

Primera parte



Foto: Jhon Jiménez.

Planeación y preparación del proceso de fertilización

<https://doi.org/10.56866/9789588360997.01>

Jhon Fredy Jiménez-Vera, Jhonatan Eduardo Camperos-Reyes
y Nolver Atanacio Arias



El profesional encargado de la nutrición del cultivo de palma de aceite debe contar con elementos básicos para poder suplir de manera eficiente las necesidades nutricionales requeridas por las plantas. Para esto, debe tener en cuenta los criterios técnicos y económicos establecidos, además de los diferentes métodos de aplicación de las fuentes fertilizantes en campo.

En esta primera parte se presentarán los criterios básicos para realizar la planeación de la labor de fertilización. Estas pautas permitirán adaptar la labor a las condiciones propias de cada plantación. Inicialmente se enseñarán los aspectos asociados al plan de nutrición (estado nutricional, tanto del suelo como de la planta, además de su estado productivo), en donde se determinarán los productos o fuentes y las cantidades adecuadas de fertilizante para aplicar al cultivo. Luego, se detallarán los criterios relacionados con el sitio apropiado de aplicación del fertilizante en campo, lo que implica tener en cuenta las condiciones del cultivo (altura de la palma, estado de la poda, limpieza del plato, entre otras). Finalmente, se señalarán los momentos oportunos para la aplicación del fertilizante y la duración de cada uno de ellos, denominada ventana de aplicación, que está condicionada por las particularidades del clima (precipitación) y del suelo (contenidos de humedad, tasas de infiltración, etc.).

Criterios asociados a un plan de nutrición en el cultivo de palma de aceite

Estructurar un plan de nutrición para el cultivo de palma implica un diagnóstico nutricional cuya finalidad es establecer posibles deficiencias o excesos en la concentración de nutrientes, tanto en la planta como en el suelo. Por esto, para establecer un plan nutricional se deben tener en cuenta los siguientes criterios (Arias y Beltrán, 2010).

Nivelación edáfica de nutrientes

El suelo en su condición natural es un reservorio de nutrientes y agua que, dependiendo de su composición, puede diferir en su capacidad para proveer los diferentes nutrientes, además de presentar desbalances o deficiencias de algún elemento particular (FAO, 2002). Por lo tanto, se busca establecer las cantidades de nutrientes precisas para mantener el suelo en condiciones nutricionales óptimas en función de las necesidades del cultivo (Tabla 1).

Para definir este criterio se realiza un muestreo de suelo que consiste en tomar pequeñas porciones de este en áreas de interés definidas, ya sean lotes o Unidades de Manejo Agronómico (UMA). La toma de muestras de suelos se hace con personal capacitado (Figura 1), siguiendo procedimientos estandarizados (Munévar *et al.*, 2016).

Tabla 1. Niveles críticos o de referencia en suelos empleados en el cultivo de palma de aceite.

Parámetro	Abreviatura	Unidad	Bajo	Medio	Alto
Potencial de hidrogeniones	pH	-	< 4,5	4,5 - 5,0	> 5,0
Materia orgánica	M. O.	%	< 2,0	2,0 - 4,0	> 4,0
Conductividad eléctrica	C. E.	dS m ⁻¹	< 2,0	2,0 - 4,0	> 4,0
Capacidad de intercambio catiónico	C. I. C.	cmol _c kg ⁻¹	< 10,0	10,0 - 20,0	> 20,0
Potasio	K	cmol _c kg ⁻¹	< 0,2	0,2 - 0,4	> 0,4
Boro	B	mg kg ⁻¹	< 0,25	0,25 - 0,50	> 0,50
Fósforo (Método Bray II)	P (B II)	mg kg ⁻¹	< 15,0	15,0 - 20,0	> 20,0
Hierro	Fe	mg kg ⁻¹	< 15,0	15,0 - 30,0	> 30,0
Cobre	Cu	mg kg ⁻¹	< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5
Manganeso	Mn	mg kg ⁻¹	< 5,0	5,0 - 10,0	> 10,0
Zinc	Zn	mg kg ⁻¹	< 1,0	1,0 - 2,0	> 2,0
Azufre	S	mg kg ⁻¹	< 10,0	10,0 - 15,0	> 15,0
Saturación de aluminio intercambiable	Sat. Al. Int.	%	< 25,0	25,0 - 50,0	> 50,0
Saturación de potasio	Sat. K	%	< 3,0	3,0 - 6,0	> 6,0
Saturación de magnesio	Sat. Mg	%	< 10,0	10,0 - 20,0	> 20,0
Saturación de calcio	Sat. Ca	%	< 20,0	20,0 - 40,0	> 40,0
Saturación de sodio	Sat. Na	%	< 10,0	10,0 - 15,0	> 15,0
Relación calcio : magnesio : potasio	Ca : Mg : K	2 : 1 : 0,3 → Adecuado			

