlas para evaluar el rendimiento de los nutrientes y revisar los programas de fertilizantes a lo largo del tiempo.

## Derivación de NPI para evaluar una plantación comercial

Los datos utilizados en este informe están basados en Plantation Intelligence (Cook *et al.*, 2014; Oberthür *et al.*, 2017) y se recogen del periodo 2011-2018 de una plantación comercial con tres fincas que cubren 17.755 ha en Borneo, Indonesia. Hay 442 bloques (ju-

nio 2018) en tres fincas, y pocos han sido excluidos debido a datos o metadatos incompletos. La media del tamaño de bloque es de 41 ha y la densidad promedio de plantación es de 131 palmas/ha. La producción está dividida en cinco grupos de manejo del suelo (SMG, por su sigla en inglés)<sup>2</sup>, con base en un estudio de suelos no publicado (Param Agricultural Soil Surveys /M Sdn, Bhd, 2007) y las palmas aquí incluidas van de los seis a los 17 años de edad. Existe un número desigual de palmas de cada grupo de edad en cada tipo de suelo, pero el conjunto de datos más grande es para los bloques con palmas de 13 a 17 años de edad en el SMG C y D. Para cada uno se registran los rendimientos tomados de racimos de fruta fresca (RFF), así como el uso de nutrientes. La media de rendimiento tomado de RFF de la plantación fue de 24 ± 4,6 t RFF/ha y la del uso anual de nutrientes de 140 kg N/ha, 35 kg P/ha y 286 kg K/ha. Mg, B y otros adicionales fueron usados regularmente.

Debido al periodo de desarrollo de cada racimo de fruta, se utilizó el fertilizante de 30 a seis meses antes de la cosecha para calcular el uso anual de fertilizantes que contribuye al rendimiento anual. La aplicación de fertilizante ocurre entre una y tres veces al año en cada bloque y estos datos son emparejados con el rendimiento tomado anual con una

2 SMG A = ultisoles y oxisoles bien drenados y poco profundos a profundos, con alta fijación de P en terreno ondulado a continuo; SMG B = ultisoles bien drenados y profundos en terreno ondulado; SMG C = ultisoles profundos en terrenos planos a ondulados con nece-

sidades de drenaje; SMG D = esodosoles poco profundos a moderadamente profundos en terreno ondulado; SMG F = suelos orgánicos poco profundos a moderadamente profundos, con drenaje muy pobre y rastros de elementos de Cu, Zn y B.

aplicación de 12 meses de fertilizante, derivada de los periodos particulares para N, P o K que conducen hasta la cosecha. Las concentraciones de nutrientes empleadas (3,07 kg N/t RFF, 0,38 kg P/t RFF y 3,84 kg K/t RFF) fueron derivadas del resumen en Donough *et al.* (2016). Estos valores se aplicaron a todos los SMG, años y edades de las palmas. Los detalles completos de estos métodos pueden encontrarse en otros autores.

La derivación de la productividad de factor parcial (PPF) y el equilibrio parcial de nutrientes (PNB), se calcula con facilidad con los datos de la plantación. Considerando las diferentes proporciones de nutrientes entre los bloques comerciales, es mejor calcularlos para cada nutriente de interés en vez de para la aplicación total de fertilizantes. Sin embargo, derivar la eficiencia agronómica (AE) es más complejo, puesto que requiere un tratamiento de fertilizante nulo para derivar el rendimiento sin fertilizantes (Y0), y en las fincas comerciales es poco probable que existan estos bloques o áreas dentro de los bloques.

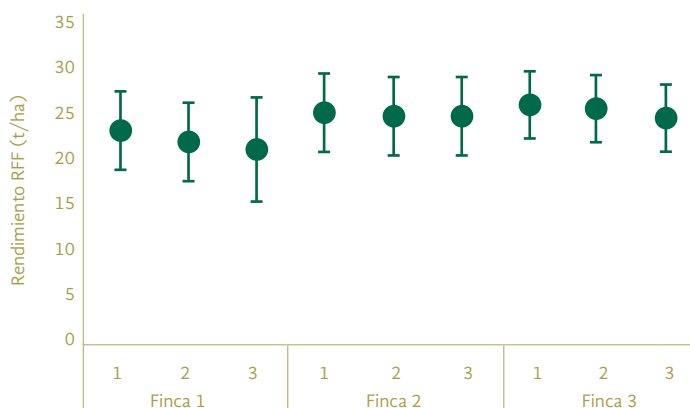
Existen varios enfoques para derivar un Y0, el cual, para una evaluación realista, sería el efecto de retener el uso de fertilizante por tres o más años (el periodo de desarrollo de rendimiento). Los valores pueden ser diferentes dependiendo de la edad de la palma, las condiciones estacionales, los nutrientes y el SMG. En la ausencia de valores experimentales en campo o del concepto de un experto es necesario estimar Y0. Esto se puede realizar seleccionando los valores de una literatura limitada o utilizando un enfoque estadístico desde el interior del conjunto de datos, tales como la regresión, el ajuste de valores límite o con la densi-

