

Uso práctico de la eficiencia fisiológica de la palma de aceite con respecto a la recuperación de nutrientes y la eficiencia agronómica en diferentes sitios de Sumatra

Practical Use of Oil Palm Nutrient Physiological Efficiency with Regard to Nutrient Recovery and Agronomic Efficiencies at Different Sumatran Sites



Noto E. Prabowo
Hugh L. Foster
Stephen Nelson
Baihaqi Sitepu

Sumatra Bioscience (SumBio)
PT. PP. London Sumatra
Indonesia Tbk. (Lonsum)
Indonesia
Noto.Prabowo@
sumatrabioscience.com

Paul Nelson
James Cook University, Australia

Palabras CLAVE

Nutrientes de la palma de aceite,
ensayos de campo, materia seca,
eficiencia de recuperación (ER) de
nutrientes, eficiencia fisiológica (EF),
eficiencia agronómica (EA).

Palm nutrient, field trials, dry
matter, nutrient recovery efficiency
(RE), physiological efficiency (PE),
agronomic efficiency (AE).

Traducido por Fedepalma

Versión original en inglés
en el Centro de Información
de Fedepalma

Resumen

La eficiencia del uso de nutrientes de la palma de aceite ha sido investigada desde 1994 en ensayos de campo tanto en el norte como en el sur de Sumatra. Los resultados de siete ensayos de campo en el periodo 1994-2009 se utilizaron para estudiar las absorciones y las eficiencias de los nutrientes aplicados. Los diversos sitios de ensayo permitieron que se investigaran los efectos de diferentes propiedades del suelo y del clima (lluvia) en el rendimiento y producción de materia seca. También se evaluó información adicional de un ensayo de vivero el cual produjo resultados similares a los de los ensayos de campo.

Los resultados mostraron que la eficiencia de recuperación (ER) de nutrientes, definida como la absorción de nutrientes de la palma por unidad de nutriente dado, está sujeta a variaciones en las propiedades del sitio. Sin embargo, los ensayos de campo y en vivero demostraron que la eficiencia fisiológica (EF), o incremento del rendimiento por unidad de absorción de nutrientes de la palma de aceite, a una edad específica, permanece relativamente constante en una serie de ambientes diferentes. El rendimiento aumentado por unidad de un fertilizante dado, conocido como eficiencia agronómica (EA) es únicamente dependiente de la eficiencia de recuperación.



Si se supone que las actuales prácticas de campo diarias han sido establecidas para cumplir con una ER y una productividad óptimas, entonces los agrónomos están capacitados para evaluar la EF de varios materiales de siembra de la palma de aceite para seleccionar lo ideal para diferentes ambientes.

Desde un punto de vista práctico, los agrónomos pueden predecir el rendimiento potencial basado en la producción de materia seca, lo que puede ser de ayuda para determinar el requerimiento de fertilizantes de la palma de aceite. La información de la eficiencia fisiológica también puede ayudar a identificar y evaluar los campos con problemas en las plantaciones de palma de aceite.

Abstract

Oil palm nutrient use efficiency has been investigated in both north and south Sumatra field trials since 1994. The results from seven field trials over 1994-2009 was used to study the uptake and efficiencies of applied nutrients. The different trial sites allowed effects of different soil properties and climate (rainfall) on dry matter production and yield to be investigated. Additional information was also assessed from a nursery trial which produced similar results to the field trial results.

The results showed that the nutrient recovery efficiency (RE) defined as palm nutrient uptake per unit of given nutrient is subject to variation in site properties. However, the field and nursery trial results demonstrated that the physiological efficiency (PE), or yield increment per unit of nutrient uptake of oil palm, at a particular age, remains relatively constant over a range of different environments. The increased yield per unit of given fertilizer known as agronomic efficiency (AE) is therefore solely dependent upon the RE.

Assuming the current daily field practices have been established to meet optimal RE and yield then agronomists are able to assess PE of different oil palm planting materials to select the optimum for different environments.

From a practical point of view agronomists can predict potential yield based on dry matter production which can be helpful in determining the oil palm fertilizer requirement. PE information can also assist to identify and evaluate problem fields in oil palm plantations.



Introducción

En el Sudeste Asiático el costo de los fertilizantes es por lo general el costo directo de plantación más caro y es típicamente un 50-60% del presupuesto anual. Por tanto, es esencial que se obtenga la máxima rentabilidad de esta inversión mediante la optimización de los métodos de recomendación y aplicación

de fertilizantes. Los fertilizantes aplicados a los campos de palma de aceite están sujetos a algunas vías, concretamente, la absorción por las palmas, que se retiene o se pierde en el sistema mediante la volatilización, la erosión o la lixiviación. Se ha observado que en condiciones agronómicas no limitantes en el



campo, cada nutriente individual principal (N, P, K y Mg) tiene un porcentaje diferente de recuperación.

En cuanto la palma absorbe los nutrientes, estos serán utilizados para producir rendimientos adicionales (EF-eficiencia fisiológica). En informes anteriores se indicó que el material vegetal de los cultivos anuales (Epstein y Bloom, 2005) y la edad de las palmas de aceite (Prabowo *et al.*, 2009 y 2010) son responsables de las variaciones en la utilización interna de los nutrientes recuperados para la producción de rendimiento.

Los usos prácticos de la información sobre la eficiencia también podrían ayudar en el manejo diario de campo de la palma de aceite para identificar los problemas de nutrición y manejo. No obstante, las fórmulas se desarrollaron en ambientes de Sumatra y bajo un único material vegetal, por lo que se requiere validación adicional con diferentes condiciones de palma y sitio (Prabowo *et al.*, 2010).

Jacquemard *et al.*, (2002, 2010a y 2010b) estudiaron 489 progenies de palma de aceite y la variación en la concentraciones foliares de nutrientes (%). Encontraron variaciones significativas entre las progenies de diferente origen genético en los niveles críticos de nutrientes. Algunas progenies presentaron menores requerimientos de algunos nutrientes y por tanto existió la posibilidad para seleccionar materiales de siembra de alto rendimiento que se comportaran bien con dosis bajas de fertilizantes.

Baihaqi *et al* (2005) reportaron los resultados de experimentos de progenies en vivero x fertilizantes y concluyeron que se requerían recomendaciones de fertilización para diferentes materiales de siembra así como para las condiciones de ubicación ambientales. Llegaron a la conclusión de que las recomendaciones de fertilización, no solo debían basarse en el ambiente (ubicación) sino que también debían tener en cuenta el origen genético de los materiales de siembra o progenies, especialmente cuando se planta un material de siembra altamente homogéneo (clones o híbridos F_1).

Este trabajo revisa y actualiza la información sobre la eficiencia fisiológica (EF) en palma de aceite, con respecto a las eficiencias de recupe-

ración y agronómica (ER y EA) con base en los resultados de ensayos recientes de campo y de vivero a largo plazo en Sumatra (Indonesia).

Métodos

Ensayos de fertilización NPKMg en palmas de aceite maduras

Para el estudio se utilizaron los resultados de una serie de siete ensayos de campo que probaron diferentes dosis de fertilizantes N, P, K y Mg en palmas maduras en diferentes ambientes de Sumatra. El material de siembra en los ensayos fue Deli x Avros. En la Tabla 1 se presentan los detalles de los tratamientos de cada ensayo. Las características de los sitios (propiedades físicas y químicas y clima) de los ensayos se pueden apreciar en la Tabla 2.

Todos los ensayos fueron diseño factorial con una sola repetición de fertilizante NPKMg. Los ensayos tuvieron parcelas de palmas 5x5 y 8x8 y se instalaron zanjas de 100 cm de profundidad y 50 cm de ancho, que rodearon cada parcela individual. Además, las parcelas incluyeron una hilera doble de palmas como protección para minimizar el efecto de la sustracción de nutrientes (SumBio, 1992). Por tanto, solo se registraron las palmas centrales 3x3 a 4x4, que representaron los verdaderos efectos de los tratamientos dados. Se usaron los datos de diferentes años de registro que proporcionaron resultados en un amplio rango de edades de las palmas (5 a 17 años).

Se determinaron las parcelas con rendimiento óptimo de racimos de fruta fresca (RFF) para cada ensayo. Las combinaciones de fertilizantes que dieron el rendimiento óptimo se consideraron como las mejores dosis de fertilización requeridas para un óptimo crecimiento, estado nutricional y rendimiento de las palmas. Luego se hicieron comparaciones entre las diferentes dosis de nutrientes a niveles no limitantes de los demás nutrientes. Esta comparación es diferente de los métodos que utilizan parcelas sin fertilizar o cero fertilización, donde es probable que hayan ocurrido desbalances y deficiencias de nutrientes. Las condiciones podrían sesgar o inducir a error la verdadera respuesta a un único nutriente observado.

Tabla 1. Materiales de siembra y dosis anuales de tratamientos de fertilización.

Ensayo	Año siembra	Rodales originales palmas ha-1	Dosis fertilizantes (kg palma ⁻¹ año ⁻¹)											
			Urea			SFT o FR*			MOP			Kieserita o S.Dolomita*		
			0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
231	1985	128	0	2	4	0	2	4	0	2,5	5	0	1,5	3
232	1985	128	0	2	4	0	2	4	0	2,5	5	0	1,5	3
275	1985	128	0	2	4	0	2	4	0	2	-	0	2	-
277	1985	128	0	2	4	0	2	4	0	2	-	0	2	-
1403	1996	143	0	2	4	-	2*	4*	0	2	4	0	2*	-
1411	1997	143	0	2	4	-	2*	4*	0	2	4	0	2*	-
1413	1995	143	0	2	4	-	2*	4*	0	2	4	0	2*	-

SFT = superfosfato triple, MOP = muriato de potasio, FR = fosfato de roca.