Fuente: Arias y Beltran, (2010).



Figura 1. Muestreo de suelos para análisis químico: (a) Toma de submuestra; (b) Conformación de muestra de suelos compuesta; (c) Muestra compuesta de suelos.

Nivelación nutricional de la palma

Corresponde a la demanda de nutrientes necesaria para llegar a una concentración foliar óptima en la planta (Tabla 2). Como consecuencia, la palma no tendrá limitaciones nutricionales para expresar su máxima producción.

Tabla 2. Niveles críticos o de referencia en tejido foliar de la hoja 17 en el cultivo de palma de aceite.

Elemento	Símbolo	Unidad	Bajo	Medio	Alto
Nitrógeno	N	%	2,33	2,34 - 2,59	2,6
Fósforo	P	%	0,15	0,16 - 0,17	0,18
Potasio	K	%	1,07	1,08 - 1,19	1,2
Calcio	Ca	%	0,58	0,59 - 0,64	0,65
Magnesio	Mg	%	0,24	0,25 - 0,27	0,28
Azufre	S	%	0,22	0,23 - 0,25	0,26
Boro	B	ppm	15	16,00 - 17	18
Hierro	Fe	ppm	71	72,00 - 79	80
Zinc	Zn	ppm	13,4	13,50 - 14,9	15
Manganeso	Mn	ppm	134	135,00 - 149,00	150
Cobre	Cu	ppm	4,3	4,4 - 4,9	5

Fuente: (Arias y Beltrán, 2010).

La nivelación foliar se define a través de dos tipos de muestreos realizados a la palma de aceite: un muestreo foliar para la determinación de los contenidos de nutrientes y otro para la estimación de la materia seca foliar a partir de la medición de variables de crecimiento vegetativo.

- **Muestreo foliar:** La finalidad de este consiste en establecer la concentración de los elementos esenciales o nutrientes que están presentes en las hojas de la palma, siendo un indicador de su estado nutricional. Generalmente se solicitan al laboratorio los siguientes elementos: N, P, K, S, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn, Zn y Cl (Munévar *et al.*, 2016).

En este tipo de muestreo se toma un determinado número de folíolos en las hojas de interés (Figura 2) ya que, dependiendo de la edad del cultivar, los folíolos pueden ser tomados en diferentes niveles, es decir, de las hojas 3, 9 o 17. La cantidad de folíolos por palma depende del tamaño de la unidad de muestreo¹.

¹ Para profundizar sobre la definición de unidades de muestreo y cómo realizar un muestreo foliar y de suelos, consultar la *Guía general para el muestreo foliar y de suelos en palma de aceite* (Munévar *et al.*, 2016).



Figura 2. Toma de muestras foliares.

- **Materia seca foliar:** El cálculo de los requerimientos de nutrientes para la nivelación foliar tiene en cuenta la materia seca foliar de las palmas, que son determinadas mediante la medición de variables de crecimiento vegetativo realizadas en la hoja 17 (Figura 3) (Cayón, 1999).

Como resultado del proceso de estimación de materia seca foliar se obtendrá una magnitud expresada en kilogramos por palma (kg/palma), y esta será la base para estimar las necesidades de nutrientes para la nivelación foliar. Para ampliar el tema de mediciones de variables de crecimiento vegetativo, consultar el boletín técnico N°. 20 *Selección de palmas de aceite elite en plantaciones comerciales* (Rey *et al.*, 2006).