dad de probabilidad de los datos. En este conjunto de datos de investigación se calculó Y0 para cada grupo de SMG y de edad de la palma empleando un valor con una desviación estándar menor que la media de ese grupo. Debido a la existencia de años con rendimientos mayores y menores, la diferencia entre estos fue ajustada hacia arriba o hacia abajo entre + 9 % y -11 % con base en la media de rendimiento para ese grupo de edad y tipo de suelo en relación con otros años. Este valor se utiliza con fines ilustrativos y se requieren trabajos adicionales para desarrollar valores de Y0 más resistentes y confiables para derivar la AE.

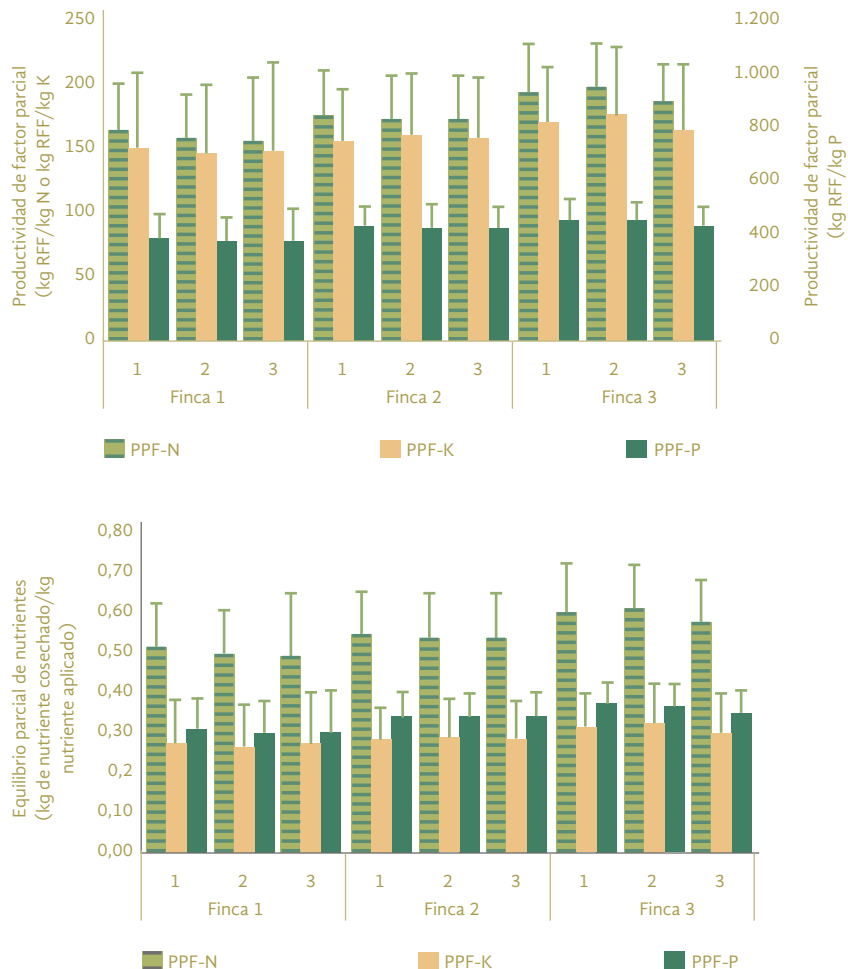
## Ejemplos de NPI de datos de una plantación comercial

Cualquier conjunto de valores se puede comparar utilizando datos comerciales. Por ejemplo, se cotejan las fincas con plantaciones o las divisiones al interior de las fincas, pero estas comparaciones suelen tener factores de confusión incrustados en los datos usados. Aun así, pueden ser de interés para los administradores de las fincas. La Figura 1 muestra los valores comparativos de PNB y PPF para N, P y K en tres plantaciones dentro de los datos de prueba. Los coeficientes de variación de estos datos suelen estar en el rango de 20-30 % y son sujeto de la aplicación de análisis estadísticos tradicionales (por ejemplo, el de varianza) para su comparación y evaluación. De hecho, se puede realizar cualquier comparación de interés, como con la edad de la palma, con los tipos de suelo o entre el tiempo, o incluso entre plantaciones, divisiones y subdivisiones. Nuestro análisis (no mostrado) indica que la edad de la palma y el SMG tienen una inte-

**Figura 1.** Indicadores de rendimiento de nutrientes en tres fincas de una plantación de palma de aceite en Borneo: a) rendimiento de racimos de fruta fresca (RFF); b) productividad de factor parcial de nitrógeno (PPF-N), fósforo (PPF-P) y potasio (PPF-K); y c) equilibrio parcial de nutrientes para nitrógeno (PNB-N), fósforo (PNB-P) y potasio (PNB-K).