Las mediciones llevadas a cabo en estos ensayos de campo incluyeron parámetros de crecimiento, tales como la sección transversal del pecíolo (PxS), la producción foliar anual y la altura del tronco, según lo descrito por Breure y Verdooren (1995). Los ensayos de campo aplicaron una estimación no destructiva para el peso seco de la biomasa de los componentes aéreos (hoja, raquis, pecíolo, tronco, racimo e inflorescencia masculina) mediante fórmulas desarrolladas por Prabowo *et al.* (2002) y Prabowo y Foster (2006). Otros registros que se tomaron de los ensayos de campo cubrieron datos de RFF y número de racimos. Todos los componentes de las palmas se muestrearon y analizaron regularmente para obtener información de las concentraciones de macronutrientes (N, P, K y Mg).

Ensayos de vivero

Se analizaron los resultados de dos ensayos factoriales de vivero (Tabla 3) para investigar la eficiencia en el uso de nutrientes en relación con el sitio y el material de siembra. Las plántulas se sembraron y trataron durante once-doce meses. Los objetivos de los ensayos fueron investigar los efectos de las dosis de fertilización, el tipo de medio o sustrato, las

progenies, las tasas de riego y sus interacciones sobre el crecimiento de las plántulas y las eficiencias de los nutrientes.

El ensayo A probó nueve repeticiones x dos dosis de fertilizantes x ocho suelos x dos tasas de riego con un solo tamaño de parcela de palmas. Las dosis de fertilización probadas fueron 0 y 50% de los fertilizantes de vivero estándar dados como simples (urea, superfosfato triple, muriato de potasio y kieserita). Los fertilizantes se pesaron en bolsas pequeñas y se cubrieron con fertilizantes cada semana por medio siguiendo el procedimiento de vivero estándar. Los suelos para el medio se tomaron de los sitios donde los ensayos de campo NPKMg están situados (profundidad del suelo 0-40 cm). Se aplicó riego simulador de lluvia diariamente a dos dosis diferentes, esto es 2000 mm y 4000 por año. Se utilizó una única progenie de palma de aceite. El ensayo se realizó bajo una cubierta plástica para garantizar unas condiciones uniformes de crecimiento y controlar las tasas de la aplicación de agua.

El ensayo B se estableció en un área abierta que probó dos repeticiones x cuatro dosis de fertilización x dos tipos de medio x seis progenies con un tamaño de parcela de cuatro plántulas. Las dosis de fertilización probadas fueron 0, 25, 50 y 100% del programa estándar de fertilización

**Tabla 2.** Características de los sitios de siete ensayos de fertilización NPKMg en Sumatra (1994-2007).

Ensayo No.	Material de siembra DxP	Rodales originales (palmas ha ⁻¹)	Material parental del suelo	0-40 cm Propiedades suelo superficial (sin fertilizantes)										Radiación solar		Contenido humedad suelo (%) anual	Déficit humedad anual (mm)
				MO (%)	pH	Cationes intercambiables (cmol kg ⁻¹)				N Total (%)	P disponible Bray-II (ppm)	K extr. ácido caliente (cmol kg ⁻¹)	Pendiente (%)	(Kwh m ⁻² día ⁻¹)			
						Ca	Mg	K	Al+H						Total		
231	Deli x AVROS 1	128	Rhyolite	5,24	4,63	0,84	0,11	0,10	1,29	2,34	0,25	2,2	0,97	0-3	4,4	97,2	0
232	Deli x AVROS 1	128	Sandstone	3,53	4,52	0,56	0,12	0,08	1,73	2,49	0,16	7,1	0,12	>40	5,2	63,8	34
275	Deli x AVROS 1	128	Rhyolite	3,33	4,88	1,34	0,23	0,11	0,97	2,65	0,19	2,9	4,24	0-3	4,5	14,3	320
277	Deli x AVROS 1	128	Rhyolite	3,29	4,98	2,12	0,42	0,25	0,65	3,49	0,21	2,6	4,61	0-3	5,1	42,6	188
1403	Deli x AVROS 1	143	Dacite/ claystone	3,56	4,54	1,41	0,52	0,11	4,13	6,17	0,25	4,67	1,34	0-3	4,6	91,0	1
1411	Deli x AVROS 2	143	Dacite/ claystone	2,58	4,36	0,46	0,40	0,11	1,86	2,83	0,20	2,58	0,26	0-3	4,6	92,3	0
1413	Deli x AVROS 2	143	Dacite/ claystone	4,24	4,41	0,42	0,07	0,06	1,97	2,52	0,24	13,17	0,32	0-3	4,6	92,3	21

Tabla 3 Descripción de los tratamientos de los ensayos A y B.

% estándar	Nutriente (g plántula ⁻¹)				Riego (mm a ⁻¹)	Suelo
	N	P	K	Mg		
0%	0	0	0	0	2000	231
50%	30	13	25	5	4000	232
						275
						277
						1403
						1411
						1412
						1413

Ensayo A

% estándar	Nutriente (g plántula ⁻¹)				Medio	Progenie
	N	P	K	Mg		
0%	0	0	0	0	Turba	P1
25%	15	7	12	3	Suelo	P2
50%	30	13	25	5		P3
100%	59	26	50	11		P4
						P5
						P6

Ensayo B

Nota: las dosis de nutrientes son acumulativas a 52 semanas después de la siembra de las semillas.

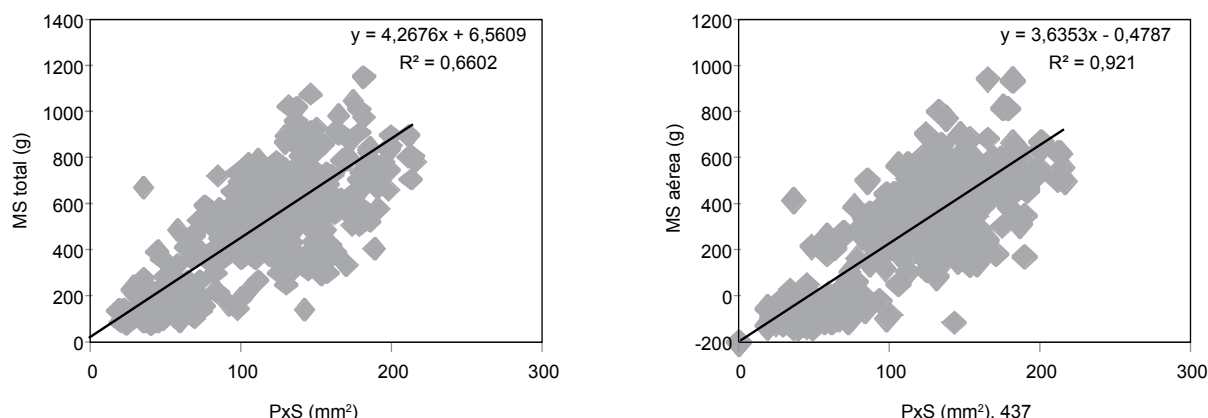


Figura 1. Predicción de materia seca (MS) de las plántulas (componentes totales y aéreos) a partir de la sección transversal del pecíolo (PxS) en etapa de vivero (n=480).

de viveros de Lonsum, que se aplicaron como simples (urea, superfosfato triple, muriato de potasio y kieserita). El verdadero efecto de un solo nutriente (por ejemplo, N) no se pudo separar de los efectos de los demás nutrientes (P, K y Mg), porque cada nivel de fertilización contenía todos los nutrientes. El método y momento de aplicación fueron similares a los del ensayo A. Se hizo una comparación de los efectos del suelo superficial normal y la turba virgen (etapa fibrica) como sustrato en el crecimiento y nutrición de las palmas. Se compararon seis progenies de palma de aceite de diverso origen genético.

Los registros de los ensayos incluyeron las mediciones de crecimiento y un muestreo destructivo al final de la etapa de vivero para el análisis de la biomasa seca y de nutrientes. Los parámetros de crecimiento fueron la sección transversal del pecíolo (PxS), la altura, el número de hojas y el diámetro del tronco. La biomasa de las plántulas se separó en diferentes componentes, a saber, hoja, raquis, tronco y raíces. Estos se secaron al horno y se pesaron para determinar la masa seca.

El análisis de laboratorio cubrió las concentraciones de N, P y Mg. El peso de cada nutriente se obtuvo de la multiplicación de la masa seca y la concentración de nutrientes (%). Se realizó una estimación para la masa seca foliar a partir del PxS para el ensayo B ya que algunas progenies tenían valores faltantes para la masa seca. La predicción se correlacionó significativamente con los valores de R^2 que oscilaron entre 66% y 71% (Figura 3). En este ensayo,

se utilizaron la masa seca foliar y las concentraciones de nutrientes en las hojas y el raquis para el cálculo de la ER, EF y EA (Figura 1). Las fórmulas para los índices de eficiencia se definen a continuación (Fairhurst, 1999; Hardter y Fairhurst, 2003; Ciampitti y Vyn, 2012):

$$ER = \Delta \text{absorción de nutriente} / \Delta \text{nutriente aplicado}$$

$$EF = \Delta \text{rendimiento} / \Delta \text{absorción de nutriente}$$

$$EA = \Delta \text{rendimiento} / \text{nutriente aplicado} = ER \times EF$$

$$EI = \text{eficiencia interna} = \text{rendimiento} / \text{absorción de nutriente}$$

El incremento (Δ) se obtuvo como una diferencia del rendimiento o de los parámetros de nutrientes de diferentes dosis de fertilización. Los ensayos de fertilización NPKMg en palmas de aceite maduras utilizaron datos de los racimos de fruta fresca (RFF) como rendimiento. No obstante, en los ensayos de vivero se utilizó la masa seca para estimar las eficiencias de los nutrientes en lugar del rendimiento. Los datos se analizaron estadísticamente mediante un diseño de bloques completos al azar.