Figura 3. Medición de parámetros vegetativos en hoja 17 para la estimación de materia seca foliar (MSF): (a) longitud de raquis; (b) y (c) ancho y profundidad de raquis; (d) y (e) ancho y longitud de foliolos.

Nivelación por extracción de nutrientes a través de los racimos cosechados

Esta nivelación hace referencia a la cantidad de nutrientes que se le deben compensar a la palma debido a la extracción ocasionada por la cosecha de los racimos en el ciclo de producción. Para estimar el rendimiento del cultivo se realiza un estimativo de producción, el cual consiste en proyectar su producción anual. Normalmente el muestreo se hace cada 4 o 6 meses dependiendo de la altura de las palmas y consiste en contar el número de estructuras reproductivas de la planta, tales como racimos e inflorescencias, tanto femeninas como masculinas, que se puedan identificar con claridad (Figura 4) (Ruiz *et al.*, 2013).



Figura 4. Conteo de racimos y estructuras reproductivas en un muestreo de producción.

Nivelación por eficiencia agronómica (EA)

El suministro de mayores o menores cantidades a las necesarias se traduce en una pobre eficiencia en el uso de nutrientes o pérdidas en el rendimiento y calidad del cultivo. La *eficiencia agronómica (EA)* se define como el incremento de la cantidad del rendimiento en el cultivo con respecto a la cantidad de un nutriente aplicado y está condicionada por el tipo de cultivar, las condiciones climáticas, las prácticas de manejo, entre otros factores. Hablar de EA implica tanto a la *eficiencia de recuperación (ER)* como a la *eficiencia fisiológica (EF)* (Arias-Arias, 2019; Prabowo *et al.*, 2013; Stewart, 2007).

La ER, también conocida como *eficiencia de absorción*, corresponde a la relación de la absorción de nutrientes de la palma por unidad de nutriente aplicado, y está sujeta a variaciones en las características particulares del lugar. Por otra parte, la *eficiencia fisiológica* corresponde a la relación del incremento en el rendimiento con respecto a la cantidad de nutrientes absorbidos. De esta manera, el producto entre la ER y la EF determina la EA².

El ajuste por EA de los fertilizantes, que son específicas de cada nutriente, puede estar entre 10 y 40 % (Munévar, 2001).

² Para conocer más detalles sobre cómo calcular la EA, consultar Stewart (2007).

Interpretación de resultados del plan nutricional

La importancia de los criterios expuestos radica en que el profesional encargado de la nutrición del cultivo realice una correcta interpretación de los resultados obtenidos y, de esta manera, pueda tomar las mejores decisiones en cuanto a la selección, tanto de las fuentes fertilizantes como de las cantidades o dosis adecuadas a aplicar. Lo anterior permite corregir posibles desbalances o limitantes en el suelo, hacer las nivelaciones foliares de tal manera que la planta no tenga limitaciones fisiológicas a causa de posibles excesos o déficits de nutrientes, y reponer en el cultivo las cantidades extraídas por las cosechas (Arias y Beltran, 2010).

Criterios para la selección de fuentes fertilizantes

Orientado por el primer criterio de las 4 R, fuente adecuada (*Right source*, por sus siglas en inglés), al momento de seleccionar las fuentes fertilizantes se debe considerar:

Características físicas del fertilizante

Las propiedades físicas de los fertilizantes son importantes no solo por su efectividad agronómica y su contenido nutricional específico, sino también por la facilidad de aplicación, transporte y conservación durante el almacenamiento, en donde se pueden segregar, humedecer y compactar. La granulación de los fertilizantes disminuye la compactación y la tendencia a la segregación de las partículas. Estos fenómenos son comunes cuando la presentación o mezclas de los fertilizantes son en polvo o en cristales finos. No obstante, cabe destacar que no todos los fertilizantes o enmiendas granuladas se comportan bien agronómicamente.