Continúa →

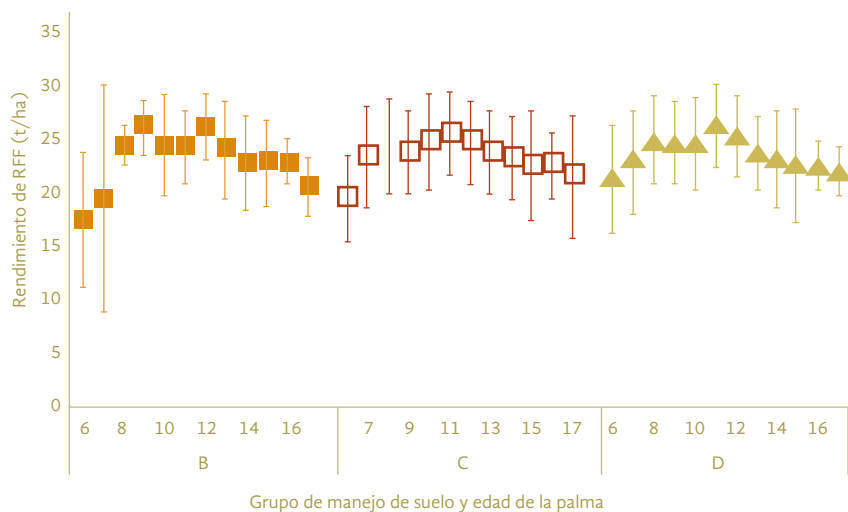


**Continuación Figura 1.** Indicadores de rendimiento de nutrientes en tres fincas de una plantación de palma de aceite en Borneo: a) rendimiento de racimos de fruta fresca (RFF); b) productividad de factor parcial de nitrógeno (PPF-N), fósforo (PPF-P) y potasio (PPF-K); y c) equilibrio parcial de nutrientes para nitrógeno (PNB-N), fósforo (PNB-P) y potasio (PNB-K).

**Nota:** La media de PPF-N fue  $174 \pm 39$  kg RFF/kg N, la de PPF-P  $750 \pm 258$  kg RFF/kg P y la de PPF-K  $85 \pm 19$  kg RFF/kg K. La media de PNB-N fue  $0,53 \pm 0,12$ , la de PNB-P  $0,29 \pm 0,10$  y la de PNB-K  $0,33 \pm 0,07$ . Las desviaciones estándar para cada valor muestran la variación al interior de cada conjunto de datos.

racción significativa ( $p < 0,05$ ) para el rendimiento de RFF, de manera que los patrones de desarrollo de rendimiento eran diferentes respecto a los SMG con-

siderados. La Figura 2 presenta una comparación del rendimiento de RFF para la edad de la palma y SMG a partir del conjunto de datos de la plantación.



**Figura 2.** Rendimiento promedio de racimos de fruta fresca (t/ha) para diferentes edades de palma en tres grupos de manejo de suelos para una plantación en Borneo.

Nota: se muestran las desviaciones estándar de cada valor para indicar la variación al interior de cada conjunto de datos.

Debido a la interacción, es probable que cualquiera de estas comparaciones de factores únicos para evaluar los NPI confunda la edad de la palma, las condiciones estacionarias y el tipo de suelo, todas las que afectan el rendimiento de los RFF, y por lo tanto el NPI derivado. Estos factores de confusión deben ser tenidos en cuenta al evaluar el desempeño de bloques individuales para ayudar a guiar el manejo futuro y obtener la mayor claridad posible sobre los efectos del manejo de nutrientes.

Con base en este conjunto de datos, e ignorando el agrupamiento de diferentes cohortes de tipo de suelo, año y edad de la palma, la Tabla 2 presenta los valores evaluados para rendimiento, PPF, PNB y AE. Los valores para cada nutriente son más relevantes si dicho nutriente es el que más limita la producción, porque si, por ejemplo, el N es limitante, los valores de PPF no se verán afectados por otros nutrientes. Estos NPI representan un conjunto de puntos de referencia sobre los que se puede evaluar el rendimiento de nutrientes en otros lugares o de grupos al

interior de este conjunto de datos. Por supuesto, se tiene precaución con estos valores, ya que son preliminares y están abiertos a amplias conjeturas en el presente. También se muestran los valores de NPI para cereales, según lo informado por Fixen *et al.* (2015). Si bien son diferentes entre estos dos tipos de cultivos, no debe concluirse que uno de estos es más o menos eficiente para utilizar nutrientes que el otro. Una parte de esta diferencia se debe a que distintos productos tienen diversas densidades de energía y, en consecuencia, diferentes costos fotosintéticos (Penning de Vries *et al.*, 1974).