Resultados

Ensayos de fertilización NPKMg en palmas de aceite maduras

La Tabla 4 muestra la cantidad de nutrientes aplicados anualmente, la absorción total (en hoja, tronco, racimo e inflorescencia masculina) y el rendimiento de RFF a diferentes

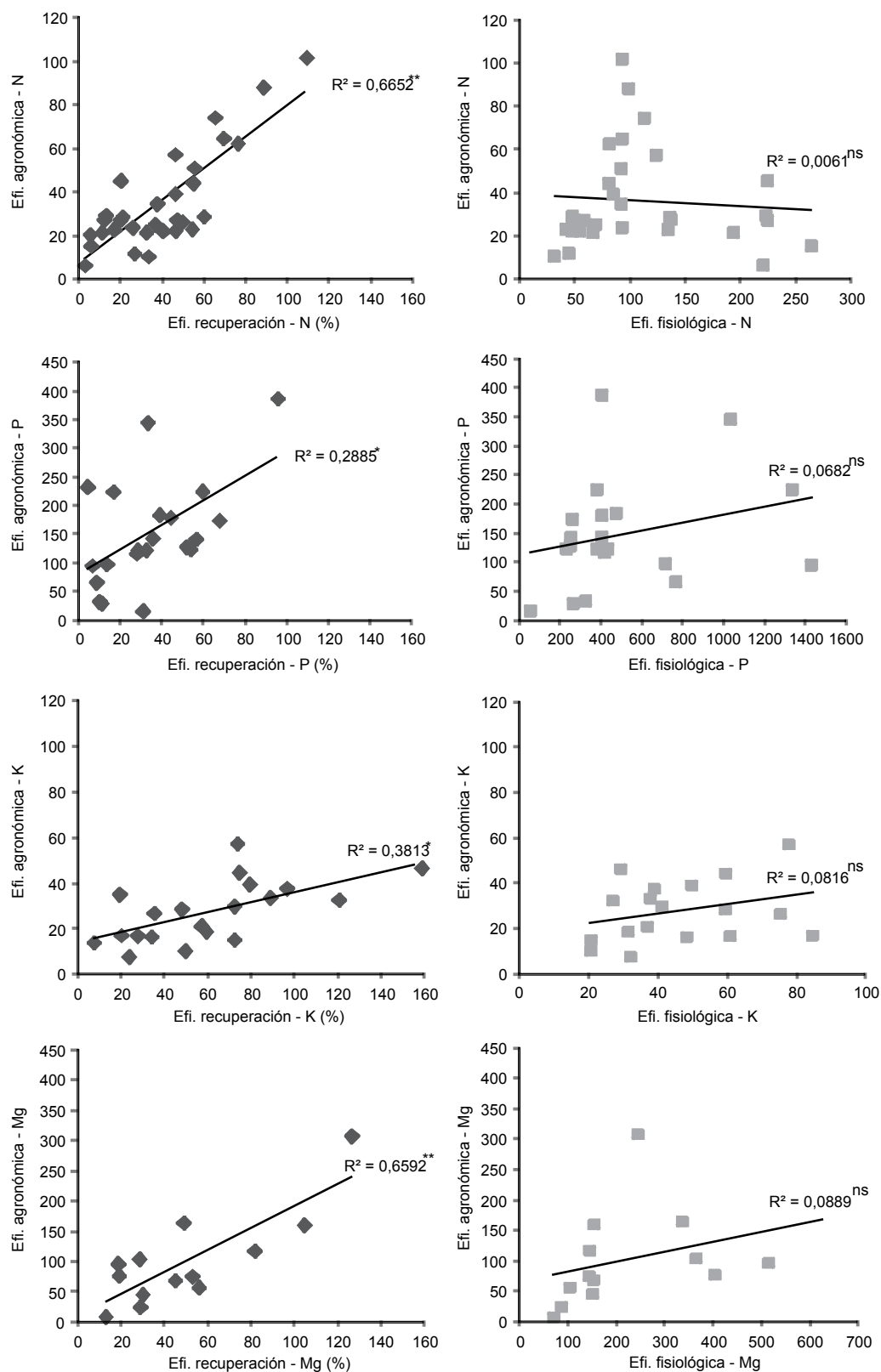


Figura 2. Relaciones entre las eficiencias de recuperación, fisiológicas y agronómicas (ER, EF y EA) de diferentes nutrientes en los ensayos NPKMg en palmas de aceite maduras.

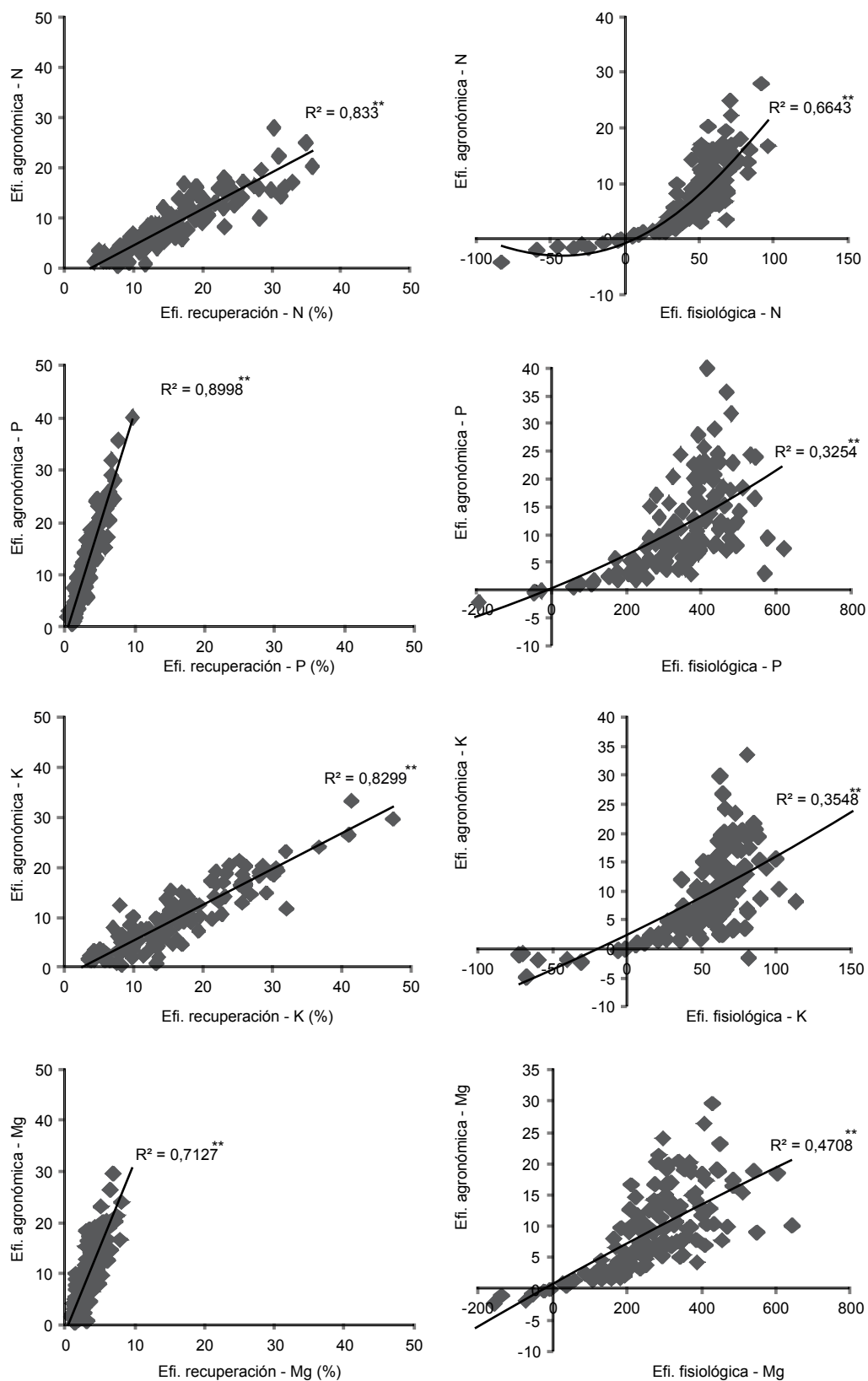


Figura 3. Relaciones entre las eficiencias de recuperación, fisiológicas y agronómicas (ER, EF y EA) en el ensayo de vivero de palma de aceite (ensayo A).



Tabla 4. Aplicación de nutrientes, absorción y rendimiento de Rff a niveles óptimos de otros nutrientes en siete ensayos NPKMg en Sumatra. (Adaptado de Tohiruddin, Prabowo y Foster, 2007). *El nivel de tratamiento está en el orden de los fertilizantes N, P, K y Mg.

Ensayo	Tratamiento*	N (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)		P (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)		K (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)		RFF (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	Tratamiento*	Mg (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)		RFF (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	Tratamiento*	Absorción		RFF (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
		Aplicado	Absorción	Aplicado	Absorción	Aplicado	Absorción			Aplicado	Absorción			Aplicado	Absorción	
231	0222	0	332	32.120	0022	0	25	25.080	0202	0	141	20.240	0220	0	15	19.850
	1222	96	336	31.090	0122	43	47	28.860	0212	134	338	27.500	0221	28	47	27.910
	2222	193	307	29.320	0222	86	59	32.120	0222	266	432	32.120	0222	55	75	32.120
232	0122	0	258	19.890	2022	0	25	23.860	2102	0	126	17.310	2120	0	24	19.780
	1122	113	324	24.110	2122	50	38	27.010	2112	156	279	23.620	2121	33	50	24.810
	2122	225	361	27.010	2222	100	45	27.400	2122	311	373	27.010	2122	64	61	27.010
275	0110	0	221	18.690	2010	0	25	22.640	2101	0	287	26.980	2110	0	36	28.390
	1110	96	324	26.220	2110	43	44	28.390	2111	107	336	28.390	2111	36	54	25.190
	2110	193	373	28.390	2210	86	49	28.850								
277	0210	0	472	28.250	1010	0	40	28.110	1200	0	436	29.680	1210	0	52	31.290
	1210	108	470	31.290	1110	48	52	30.430	1210	120	526	31.290	1211	41	62	29.230
	2210	216	437	29.380	1210	96	62	31.290								
1403	0120	0	152	29.150					2100	0	195	26.160	2120	0	51	37.320
	1120	128	291	37.320	2120	37	43	37.320	2110	142	419	32.640	2121	34	51	26.640
	2120	256	381	26.750	2220	74	53	36.460	2120	283	545	37.320				
1411	0220	0	268	31.140					2200	0	255	24.150	2220	0	38	32.660
	1220	127	316	32.660	2120	37	28	29.290	2210	141	360	30.360	2221	34	44	28.180
	2220	254	350	25.480	2220	73	35	32.660	2220	281	407	32.660				
1412	0220	0	315	28.200					2200	0	315	28.360	2220	0	37	30.160
	1220	129	356	30.160	2120	37	40	30.030	2210	143	386	28.060	2221	34	46	26.220
	2220	257	365	29.150	2220	74	39	30.160	2220	285	196	30.160				

niveles de fertilización en cada ensayo. Los niveles más altos de fertilizantes no son necesariamente las mejores combinaciones en términos de maximizar el rendimiento. La absorción de nutrientes varió entre los sitios del ensayo. Hubo grandes variaciones en la absorción de nutrientes para K y Mg donde la máxima absorción fue cuatro a cinco veces mayor, respectivamente, que los valores mínimos de absorción.

La ER de la palma de aceite en Sumatra osciló entre 14 y 147% para el primer kg palma⁻¹ de nutriente fertilizante adicionado, que dependió de las fuentes de los nutrientes y las propiedades del sitio. La EF osciló entre 24 y 503 kg RFF kg⁻¹ absorción de nutriente, Las EF de P y Mg fueron mayores que las de N y K a pesar de la menor ER. La EA calculada osciló entre 12 y 262 kg RFF kg⁻¹ de nutriente aplicado (Tabla 5).

La ER de todos los nutrientes normalmente disminuyó con los incrementos adicionales de fertilizante debido a una menor absorción de nutrientes a un nivel de fertilización cercano al rendimiento óptimo. No obstante, la tendencia no aplicó para la EF. A pesar de la menor absorción de P y Mg, las EF fueron mayores que el N y el K. Las relaciones entre la ER, la EF y la EA se presentan en la Figura 2. Los gráficos muestran que la EA aumentó con el incremento del %ER. Mientras tanto, la EA no varió con la EF.

Ensayos de vivero

Ensayo A (fertilizante x medio x riego)

Los valores de ER, EF y EA para este ensayo de vivero se estimaron a partir de la estimación de la masa seca total (Tabla 6). Similar a la tendencia en los ensayos de palmas de aceite

Tabla 5. Eficiencias de recuperación, fisiológica y agronómica (ER, EF y EA) en las combinaciones óptimas de fertilizantes.

Ensayo	Incremento fertilizante	N			P			K			Mg		
		%ER	EF	EA	%ER	EF	EA	%ER	EF	EA	%ER	EF	EA
231	1				53	168	88	147	37	54	66	422	193
232		27	149	32	39	360	132	77	38	29	53	282	129
275		55	65	36	74	346	262	85	24	21	53	143	76
277		62	68	43	52	295	148						
1403		88	102	88				104	52	48	45	153	42
1411		20	157	21				51	60	31	21		
1413		36	109	41				14		24	56	103	37
231	2				28	277	76	71	49	35	53	112	85
232		16	156	24	19	343	48	60	31	19	26	251	56
275		21	69	23	33	377	123						
277		46	48	22	16	503	72						
1403		58	76	49	25			58	57	30			
1411		45	45	12	17			27	66	17			
1413		30	140	34	17			24	32	6			



Tabla 6. Eficiencias de los nutrientes de las plántulas de palma de aceite (una sola progenie) cultivadas en diferentes suelos en el vivero con agua no limitante (equivalente a precipitación anual de 4000 mm).

Suelo	ER (%)				EF				EA			
	N	P	K	Mg	N	P	K	Mg	N	P	K	Mg
231	44	7	33	19	63	387	76	299	28	28	25	56
232	42	7	40	19	63	371	62	288	27	27	25	55
275	40	6	29	18	55	330	69	238	22	21	20	44
277	42	6	28	18	54	386	75	259	23	23	21	47
1403	42	6	35	12	58	394	64	398	24	24	22	49
1411	43	6	43	18	68	458	62	325	29	29	27	59
1412	48	7	43	15	60	422	61	392	29	28	26	58

Tabla 7. Significado del efecto de la precipitación en la eficiencia fisiológica (EF) de los principales nutrientes en sitios individuales del ensayo.

Suelo	N	P	K	Mg	Suelo	N	P	K	Mg
231	0,0344	0,7343	0,2333	0,0524	231	*	ns	ns	ns
232	0,0010	0,0000	0,0000	0,0014	232	**	**	**	**
275	0,0687	0,2833	0,0511	0,0759	275	ns	ns	ns	ns
277	0,0121	0,4057	0,0141	0,1509	277	*	ns	*	ns
1403	0,0283	0,0648	0,0080	0,1963	1403	*	ns	*	ns
1411	0,0388	0,3132	0,0998	0,1427	1411	*	ns	ns	ns
1412	0,0514	0,1477	0,3846	0,0254	1412	ns	ns	ns	*

ns=no significativo; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

maduras (Prabowo *et al.*, 2002), las ER de los nutrientes fueron más altas para N y K en relación con las de P y Mg. Por el contrario, las EF de los dos últimos nutrientes fueron mayores debido principalmente al pequeño incremento en la absorción de P y Mg entre los niveles de fertilización (0 y 50% del fertilizante de vivero estándar). Las EA en función de las EF y ER fueron similares para cada nutriente individual debido a que las plántulas eran de una sola progenie.

En este ensayo, se analizó el efecto del índice de precipitación (2000 y 4000 mm) para determinar las eficiencias de los nutrientes de cada suelo individual. Como se mencionó anteriormente, este factor de sitio fue altamente significativo ($P < 0,05$) para la absorción de

nutrientes de las plántulas, la ER y la EA. No obstante, la EF para P, K y Mg en los diferentes sitios en general permaneció estadísticamente no significativa ($P > 0,05$) como lo indican los valores de P en la Tabla 7.

Las relaciones entre los tres componentes de la eficiencia se ilustran en la Figura 3. Es obvio que la variación en la EA se debió principalmente a la ER y en menor grado, a la EF. Las tendencias de la EF en el resultado de este ensayo de vivero fueron diferentes a las del resultado del ensayo NPKMg, probablemente debido a dos razones principales. En primer lugar, las eficiencias del ensayo de vivero se basaron en la masa seca total (MST) en lugar del rendimiento. En segundo lugar, el cálculo de la eficiencia de nutrientes para el ensayo de

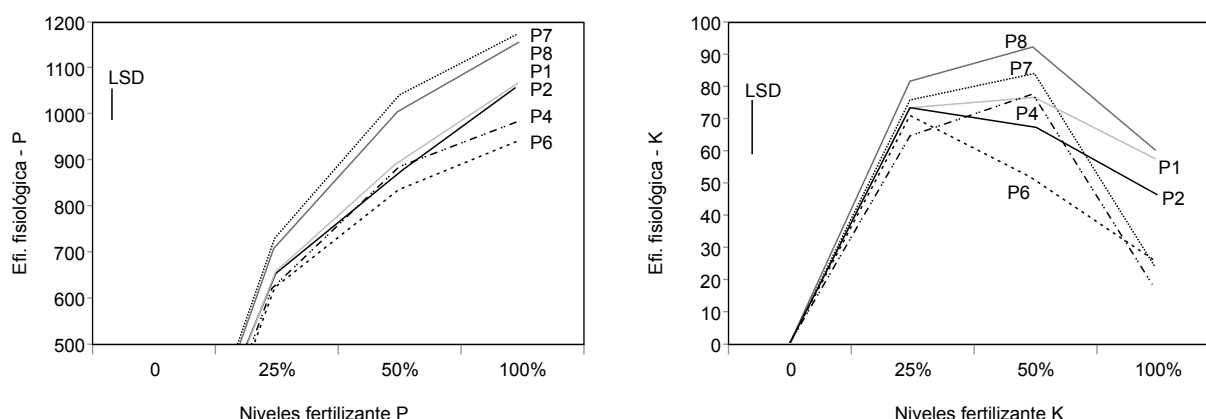


Figura 4. Efectos de la interacción Progenie x Fertilizante en las eficiencias fisiológicas de P y K.

vivero utilizó datos de los niveles de precipitación y fertilización promedio mientras que los ensayos de campo calcularon las eficiencias a partir de las mejores combinaciones de fertilizantes solamente.

Ensayo B (fertilizante x medio x progenie)

Se calcularon las eficiencias de nutrientes de P y K en el componente foliar. Similar a los resultados del ensayo A, como se esperaba, hubo unos efectos enormes del tipo de medio y los fertilizantes sobre la absorción de nutrientes, la ER, la EF y la EA.

Las seis progenies observadas interactuaron y mostraron una clara agrupación con los fertilizantes aplicados (Figura 4). Las progenies 7 y 8 se destacaron estadísticamente por una alta eficiencia fisiológica de P (EFP), mientras que las progenies 4 y 6 tuvieron bajas EFP. Por tanto, dos grupos de progenies se formaron con las progenies 1 y 2 entre las cuatro progenies. La agrupación de las progenies basada en la eficiencia fisiológica de K (EFK) fue ligeramente diferente. Esta agrupación también aplicó cuando los diferentes medios (suelo y turba) se separaron; en cuanto al K, los tres factores interactuaron significativamente. Las variaciones en la ER y la EF también fueron obvias entre las progenies. Las progenies con alta ER no necesariamente presentaron una EF alta (Tabla 8). En los ensayos de fertilización, la variación en los índices de eficiencia de los nutrientes puede proporcionar un medio para

identificar los problemas actuales en el campo (por ejemplo, baja EF debido a un material de siembra de mala calidad: baja ER como resultado de la pérdida de nutrientes) (Hardter and Fairhurst, 2003).

Discusión

Eficiencia de uso de los nutrientes en palma de aceite

Como lo reportaron previamente Tohiruddin *et al.* (2007), las comparaciones de los rendimientos de RFF de las mejores combinaciones de fertilizantes con los fertilizantes cero (0000) indicaron que todos los ensayos tuvieron respuestas diferentes a los nutrientes aplicados. El único sitio que no tuvo respuesta al fertilizante N fue el ensayo 231 en suelo riolítico con precipitaciones muy altas, que se asoció con el alto suministro de N inherente del suelo.