## Presentación e interpretación de NPI

La naturaleza y método de exposición de NPI se determinan dependiendo del tipo de comparaciones que los administradores quieran obtener de los datos. La Figura 3 muestra un ejemplo de presentación potencial, en el que se indica la media y desviaciones estándar para el rendimiento de RFF (Figura 3a), PPF-N

**Tabla 2.** Indicadores de rendimiento de nutrientes derivados de una plantación en Borneo.

NPI	Rango de valores para palma de aceite	Valores de cereales
Rendimiento t (RFF/ha)	24,0 ± 4,6	-
PPF-N (kg RFF/kg N)	174 ± 39	40-90
PPF-P (kg RFF/kg P)	750 ± 258	100-250
PPF-K (kg RFF/kg K)	85 ± 19	75-300
PNB-N (N eliminado/N aplicado)	0,53 ± 0,12	0,7-0,9
PNB-P (P eliminado/P aplicado)	0,28 ± 0,10	0,7-0,9
PNB-K (K eliminado/K aplicado)	0,33 ± 0,07	0,7-0,9
AE-N (aumento en RFF/N aplicado)	30 ± 30	15-30
AE- P (aumento en RFF/ P aplicado)	128 ± 131	15-40
AE- K (aumento en RFF/ K aplicado)	15 ± 15	8-20
VCR-NPK (\$ recuperado/\$ fertilizante)	8,6 ± 2,5	-

**Nota:** se muestra el valor medio para cada indicador junto con la desviación estándar de esa media. Un valor “normal” de este conjunto de datos estaría dentro del rango de una desviación estándar por encima y una por debajo de la media. Por interés, los valores de estos NPI para cereales también se muestran en Fixen *et al.* (2015).

(Figura 3b), PNB-N (Figura 3c) y AE-N (Figura 3d) a lo largo de cuatro años, para todas las palmas de 10 años de edad en la plantación sembrada en el SMG C en 2014 y seguimiento a esa cohorte hasta 2017. Los símbolos superpuestos sobre las cajas de los cuatro NPI representan dos bloques tomados como ejemplos de palmas de 10 años de edad en 2014, creciendo en el SMG C, y permite una comparación de estos bloques con similares y en el tiempo.

Durante los cuatro años, el rendimiento medio de bloque para el A con el menor rendimiento (círculos grises) fue de 21,80 t RFF/ha con una tasa media de N aplicado de 123 kg N/ha; mientras que el bloque B con mejor desempeño (triángulos abiertos) tuvo un rendimiento promedio de 27,16 t RFF/ha y una tasa media de N aplicado de 147 kg N/ha. En términos de PPF-N y PNB-N para estos dos bloques, solo en 2014 hubo una clara diferencia en los indicadores, pero el B mostró un AE-N mayor que el A consistentemente. Puede ser que las condiciones del suelo, tales como el drenaje o el pH en el A fuera menos favorable que en el B. En este caso, la comparación en términos equi-

parables, representa una manera de evaluar el rendimiento de nutrientes para bloques. Si bien el cotejo de bloques a lo largo de los años es útil para evaluar cohortes particulares de palmas, también se pueden hacer otras comparaciones entre grupos, como por ejemplo entre SMG o entre regiones al interior de plantaciones. Igualmente es posible desarrollar patrones espaciales en los NPI.

La interpretación de los NPI requiere una apreciación de la naturaleza de este indicador particular. El rendimiento del racimo de fruta fresca es más fácil, ya que, por lo general, entre mayor sea el rendimiento mejor es el desempeño del bloque; aunque es necesario incluir algunas consideraciones económicas, según se describe en la siguiente sección “Monetizar los NPI”. La Figura 4 muestra una curva típica de la respuesta del rendimiento al añadir fertilizantes/nutrientes. El rendimiento aumenta al inicio, principalmente en respuesta al nutriente añadido (A-B), pero la cantidad de rendimiento extra se reduce a medida que se agregan más cantidades (B-C, luego C-D): la ley de los rendimientos decrecientes. Cualquier nu-



**Figura 3.** Rendimiento comparativo de una cohorte de palmas de 10 años de edad en 2014 que fue monitoreada durante 2015, 2016 y 2017 en una plantación comercial en Borneo.