Las respuestas al fertilizante P fueron significativas en todos los sitios de ensayo. Como las reservas de K del suelo varían entre los sitios, las respuestas al fertilizante K también varían considerablemente. Los ensayos 275 y 277 en suelos riolíticos mostraron las menores respuestas al fertilizante K debido principalmente a la propiedad mineral de la arcilla illítica, que da lugar a un suministro alto de K del suelo. Los ensayos restantes en suelos con propiedades caoliniticas con bajo suministro de K, requirieron altas dosis de fertilizante K para lograr rendimientos óptimos. La respuesta más alta al K se observó



Tabla 8. Efectos de la interacción Progenie x Fertilizante en la eficiencia de recuperación y fisiológica de P (ERP, EFP) y de K (ERK, EFK). a) Efectos de la interacción Progenie*Fertilizante en la ERP (izquierda) y la EFP (derecha). b) Efectos de la interacción Progenie*Fertilizante en la ERK (izquierda) y la EFK (derecha).

a) Progenie	Incremento fertilizante		
	F1-F0	F2-F1	F3-F2
	Eficiencia de recuperación - P (%)		
P1	3,79	1,90	1,68
P2	4,38	1,59	1,72
P4	4,39	2,18	1,80
P6	4,92	1,73	1,78
P7	4,32	1,97	1,43
P8	4,73	1,60	1,49
LSD	0,65		

Progenie	Incremento fertilizante		
	F1-F0	F2-F1	F3-F2
	Eficiencia fisiológica - P		
P1	650	244	175
P2	648	221	195
P4	622	259	102
P6	627	207	108
P7	723	313	135
P8	712	287	159
LSD	67		

b) Progenie	Incremento fertilizante		
	F1-F0	F2-F1	F3-F2
	Eficiencia de recuperación - K (%)		
P1	30,4	10,7	5,0
P2	34,8	8,8	5,4
P4	38,8	11,9	4,9
P6	39,1	8,2	4,7
P7	37,8	16,8	4,4
P8	37,5	14,6	5,9
LSD	4,2		

Progenie	Incremento fertilizante		
	F1-F0	F2-F1	F3-F2
	Eficiencia fisiológica - K		
P1	74	3	-19
P2	73	-5	-21
P4	65	13	-60
P6	72	-21	-25
P7	76	8	-60
P8	82	10	-31
LSD	18		

LSD (minima diferencia significativa).

Nota: F1-F0 = diferencia en ER y EF entre los niveles de tratamiento de fertilización 0 y 1.

en el área de arenisca del ensayo 232 con topografía inclinada. Además, este ensayo y el ensayo 231 demostraron respuestas significativas al fertilizante Mg debido al lento suministro de Mg del suelo asociado con el material parental y altas precipitaciones, respectivamente.

La eficiencia de recuperación de los nutrientes fertilizantes disminuyó en la medida en que el rendimiento de RFF aumentó. En forma consistente, las ER de N y K fueron más altas

que las de P y Mg. La ER estuvo altamente influenciada por las limitaciones en las propiedades del sitio.

Las prácticas de campo diarias y el manejo de nutrientes, tales como la colocación de fertilizantes (Sweeney, 1997), los tipos de fertilizantes (Prabowo *et al.*, 2002) o el momento-época de aplicación (Goh, Hardter y Fairhurst 2003; Dobermann *et al.*, 2004), también contribuyeron a las variaciones en la ER.

Wortmann *et al.* (2011) encontraron diferencias significativas en la ER debido a diferentes rotaciones en el manejo de los cultivos, tales como maíz seguido de soya y maíz continuo. Por el contrario, la EF de un único material de palma de aceite a cierta edad usado en los ensayos de palma de aceite fue relativamente estable (Tohiruddin, Prabowo y Foster, 2007). Por tanto, cualquier variación en la EA para todos los nutrientes fue principalmente el resultado de los diversos valores de la ER.

Dobermann *et al.* (2004), al comparar la productividad del arroz en siete países asiáticos, encontraron diferencias considerables entre el manejo de nutrientes por sitio específico (MNSE) y las parcelas con las prácticas de fertilización de los agricultores (PFA). Las parcelas MNSE produjeron rendimiento de grano de arroz un 7% más alto en comparación con las parcelas de los agricultores. Las parcelas bien manejadas tuvieron un 39% de EAN mayor que se correlacionó con el 41% más alto de ERN en relación con las parcelas tradicionales de los agricultores. No se encontró una diferencia significativa (-4%) en la eficiencia interna de N (EIN) entre las parcelas comparadas que sugirió la EF relativamente estable de las variedades cultivadas durante el período (1997-1999). Los cultivadores prácticos podrían, por lo tanto, estar más interesados en manejar los índices de EA y ER a través de sus estrategias de manejo de nutrientes y del cultivo.

Ensayos de vivero

El uso de la MST, o masa seca aérea, de las plántulas de palma de aceite en vivero, produjeron eficiencias de nutrientes similares a las de los ensayos de fertilización en el campo (Tabla 9).

Tabla 9. Comparación de los valores de eficiencia fisiológica (EF) de los principales nutrientes entre palmas de aceite maduras y de vivero.

Ensayo	EFN	EFP	EFK	EFMg
Campo	95	334	66	201
Vivero	58	379	67	309

Los resultados de los ensayos de vivero han indicado que una sola progenie tuvo EF relativamente estable con condiciones ambientales no extremas. En condiciones muy diferentes de tipo de medio o sustrato (por ejemplo, comparación de turba frente a capa superficial del suelo), hubo una variación muy significativa en la EF. Los resultados también mostraron que el principal efecto de los fertilizantes afectó profundamente la EF de K (EFK). No obstante, en este caso concreto, ocurrieron interacciones entre los tratamientos (fertilizante, progenie y tipo de medio) y las interacciones indujeron a error al principal efecto de los fertilizantes en la EFK.

Fairhurst (1999) sugirió que factores como la sequía, las interacciones de los nutrientes o las plagas y enfermedades también podrían afectar la EF. Por otra parte, la ER normalmente varió y dependió de los factores agronómicos, como la fertilización y el manejo en el campo. A su vez, la variación en la ER resulta significativamente en una variación en la EA. Los resultados de los ensayos de vivero confirman enérgicamente los hallazgos anteriores sobre la eficiencia de los nutrientes en ensayos de palma de aceite madura en campo (Tohiruddin, Prabowo y Foster, 2007).

Dos progenies probadas en el ensayo de vivero B tuvieron valores más altos de EF para fósforo que las otras cuatro progenies. Este resultado sugiere que puede existir la posibilidad de seleccionar materiales de siembra que puedan producir más materia seca (o rendimiento) en respuesta a los nutrientes y particularmente al fósforo. Ciampitti y Vyn (2012) compararon los rendimientos de genotipos de maíz cultivados en diferentes países en dos periodos diferentes, esto es, 1940-1990 y 1991-2011. El rendimiento aumentó de 7,2 t ha⁻¹ (periodo viejo) a 9,0 t ha⁻¹ (periodo nuevo) debido al mayor potencial de rendimiento de grano y a la eficiencia interna del N (rendimiento de grano/absorción de N) por unidad. Se consideró realista incrementar simultáneamente la ER de N y la EF de N global del maíz. No obstante, se reconoció que la ER de N y el proceso de la eficiencia de la removilización del N para lograr el mejoramiento del rendimiento es una estrategia difícil.



Uso de la información relacionada con la EF

Identificación y evaluación de las problemáticas

Los resultados de estos ensayos de fertilización en el campo mostraron que las correlaciones entre el rendimiento de RFF y la concentración de nutrientes en los tejidos de las palmas (hoja, raquis) fueron en general bajas. No obstante, la predicción del rendimiento de RFF se pudo hacer satisfactoriamente a partir de los pesos de los nutrientes foliares.

Los datos recopilados de las plantaciones durante el muestreo anual de los tejidos foliares y del raquis de las unidades de muestreo foliar (UMF) normalmente incluyen algunos datos de crecimiento de las palmas, como la sección transversal del pecíolo (PxS) además de las concentración foliar de nutrientes y la concentración en el raquis.

A partir de una serie de ensayos de campo con fertilizantes NPMKMg en Sumatra, Prabowo *et al.* (2009 y 2010) demostraron que los datos disponibles podrían utilizarse para estimar los pesos de los principales nutrientes en los diferentes componentes de la hoja. El método no requirió de información adicional del sitio, como la precipitación, la humedad del suelo y la radiación solar, para las predicciones del rendimiento (los valores de R^2 fueron 82, 83, 73 y 67% para N, P, K and Mg, respectivamente).

Los datos requeridos representaron parámetros importantes de las palmas que originalmente estuvieron influenciados por una combinación de factores del sitio. La PxS representó una condición del periodo vegetativo de las palmas. Las concentraciones foliares de nutrientes deberían describir el último estado nutricional (satisfactorio, deficiente, excesivo) del campo. Se requiere la edad de las palmas en las ecuaciones para indicar la fisiología actual de las palmas en el uso de los recursos de nutrientes disponibles. Finalmente, los datos de rendimiento de RFF fueron resultado de las propiedades internas y externas de las palmas que están relacionadas con la EF, ya que de-

penden de los pesos de los nutrientes foliares y de la edad y crecimiento de las palmas.

Los rendimientos de RFF en los campos de las plantaciones comerciales de palma de aceite por lo general varían con el suministro de nutrientes y las prácticas diarias de manejo del campo. Los rendimientos reales se pueden clasificar en muy buenos, buenos y bajos. La identificación de ciertos campos de bajo rendimiento entre un gran número de campos comerciales puede determinarse mediante las ecuaciones de predicción del rendimiento. Los rendimientos se predijeron sobre la base del estado del N, P, K y Mg. El rendimiento predicho más bajo se considera el rendimiento “esperado” debido a que el nutriente más limitante es el que determina que el rendimiento sea bajo.

Los datos del rendimiento luego se grafican en una línea 1:1 (Figura 5 como ejemplo). Los puntos de rendimiento por debajo de la línea 1:1 son problemáticos. El rendimiento promedio de la plantación (por ejemplo, 25 t ha⁻¹) se muestra en la Figura 4 para hacer una distinción más clara entre los campos con rendimientos de RFF bajos y altos, predichos y reales. El campo se clasifica como Grupo A (problema de nutrición) si el rendimiento es menor que el promedio.

El siguiente paso es la evaluación de campo para verificar si el estado bajo de nutrientes se debió a: suministro insuficiente de nutrientes, desbalance de nutrientes, errores en las dosis de fertilización, el método y el momento de aplicación del fertilizante. Las limitaciones inherentes al sitio, tales como la topografía inclinada, el mal drenaje del suelo, los suelos arenosos y la muy baja/alta precipitación pueden contribuir considerablemente al bajo rendimiento.

Si el rendimiento real está entre el rendimiento promedio y el esperado, entonces es probable que esté ocurriendo un problema de manejo de campo (cosecha incompleta-evacuación de racimos, mal estado de las vías en el campo-transporte, seguridad de los racimos, supervisión de campo, etcétera) (Grupo B). El alto rendimiento esperado sugiere que los campos –según lo indican el crecimiento

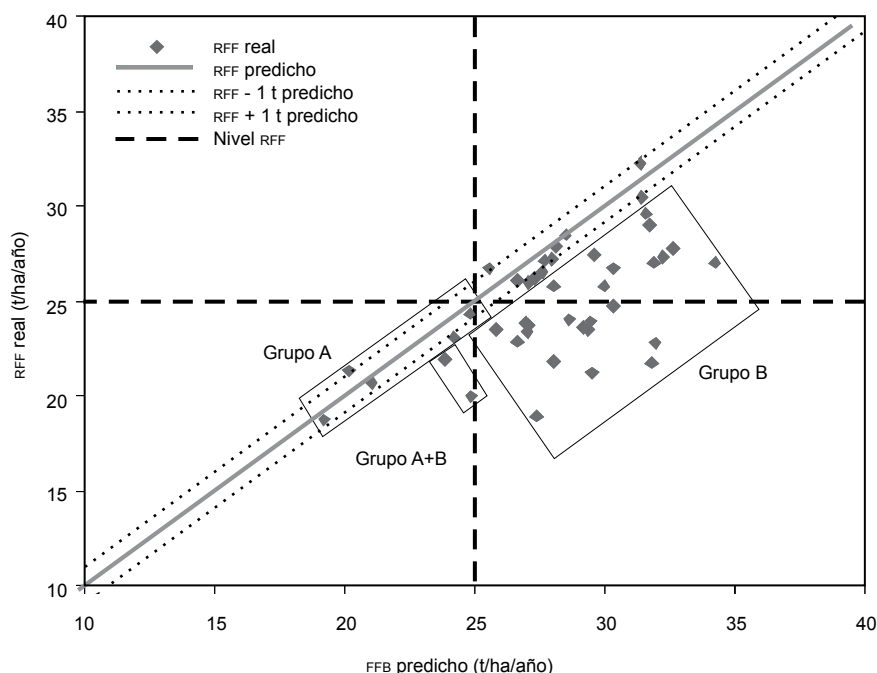


Figura 5. Implementación de las ecuaciones de predicción en campos comerciales de palma de aceite (Adaptado de Prabowo *et al.*, 2010).

de la palma y el estado nutricional actual—, no tienen problemas nutricionales. Las posibles explicaciones de por qué estos campos no están alcanzando su potencial de rendimiento, podrían deberse a una cosecha pobre, la evacuación de la cosecha del campo o la pérdida de la cosecha entre el campo y la planta de beneficio.

Recomendación de fertilización

Predicciones utilizadas para determinar las dosis recomendadas de fertilizantes

La recomendación de fertilización para palma de aceite usualmente depende del diagnóstico foliar como herramienta para determinar si un campo está en determinado nivel nutricional (excesivo, satisfactorio, deficiente). La herramienta se derivó de los ensayos de campo con fertilizantes NPMKMg que produjeron una relación de respuesta en rendimiento (a un nutriente individual) y niveles foliares de nutrientes (%).

La estimación de las dosis requeridas de fertilizante para corregir el estado actual nu-

tricional del campo también utiliza esta herramienta (Goh, 2011). No obstante, una determinación más precisa del requerimiento de nutrientes de las palmas debe, de manera realista, tener en cuenta los factores que rodean el sitio (propiedades físicas-químicas del suelo, palma y clima).

Sumatra Bioscience desarrolló un sistema de predicción de la eficiencia de la respuesta en rendimiento para incluir los factores del sitio en su sistema de recomendación de fertilización. El objetivo de esta predicción de la respuesta en rendimiento es determinar la cantidad que se requiere de cada fertilizante para corregir el estado actual nutricional que es determinado por el diagnóstico foliar a partir de las propiedades del sitio. El último paso es un análisis económico que tiene en cuenta un análisis de costo-beneficio y la determinación del rendimiento más rentable para definir (Tohiruddin *et al.*, 2010).

A continuación de las ecuaciones relacionadas con la EF (Prabowo *et al.*, 2009 y 2010), es probable que se puedan acortar los pasos del diagnóstico foliar y de la predicción de la



eficiencia de respuesta durante un proceso de recomendación de fertilización. Es evidente que las últimas ecuaciones utilizan información múltiple que debería ser más representativa para el estado actual de las palmas. Además de la concentración foliar de nutrientes (que genera principalmente el sistema de diagnóstico foliar), las ecuaciones de EF también dependen del crecimiento de la palma (PxS), la edad y el material. Con la intervención de más fuentes de datos pertinentes, las ecuaciones deberían poder mejorar la precisión de la recomendación.

Aplicaciones de las ecuaciones relacionadas con la EF en el sistema de recomendación de fertilización

Los resultados de los ensayos en Sumatra mostraron que la respuesta en rendimiento máximo al fertilizante nitrogenado depende de los niveles foliares de N y los cationes totales en las hojas y el raquis. Asimismo, la respuesta en rendimiento al fertilizante potásico también se correlaciona con los niveles de K en el raquis y la edad de la palma (Figura 6). En otras palabras, el paso del diagnóstico foliar proporciona una predicción de la respuesta en rendimiento máximo esperado a los fertilizantes aplicados basada en los niveles de nutrientes en los tejidos.

El paso de la predicción de la eficiencia de la respuesta en rendimiento de RFF utiliza infor-

mación sobre las propiedades del sitio (suelo, palma y factores meteorológicos). A continuación del diagnóstico foliar, la predicción de la eficiencia es para determinar la cantidad de fertilizantes para corregir el estado actual nutricional. La eficiencia de la respuesta en rendimiento de RFF a los fertilizantes nitrogenados y potásicos se determina principalmente por el nivel de rendimiento de RFF.

Además, otros factores también influyen en la predicción de la eficiencia. Las bases totales intercambiables (BTI) del suelo, el contenido de arcilla, el drenaje, la pendiente y la edad de las palmas son determinantes adicionales para la predicción de la eficiencia de la respuesta a N. La predicción de la eficiencia de K también se vio afectada por los cationes totales intercambiables (CTI) del suelo, el contenido de limo, el drenaje, la precipitación, el excedente de agua y el número de rodales de palmas (Figura 7) (Tohiruddin *et al.*, 2010).

Las altas correlaciones entre los niveles de peso de los nutrientes y el rendimiento de RFF (Figura 8) proporcionan una posible predicción del rendimiento a partir de una fuente de datos menos compleja (ecuaciones relacionadas con la EF). Con los datos disponibles de la PxS, la edad de las palmas y la concentración de nutrientes, se puede generar la predicción de los nutrientes individuales. Así pues, el último paso requerido es incorporar los valores del rendimiento predicho de RFF basados en los pesos foliares de N y K en la matriz de rendimiento

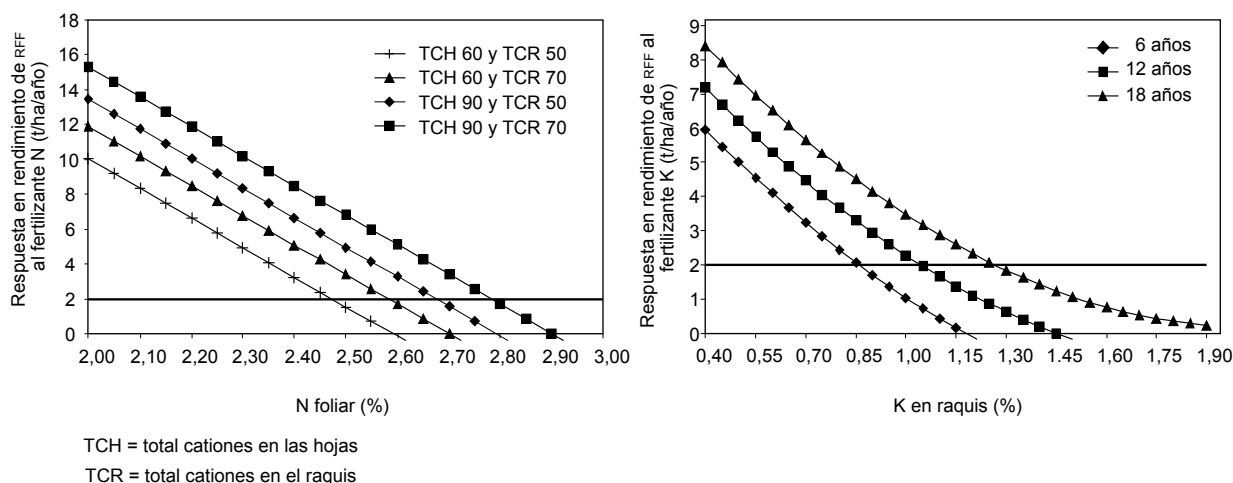


Figura 6. Respuestas en rendimiento máximo predicho a fertilizantes N y K (adaptado de Tohiruddin *et al.*, 2010).