Nota: datos para a) rendimiento de racimos de fruta fresca (RFF t/ha); b) productividad de factor parcial de nitrógeno (PPF-N, kg RFF/kg N); c) equilibrio parcial de nutrientes de nitrógeno (PNB-N, kg N/kg N); y d) eficiencia agronómica de N (aumento en kg de RFF/kg N). Se muestran los indicadores de rendimiento de nutrientes para dos bloques: A (círculo gris) y B (triángulos abiertos) tomados aleatoriamente de la cohorte. Las tasas de nitrógeno que llevan a los rendimientos para los cuatro años de los círculos grises son 118 kg N/ha, 134 kg N/ha, 132 kg N/ha y 107 kg N/ha, y para los triángulos abiertos 127 kg N/ha, 165 kg N/ha, 150 kg N/ha y 145 kg N/ha.



triente añadido por encima del rendimiento máximo (E) no resulta en uno adicional y en poca captación, y por lo tanto, no proporciona retornos económicos inmediatos y puede resultar en su acumulación en el suelo o en un mayor riesgo de pérdida para el ambiente. La pendiente de A hacia B depende de la fertilidad de fondo del suelo. El rendimiento tiende a aumentar considerablemente con el primer incremento de fertilizante añadido y, luego, la respuesta relativa se reduce con cada cantidad sucesiva de fertilizante adicionada en una función típica de “rendimientos decrecientes”. En la planicie de rendimiento (> E) algunos factores como agua, la interceptación de radiación solar, u otros factores diferentes al nutriente suministrado, lo limitan.

Dado que la magnitud absoluta de la respuesta en el rendimiento se reduce con nutrientes adicionales, tanto PPF como PNB y AE (no mostrado) también disminuyen. Los mayores valores de PPF y PNB son a la menor cantidad de fertilizante, no porque esta sea la más eficiente, sino porque la respuesta relativa es la más alta a dicha cantidad. Si se selecciona únicamente con base en PPF o AE, entonces los mayores valores ocurrirían a cantidades de fertilizante muy bajas, lo que también resultaría en el menor rendimiento. La consecuencia es que la producción se reduciría sustancialmente y cualquier nutriente eliminado vendría de las reservas en el suelo, de manera que PNB sería alto (> 1) y esencialmente insostenible, debido a que se eliminarían más nutrientes del suelo de los que se suministran a través del fertilizante. En esencia, esto

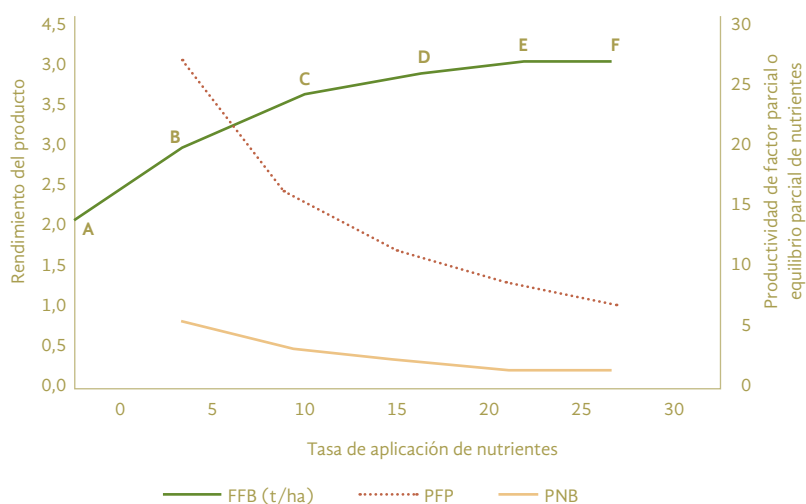
es empobrecimiento del suelo. Entonces, si bien la eficiencia más alta en el rendimiento ocurre cuando los rendimientos son menores, no se debe sacrificar la efectividad por la eficiencia.

El equilibrio parcial de nutrientes también tiene un rango de dimensiones que debe ser considerado. De la Tabla 2, podría deducirse (erróneamente) que solo el 28 % del P aplicado (o el 535 del N o el 33 % del K) se “pierde” en el ambiente, pero el PNB solo consideró la eliminación en el producto. Si bien un PNB > 1 implica un “empobrecimiento” de los nutrientes del suelo, donde las reservas son altas, esto podría ser una manera razonable de explotarlas. Cuando el PNB < 1 se añaden más nutrientes de los que se eliminan, pero el destino de dichos nutrientes no se puede describir con una relación tan simple.

Para la palma de aceite y otros cultivos, los nutrientes también se invierten en elementos estructurales como las frondas, troncos y raíces. Si bien algunos pueden reciclarse mediante el amontonamiento de frondas, los nutrientes del tronco solo se reciclan al final del ciclo de plantación si la biomasa es triturada y devuelta al suelo. Por ejemplo, se reportó que los nutrientes inmovilizados en los troncos de palma eran de 0,22 kg N/palma/y, 0,016 kg P/palma/y 0,47 kg K/palma/y (Lim *et al.*, 2018), de manera que, por ejemplo, a 131 palmas/h, se pueden inmovilizar 28,8 kg N/ha anualmente en los tejidos del tronco, sin reciclarlos hasta la resiembra. A medida que la plantación envejece, la cantidad de nutrientes presentes en este material aumenta, de manera que el cálculo

**Figura 4.** Ejemplo de rendimiento de cultivo e indicadores de rendimiento de equilibrio parcial de nutrientes (kg nutriente eliminado/ kg nutriente aplicado) y productividad de factor parcial (t rendimiento/kg nutriente aplicado) en respuesta a los nutrientes aplicados.