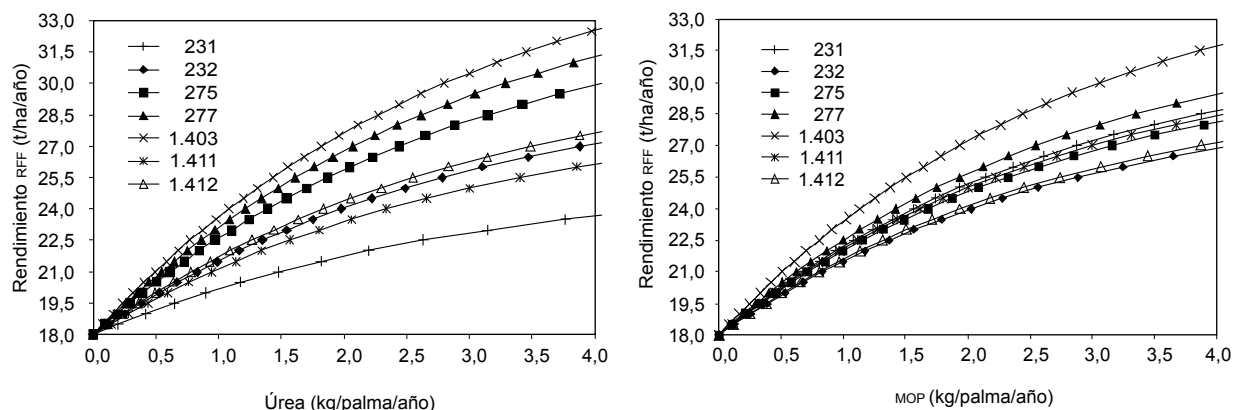


Figura 7. Eficiencia de las respuestas en rendimiento predicho de RFF a fertilizantes N y K (adaptado de Tohiruddin *et al.*, 2010).

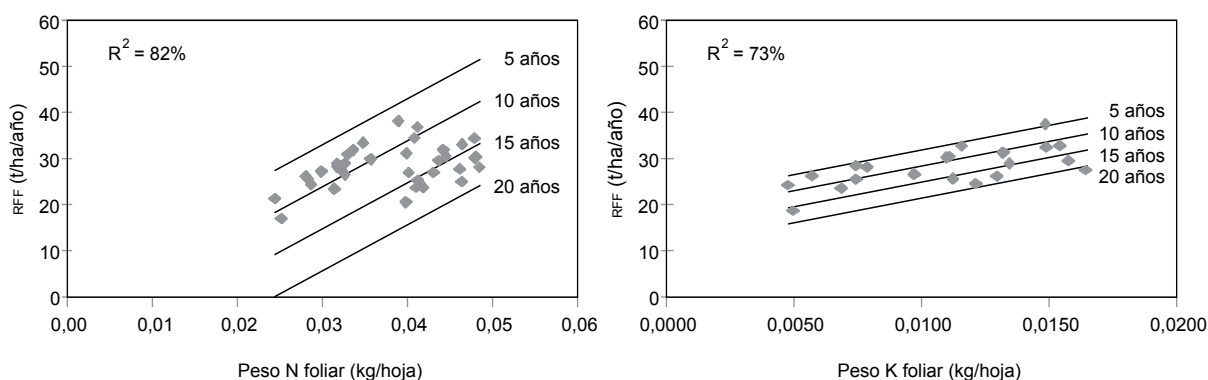


Figura 8. Rendimiento predicho de RFF a partir del estado de N y K en diferentes edades de palma (adaptado de Prabowo *et al.*, 2010).

(Tabla 10 como ejemplo) para un valor del rendimiento predicho actual de RFF (27,0 t). Una vez que el nivel de rendimiento más rentable (28,8 t) se establece, se puede determinar la cantidad adicional/reducida de fertilizantes N y K (esto es, +1,5 kg fertilizante N y +1,5 kg fertilizante K) (Prabowo *et al.*, 2010).

El uso de las últimas ecuaciones de EF para predecir el rendimiento de RFF ofrece más ventaja ya que solamente se requieren pocos datos. Cabe destacar que las ecuaciones se derivaron de condiciones limitadas en Sumatra (norte y sur de Sumatra) a partir de dos progenies Deli x Avros con diferentes edades de palmas. Así pues, el uso de las ecuaciones más allá de las propiedades del sitio de ensayo y el material de siembra necesita una evaluación minuciosa.

Evaluación del material de siembra para determinar la eficiencia y requerimiento de nutrientes

Una progenie puede ser internamente eficiente para utilizar ciertos nutrientes pero menos eficiente para optimizar un nutriente específico. En el ensayo A, la EFN en diferentes suelos fue afectada significativamente por las variaciones en los índices de precipitación mientras que la EFP, la EFK y la EFMg fueron consistentes (véase Tabla 7). El mejoramiento para obtener un material de palma eficiente desde el punto de vista de los nutrientes debe considerar este factor.

Otra complejidad que se puede presentar es que una determinada progenie puede ser eficiente para absorber los nutrientes aplicados pero podría ser menos eficiente para utilizar



Tabla 10. Rendimientos predichos de RFF (toneladas ha⁻¹ a⁻¹) para diferentes combinaciones de fertilizantes N y K (adaptado de Tohiruddin *et al.*, 2010).

Urea (kg/palma/año)	MOP (kg/palma/año)																						
	N	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	K
Opt.	16,0	18,5	20,6	22,4	23,8	25,0	26,1	26,9	27,6	28,2	28,7	29,2	29,5	29,8	30,0	30,2	30,4	30,6	30,7	30,8	30,9	30,9	Opt.
10,0	14,8	18,7	21,5	23,6	25,1	26,2	27,1	27,7	28,2	28,6	28,9	29,1	29,3	29,4	29,6	29,6	29,7	29,8	29,8	29,9	29,9	33,5	
9,5	14,9	18,7	21,5	23,6	25,1	26,2	27,1	27,7	28,2	28,6	28,9	29,1	29,3	29,4	29,5	29,6	29,7	29,7	29,8	29,8	29,9	33,4	
9,0	14,9	18,8	21,5	23,6	25,1	26,2	27,1	27,7	28,2	28,6	28,8	29,1	29,2	29,4	29,5	29,6	29,7	29,7	29,8	29,8	29,8	33,2	
8,5	15,0	18,8	21,6	23,6	25,1	26,2	27,0	27,7	28,2	28,5	28,8	29,0	29,2	29,3	29,5	29,5	29,6	29,7	29,7	29,7	29,7	33,1	
8,0	15,1	18,8	21,6	23,6	25,1	26,2	27,0	27,6	28,1	28,5	28,8	29,0	29,2	29,3	29,4	29,5	29,6	29,6	29,7	29,7	29,7	32,9	
7,5	15,2	18,9	21,6	23,6	25,1	26,2	27,0	27,6	28,1	28,4	28,7	28,9	29,1	29,2	29,3	29,4	29,5	29,5	29,6	29,6	29,6	32,7	
7,0	15,3	19,0	21,6	23,6	25,1	26,1	26,9	27,6	28,0	28,4	28,6	28,8	29,0	29,1	29,2	29,3	29,4	29,4	29,5	29,5	29,6	32,4	
6,5	15,4	19,0	21,7	23,6	25,0	26,1	26,9	27,5	27,9	28,3	28,5	28,8*	28,9	29,0	29,1	29,2	29,3	29,3	29,4	29,4	29,4	32,1	
6,0	15,5	19,1	21,7	23,6	25,0	26,0	26,8	27,4	27,8	28,2	28,4	28,6	28,8	28,9	29,0	29,1	29,2	29,2	29,2	29,3	29,3	31,7	
5,5	15,7	19,2	21,7	23,6	25,0	26,0	26,7	27,3	27,7	28,0	28,3	28,5	28,6	28,7	28,8	28,9	29,0	29,0	29,1	29,1	29,1	31,2	
5,0	15,9	19,3	21,8	23,6	24,9	25,9	26,6	27,1	27,5	27,9	28,1	28,3	28,4	28,5	28,6	28,7	28,8	28,8	28,9	28,9	28,9	30,7	
4,5	16,1	19,4	21,8	23,5	24,8	25,7	26,4	26,9	27,3	27,6	27,8	28,0	28,2	28,3	28,3	28,4	28,5	28,5	28,6	28,6	28,6	30,1	
4,0	16,3	19,5	21,7	23,4	24,6	25,5	26,2	26,7	27,0*	27,3	27,5	27,7	27,8	27,9	28,0	28,0	28,1	28,1	28,2	28,2	28,2	29,4	
3,5	16,5	19,5	21,7	23,3	24,4	25,2	25,9	26,3	26,7	26,9	27,1	27,2	27,4	27,4	27,5	27,6	27,6	27,6	27,7	27,7	27,7	28,5	
3,0	16,8	19,6	21,6	23,1	24,1	24,9	25,4	25,8	26,1	26,4	26,5	26,7	26,8	26,8	26,9	26,9	27,0	27,0	27,0	27,0	27,1	27,5	
2,5	17,0	19,6	21,4	22,7	23,7	24,4	24,8	25,2	25,5	25,6	25,8	25,9	26,0	26,0	26,1	26,1	26,1	26,1	26,2	26,2	26,2	26,3	
2,0	17,2	19,5	21,1	22,3	23,1	23,6	24,0	24,3	24,5	24,7	24,8	24,8	24,9	24,9	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	24,8	
1,5	17,4	19,3	20,7	21,6	22,2	22,6	22,9	23,1	23,3	23,4	23,4	23,4	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,2	
1,0	17,4	18,9	19,9	20,6	21,0	21,3	21,4	21,5	21,6	21,6	21,6	21,6	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,4	21,4	21,4	21,4	21,2	
0,5	17,3	18,3	18,9	19,2	19,3	19,4	19,3	19,3	19,2	19,1	19,1	19,0	18,9	18,9	18,8	18,8	18,7	18,7	18,7	18,6	18,6	18,8	
0,0	16,9	17,2	17,2	17,1	16,9	16,7	16,5	16,2	16,0	15,8	15,7	15,5	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,9	14,8	14,8	16,0	

* Rendimiento actual; ** Rendimiento más rentable

el recurso obtenido. Las progenies 1 y 4 en el ensayo A son un buen ejemplo (Tabla 8). Aunque no significativamente diferente, la progenie 4 (P4) tendió a absorber más P y K aplicado (como lo indica el %ER) en comparación con la progenie 1 (P1). No obstante, la utilización de los nutrientes absorbidos en la masa seca (rendimiento) fue más eficiente en P1 y P4.