Nota: con base en una concentración de 4 kg por tonelada de producto.



del PNB a lo largo del tiempo debe incluir una consideración de las cantidades almacenadas. También puede ser una estrategia razonable, utilizar la aplicación de nutrientes por encima de la eliminación del producto para construir reservas de nutrientes en el suelo, y esto puede ser particularmente importante en los tropicales muy agotados. Los ensayos en el suelo, junto con los estimados de PNB, proporcionan más confianza al evaluar el destino de los nutrientes en las plantaciones de palma de aceite.

La Tabla 3 presenta un resumen conceptual de cómo se puede considerar e interpretar el PPF y el rendimiento en un conjunto de posibles decisiones de manejo. Tales resultados deben ser discutidos con los administradores de las fincas y validados experimentalmente antes de desarrollar recomendaciones firmes. Relacionar el PNB con los valores de ensayos del suelo también ayuda a guiar las decisiones de manejo de nutrientes.

## Monetizar los NPI

Si bien el uso de fertilizante suele ser visto como una decisión agronómica, para la mayoría de los administradores de plantaciones la cantidad de fertilizante a utilizar es, fundamentalmente, una decisión económica estrechamente relacionada con el precio relativo pagado por el nutriente y el valor recibido por los productos. Esta métrica, llamada nutriente a precio de producto (NOP, Tabla 1), cambia año tras año a medida que los precios de las materias primas y los

ingresos por el producto varían, así como las proporciones relativas de los nutrientes suministrados. En el conjunto de datos considerado a lo largo del tiempo, con base en los precios de materias primas de Index Mundi (ver <https://www.indexmundi.com/commodities/>) para fertilizante y aceite de palma, entre 2014 y 2017 el NOP se encontraba dentro del rango de  $6,32 \pm 1,12$ . De esta manera, durante este periodo se requerían 6,3 kg RFF para pagar 1 kg de fertilizante mixto. Así, si el NOP es muy bajo, las cantidades utilizadas serían más altas que si el costo fuera mayor. Alternativamente, si el valor del producto es muy bajo o el costo del fertilizante es muy alto, habría pocos incentivos para utilizar nutrientes, ya que se obtendrían escasos beneficios, incluso con una inversión pequeña. Sin embargo, si el valor del producto es alto, ya sea en términos comerciales o en seguridad alimentaria, se añadiría más fertilizante para llevar el potencial de rendimiento al máximo. Hasta qué punto se llega, depende de la actitud frente al riesgo y los recursos financieros del productor. La teoría económica tradicional indica que, por lo general, la rentabilidad máxima es de 90-95 % del rendimiento máximo.

Los beneficios por bloque o unidad de manejo también se pueden indexar utilizando la relación de costo y valor (VCR, Tabla 1), ya sea usando AE o PPF, dividido por el NOP de cada nutriente. Derivar el VCR para cada nutriente es difícil debido a la manera en la que se deriva AE, alternativamente se puede considerar utilizar un valor de fertilizante completo (N + P + K) y el PPF para el fertilizante total.

**Tabla 3.** Interpretación conceptual de la relación entre el rendimiento de la palma de aceite y la eficiencia agronómica o la productividad de factor parcial. Los valores altos y bajos pueden ser considerados como relativos a los valores promedio (medios) del conjunto de datos.

		Rendimiento de RFF	
		Por debajo del promedio	Por encima del promedio
Eficiencia agronómica o productividad de factor parcial	Por debajo del promedio	Investigar el suelo u otras limitantes (pH, anegamiento, etc.)	Reducir el uso de fertilizante, ya que aquí el beneficio es relativamente pobre.
	Por encima del promedio	Lo mejor es invertir más en fertilizante.	Es probable que sea bueno invertir más en fertilizante, pero hay que asegurarse que el PNB no indique el empobrecimiento de los nutrientes.

La Figura 5 muestra que el VCR del fertilizante total para los cinco SMG considerados en este conjunto de datos de la plantación, es bastante variable para cada SMG pero que, por lo general, es similar entre grupos de suelos. Esto sugiere que el manejo, y no el grupo de suelos, es importante para lograr altos beneficios sobre la inversión. Nuevamente, se debe tener precaución al considerar la Figura 5, ya que el VCR se confunde con el año y la edad de la palma, de manera que hacer observaciones detalladas sobre la desagregación de estos efectos está por fuera del alcance de este artículo general. Aun así, el beneficio aparente de la inversión en fertilizantes a lo largo de la plantación fue de 8,6, lo cual corresponde a un retorno promedio sobre una inversión en fertilizante de USD 2.780/ha. Este es parcial porque el único costo considerado es el del fertilizante, no otros operativos fijos o variables al interior de la plantación.