Contrario al ejemplo en el ensayo A, un clon de palma de aceite (ramet) de 12 años de edad cultivado en suelo riolítico en Sumatra tuvo sistemáticamente un bajo nivel foliar de Mg (0,14% en ausencia del fertilizante Mg y en presencia de los fertilizantes N, P y K) y mostró un síntoma sutil de amarillamiento uniforme de las pinnas. La aplicación de 3 kg palma⁻¹ a⁻¹ de kieserita durante un período de tres años incrementó ligeramente el nivel de Mg a 0,16% y el síntoma todavía seguía pero con muy buen rendimiento de RFF de 31,3 t ha⁻¹ (SumBio, 1997).

La evaluación de las progenies basada en el % de concentración foliar de nutrientes (Jacquemard *et al.*, 2002, 2010a y 2010b) puede encontrar resultados inconsistentes. Foster (2003) sugirió que el método de muestreo foliar que incluye la selección de las hojas, la unidad de muestreo, la selección de las palmas y el momento del muestreo podría afectar los resultados del análisis de nutrientes. Además, los ensayos de campo que no estén bien instalados con zanjas en las parcelas y una hilera doble de palmas de protección, probablemente experimentarán una grave sustracción de nutrientes (SumBio, 1992). Por tanto, la concentración foliar de nutrientes de las palmas progenie muestreadas puede variar mucho.

Conclusiones

El desarrollo de la palma de aceite de tierras marginales con un estado de fertilidad pobre debe balancearse con un buen material de siembra para una mejor utilización interna de los nutrientes para lograr un cultivo rentable. Un extenso conocimiento sobre la eficiencia en el uso de nutrientes puede entonces ayudar a determinar una recomendación de fertilización,

ahorrar costos, optimizar los beneficios y reducir el riesgo de la escorrentía de fertilizantes que contaminan los cursos de agua.

Los ensayos de fertilización en palmas de aceite maduras y en vivero por lo general demostraron que la ER está influenciada por los niveles de rendimiento y los factores del sitio (propiedades físicas y químicas del suelo y el clima). Por otra parte, la EF es relativamente más estable bajo condiciones no extremas del sitio pero depende mucho de la edad de las palmas y también puede variar con el material de siembra. Así pues, la EA a un nivel determinado de rendimiento y edad y material de siembra, se ve afectada en gran medida por la ER (que varía con los factores del sitio). La EA se ve afectada por la EF principalmente a través de su variación con la edad de las palmas y el material de siembra.

La información relacionada con la EF y la ER se requiere para diversos usos prácticos por parte de la industria de la palma de aceite por las siguientes razones: La EF a una determinada edad de las palmas no se ve generalmente afectada por los factores del sitio; el rendimiento se puede predecir con bastante exactitud a partir solamente del peso de la absorción de nutrientes.

Las recomendaciones precisas de fertilización se pueden hacer con base en un matriz de rendimiento x fertilizante predicha a partir de los valores de la ER, en la cual la posición actual del rendimiento es identificada a partir de los valores de la EF.

Debido a que la EF está relacionada con los materiales de siembra, este parámetro lo pueden usar los mejoradores para seleccionar el material que responda más eficientemente a los fertilizantes o para los sitios con limitaciones agronómicas conocidas.

A pesar de todos los posibles usos de la información sobre la EF, se requiere una evaluación de campo, sobre todo para los usos más allá de las propiedades del sitio de ensayo o cuando existan diferentes materiales de siembra y edades de palma. El papel de las políticas de manejo diario del campo –que variarán con las empresas- pequeñas explotaciones– en el rendimiento real de RFF puede ser significativo y



por ello podría producir diferentes predicciones en relación con las de las ecuaciones de EF. Además de los ensayos de vivero, desde 2010, Sumatra Bioscience ha establecido tres ensayos factoriales que prueban materiales de siembra x fertilizantes N x P x K en diferentes sitios agronómicos para ver si hay variación en el requerimiento de fertilizantes con diferentes materiales de siembra e interacciones material de siembra x nutriente.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al personal de las secciones de Agronomía y Datos de Sumatra Bioscience, que llevó a cabo el trabajo de campo y de laboratorio así como los análisis de los datos estadísticos reportados en este trabajo. Este documento se publica con el permiso de la Junta de PT. PP. London Sumatra Indonesia Tbk.



Bibliografía

- Breure, C. J.; Verdooren, L. R. 1995. Guidelines for Testing and Selecting Parent Palms in Oil Palm. Practical Aspects and Statistical Methods. *ASD Oil Palm Papers* 9.
- Ciampitti, I. A.; Vyn, T. J. 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*, 133 (2012), 48-67.
- Dobermann, A.; Abdulrachman, S.; Gines, H. C.; Nagarajan, R.; Sattawathananont, S.; Son, T. T.; Tan, P. S.; Wang, G. H.; Simbahan, G. C.; Adviento, M. A. A.; Witt, C. 2004. Agronomic performance of site-specific nutrient management in intensive rice-cropping systems of Asia. En: Dobermann, A.; Witt, C.; Dawe, D. (editores). *Increasing productivity of intensive rice systems through site-specific nutrient management*. Enfield, N. H. (Estados Unidos) y Los Baños (Filipinas): Science Publishers, Inc., and International Rice Research Institute (IRRI), 410 p.
- Epstein, E.; Bloom, A. J. 2005. *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives*. Second edition. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, Massachusetts.
- Fairhurst, T. 1999. Nutrient use efficiency in oil palm: Measurement and management, ISF Central Johore Branch.
- Foster, H. L. 2003. Assessment of oil palm fertiliser requirements. En: *Oil Palm: Management For Large And Sustainable Yields* (Fairhurst, T.; Hardter, R. editores). Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute Canada (PPIC) and Int. Potash Inst. (IPI) (Singapur).
- Goh, K. J.; Hardter, R.; Fairhurst, T. 2003. Fertilising for maximum return. En: Fairhurst, T.; Hardter, R. *Oil Palm – Management for large and sustainable yields*. PPI, PPIC (Singapur), IPI Basel (Suiza).
- Goh, K. J. 2011. Agronomic principles and practices of oil palm cultivation. ACT (Agriculture Crop Trust) (Malasia).
- Hadter, R.; Fairhurst, T. 2003. Nutrient use efficiency in upland cropping systems of Asia. 2003 IFA Regional Conference for Asia and The Pacific. Cheju Island (República de Corea).
- Jacquemard, J. C.; Tailliez, B.; Dadang, K.; Ouvrier, M.; Asmady, H. 2002. Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) nutrition: Planting material effect. 2002 International Oil Palm Conference. Bali (Indonesia).
- Jacquemard, J. C.; Ollivier, J. E.; Erwanda, Edyana Suryana; Pepel Permadi. 2010a. Genetic signature in mineral nutrition in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.): a new panorama for high yielding materials at low fertiliser cost. 2010 International Oil Palm Conference. Yogyakarta (Indonesia).
- Jacquemard, J. C.; Edyana Suryana, B.; Cochard, H.; de Franqueville, F.; Bretton, Indra Syahputra; Eko Dermawan; Permadi, P. 2010b. Intensification of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantation efficiency through planting material: new results and developments. 2010 International Oil Palm Conference. Yogyakarta (Indonesia).
- Prabowo, N. E.; Tohiruddin, L.; Fairhurst, T.; Foster, H. L.; Evi Nafisah. 2002. Efficiency of fertiliser recovery by oil palm in Sumatra. 2002 International Oil Palm Conference. Bali.
- Prabowo, N. E.; Foster, H. L. 2006. Nutrient uptake and fertiliser recovery efficiency. Workshop on nutrient needs in oil palm – a dialogue among experts. Singapur.
- Prabowo, N. E.; Tohiruddin, Tandiono, J.; Foster, H. L. 2009. Prediction of expected yields of oil palm from the weights of leaf nutrients. 2009 Porim international conference. Kuala Lumpur (Malasia).
- Prabowo, N. E.; Tohiruddin, Tandiono, J.; Foster, H. L. 2010. Identification and evaluation of problem fields: an implementation of a yield prediction tool based on palm data. 2010 International Oil Palm Conference, Yogyakarta (Indonesia).
- Sitepu, B.; Nelson, S. P. C.; Setiawati, U.; Caligari, P. D. S. 2005. Nursery selection scheme for new oil palm planting material with known

- response to fertiliser levels. Proceedings of Pipoc 2005 International Palm Oil Congress-Agriculture, Biotechnology & Sustainability Conference 25-29, septiembre 2005, Petaling Jaya, Selangor (Malasia).
- Sumatra Bioscience, Lonsum (1992 y 1997). Annual Report - Volume 1-2 Agronomy/ Crop Protection and Breeding. P.T.P.P. London Sumatra Indonesia. North Sumatra (Indonesia).
- Sweeney, D. 1997. Fertiliser placement affects rate of nutrient uptake by grain sorghum in conservation tillage systems. En: *Better Crops*, 81 (3).
- Tohiruddin, L.; Prabowo, N. E.; Foster, H. L. 2007. Efficiency of fertiliser use of oil palm planted on soils of Northern and Southern Sumatra. En: Proceeding of Porim International Palm Oil Conference (Malasia).
- Tohiruddin, L.; Foster, H. L.; Prabowo, N. E.; Tandiono J. 2010. A comprehensive approach to the determination of optimal N and K fertiliser recommendations for oil palm in Sumatra. 2010 International Oil Palm Conference, Yogyakarta (Indonesia).
- Wortmann, C.; Shapiro, C.; Dobermann, A.; Ferguson, R.; Hergert, G.; Walters, D.; Tarkalson, D. 2011. High yield corn production can result in high nitrogen use efficiency. En: *Better Crops*, 95 (4).