## Limitaciones y oportunidades

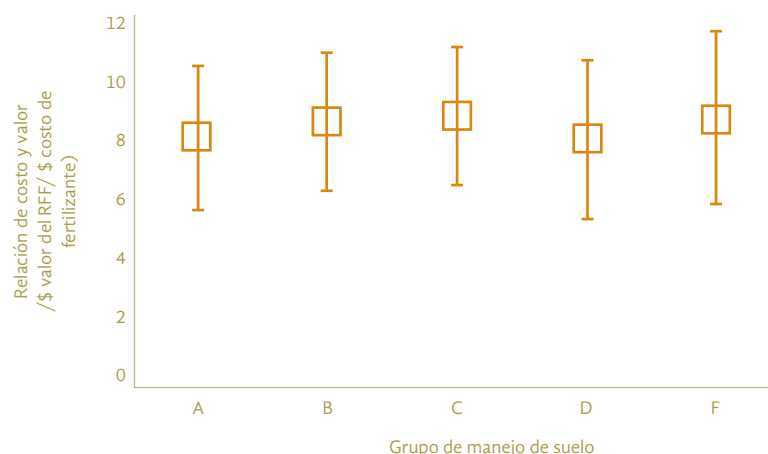
Si bien el desarrollo de puntos de referencia es valioso para hacer comparaciones al interior de las plantaciones y entre grupos de productores de palma de aceite, existen limitaciones importantes en la interpretación de los datos. En primer lugar, el manejo en una plantación comercial reducirá la variación de fondo con grupos de bloques, de manera que las diferencias pueden ser menores de lo que serían sin intervenciones. Una parte significativa de esta limitación es que nunca es probable que haya un bloque con cero nutrientes, pero quizás desarrollar áreas al

interior de bloques que tengan fertilizantes retenidos para ciertos periodos, puede ayudar a calificar la respuesta actual a los nutrientes añadidos, necesaria para evaluar la AE de mejor manera. Adicionalmente, el fertilizante suele ser multinutriente y hay pocos, si es que los hay, de único nutriente mediante experimentos de exclusión de cantidad disponibles para la palma de aceite. La situación es similar para estimar la eficiencia de nutrientes en cultivos perennes, según lo descrito por Srivastava & Malhotra (2017), en su caso, principalmente con frutos cítricos.

También es necesaria una mejor cuantificación de las eliminaciones reales de nutrientes en RFF, así como considerar el papel del rendimiento no tomado sobre los equilibrios de nutrientes y la productividad al interior de bloques particulares. Se ha identificado que un intervalo de cosecha más corto tiene una correlación positiva con el rendimiento (Oberthür *et al.*, 2012b), que a su vez afecta todos los valores de NPI, que están basados en el rendimiento tomado. En los estimados de PNB también es importante considerar otros sumideros y fuentes de nutrientes, como las cantidades y tiempos del ciclo de nutrientes en varios grupos de biomasa de la palma como la fronda, racimos vacíos y troncos, así como los cambios en las reservas del suelo. Si bien los valores de PNB pueden parecer bajos en comparación con los cultivos anuales, es necesario considerar estos grupos en un ciclo de cultivo perenne a largo plazo.

Para los cálculos, se debe tener cuidado con la configuración de los insumos de uso de fertilizante.

**Figura 5.** Relación de costo y valor (VCR) para palmas cultivadas en diferentes grupos de manejo de suelos a lo largo de cuatro años, en una plantación en Borneo. El VCR se calculó como el PPF/NOP y no como el AE/NOP.



En el ejemplo, el uso de nutrientes fue anualizado para el periodo de seis a 30 meses antes de la cosecha, tomando los insumos y productos mensualmente. Considerando que N, P y K tienen diferentes respuestas de cultivos residuales y tiempos de residencia en suelos, también puede ser necesario ajustar la duración entre la aplicación y el rendimiento para tener en cuenta estos factores.

La oportunidad es desarrollar NPI en grandes conjuntos de datos para brindar retroalimentación a los administradores sobre el desempeño de los nutrientes, así como ayudar a una comunidad más amplia a

entender la naturaleza multidimensional de estas evaluaciones. La Figura 6 muestra algunos ejemplos de cómo se pueden presentar dichas evaluaciones, comparando dos fincas al interior de la plantación en un periodo de siete años y con varios NPI. Esto ocurre en una etapa temprana del proceso, pero la automatización del almacenamiento, recuperación y presentación de los datos a través de una base de acceso o una aplicación web, puede considerarse como el producto final del mismo. Los datos se podrían extraer de plantaciones, regiones e incluso países, para construir una evaluación más sustantiva de la efectividad y la eficiencia del uso de nutrientes en la palma de aceite.



**Figura 6.** Ejemplos de indicadores de ejes múltiples para comparar las diferentes dimensiones del rendimiento de nutrientes a lo largo del tiempo para dos fincas en una plantación en Borneo.

## Referencias bibliográficas

- Breure, K. (2003). The search for yield in oil palm: Basic principles. In: Fairhurst, T., & Hardter, R. (Eds.). *Oil palm: Management for large and sustainable yields*. Singapore: PPI/PPIC.
- Cook, S., Lim, C. H., Mohanraj, S. N., Samosir, Y. M. S., Donough, C. R., Oberthür, T., ... & Kam, S.P. (2014). Palm oil at the crossroads: The role of Plantation Intelligence to support change, profit and sustainability. *The Planter*, 90(1061), 563-575.
- Davidson, L. (1993). Management for efficient, cost-effective and productive oil palm plantations. In: *Proc. 1991 PORIM International Palm Oil Conference, Agriculture* (Basiron et al., Eds). Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur.
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency – measurement and management. In: *IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices*. Brussels, Belgium.
- Donough, C. R., Cayho, A., Ruli, W., Fisher, M., & Oberthür, T. (2016). Plant nutrients in palm oil. *Better Crops*, 100(2), 19-22.
- Fixen, P., Brentrup, F., Bruulsema, T., García, F., Norton, R., & Zingore, S. (2015). Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends. In: Drechsel, P., Heffer, P., Magen, H., Mikkelsen, R., & Wichelns, D. (Eds.). *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification*. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA), International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI), and International Potash Institute (IPI).
- Kee, K. K., & Goh, K. J. (2006). Efficient fertilizer management for higher productivity and sustainability in oil palm production. In: *Higher Productivity and Efficient Practices for Sustainable Plantation Agriculture* (Vol.1). Kuala Lumpur: Incorporated Society of Planters.
- Lim, Y. L., Wandri, R., Gerendas, J., Sugianto, H., Donough, C., & Oberthür, T. (2018). *An update on oil palm nutrient budgets*. Poster presented at International Oil Palm Conference, The Santika Premiere Dyandra Hotel & Convention, Medan, Indonesia.
- Mutert, E. (2001). Nutrient management for oil palm. In: *Strategic Directions for the Sustainability of the Oil Palm Industry* (Pushparajah, E., Ed.). Kuala Lumpur: Incorporated Society of Planters.
- Ng, S. K., & Thamboo, S. (1967). Nutrient contents of oil palm in Malaya. I. Nutrients required for reproduction: Fruit bunches and male inflorescences. *The Malaysian Agricultural Journal*, 46, 3-45.
- Ng, S. K., Thamboo, S., & De-Souza, P. (1968). Nutrient contents of oil palm in Malaya. II. Nutrients in vegetative tissues. *The Malaysian Agricultural Journal*, 46, 332-391.
- Norton, R., Davidson, E., & Roberts, T. (2015). *Nitrogen use efficiency and nutrient performance indicators. Task Team report and recommendations. Zero Order Draft for the Global Partnership on Nutrient Management*. New York: United Nations Environmental Program.
- Oberthür, T., Cock, J., Donough, C. R., Rahmadsyah, Abdurrohman, G., Indrasuara, K., Lubis, A., & Dolong, T. (2012a). Best management practices (BMP) in oil palm fertilization for sustainable intensification. *Palmas*, 34(especial Tomo I), 174-202.
- Oberthür, T., Donough, C. R., Indrasuara, K., Dolong, T., & Abdurrohman, G. (2012b). Successful intensification of oil palm plantations with best management practices: Impacts of fresh fruit bunch and oil yield. *Proceedings of the International Planters Conference*. Kuala Lumpur.
- Oberthür, T., Donough, C. R., Cook, S., Sugianto, H., Lim, Y. L., Cook, S., Kam, S. P., & Fisher, M. J. (2017). Plantation Intelligence applied oil palm operations: Unlocking value by analysing commercial data. *The Planter*, 93(1094), 339-351.

- Penning de Vries, F. W. T., Brunsting, A. H. M., & Van Laar, L. H. H. (1974). Products, requirements and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach. *Journal of Theoretical Biology*, 45, 339-377.
- Srivastava, A. K., & Malhotra, S. K. (2017). Nutrient use efficiency in perennial fruit crops. A review. *Journal of Plant Nutrition*, 40(13), 1928-1953.
- Veloo, R., Paimin, S., & Shahrudin, M. R. (2013). Rising cost of plantation business. *The Planter*, 89(1050), 661-672.
- Weih, M. (2014). A calculation tool for analyzing Nitrogen use efficiency in annual and perennial crops. *Agronomy*, 4, 470-477.