Algunas fuentes que son de muy baja solubilidad en agua, desde el punto de vista físico, funcionan mejor cuando están en forma de polvo fino, como las rocas fosfóricas, las escorias Thomas, el fosfato bicálcico, los fosfatos térmicos, el yeso, las cales agrícolas, las dolomitas y el azufre. Por el contrario, fertilizantes de alta solubilidad se comportan agronómicamente mejor cuando han sido granulados y el tamaño del gránulo es inversamente proporcional a la tasa de disolución de este. Esta propiedad es clave, especialmente cuando se usan fosfatos solubles en suelos que son altamente fijadores de fósforo (FAO, 2002; León, 2004).

Características químicas del fertilizante

Se refieren a la composición del fertilizante, es decir, la forma química del elemento o del (de los) nutriente(s), el tipo de fuente (simple o compuesta) y su compatibilidad química. Las propiedades químicas de las fuentes fertilizantes son: la solubilidad, el

índice de salinidad, la acidez o basicidad residual y el pH de la solución concentrada. Estas características son fundamentales dado que tienen una estrecha relación con la efectividad agronómica del fertilizante.

La solubilidad de los fertilizantes indica su capacidad de disolución en una sustancia, o medio, que generalmente es agua. Esta propiedad se relaciona estrechamente con su efectividad agronómica y con las reacciones a corto plazo que estos presentan con los componentes del suelo, produciendo efectos inmediatos, de persistencia y residuales (León, 2004).

La compatibilidad química es un aspecto relevante, ya que no todos los fertilizantes pueden ser mezclados conjuntamente. Al mezclarse fertilizantes incompatibles se pueden presentar reacciones químicas y problemas como la compactación, que es un fenómeno dado por el desarrollo de enlaces cristalinos entre las partículas durante el periodo de almacenamiento. Este fenómeno es uno de los problemas más frecuentes en la industria de los fertilizantes químicos. Por ejemplo, las mezclas entre la urea y el superfosfato o entre el fosfato amónico y el superfosfato deberían ser evitadas (FAO, 2002; León, 2004). Por otro lado, algunos fertilizantes son antagonistas a la absorción de otros fertilizantes. Como es el caso entre el potasio y el magnesio, los cuales no se deben aplicar sucesivamente (Fairhurst, 2010).

Costo o precio de las fuentes fertilizantes

Los altos costos en las fuentes fertilizantes pueden condicionar la selección de un producto comercial determinado con diferentes criterios técnicos. La principal razón radica en que, para el año 2022, la participación de la fertilización en el total de los costos de producción de una tonelada de racimos de fruta fue del 38,8 % en cultivares híbridos y del 45,7 % en *E. guineensis* (Mosquera-Montoya, Ruiz-Álvarez, *et al.*, 2023).

Consideraciones previas a la aplicación de las fuentes fertilizantes

Cuando se aplica una o más fuentes de fertilizantes edáficos es necesario considerar que las condiciones del cultivo, del suelo y de clima sean favorables para la mayor asimilación de los nutrientes aplicados y, de esta manera, impactar positivamente su productividad con una menor huella de carbono y pérdidas de nutrientes por volatilización, escorrentía o lixiviación.

Condiciones del cultivo (lugar adecuado de aplicación)

a. Altura del dosel de la palma

Los cultivares híbridos interespecíficos OxG son más robustos y de menor crecimiento comparados con los cultivares *E. guineensis*. Por tanto, dos cultivares pueden tener la misma edad de siembra desde su establecimiento, pero la altura en cada uno de estos es un factor que toma relevancia para convertirse en un criterio de selección del método de aplicación de fertilizantes, debido a que la baja altura del dosel de la palma puede restringir, en cierta medida, la implementación de algunos de los métodos de aplicación como los mecanizados y los semimecanizados (Figura 5).

Los métodos de aplicación mecanizados como, por ejemplo, voleadoras accionadas por tractor, no son recomendados para palmas con doseles a alturas inferiores a 3 metros. Esto se debe a que el fertilizante puede caer sobre las hojas o estípites y no en el suelo. Lo anterior puede ocasionar lesiones o quemaduras sobre la palma y pérdida de la eficiencia de la fertilización. Por otra parte, las hojas pueden dañar los equipos de aplicación o viceversa.

En cuanto a métodos de aplicación semimecanizados (combinación de aplicación manual de fertilizantes implementando semovientes o tractores para el transporte de las fuentes), el criterio técnico del responsable de la fertilización del cultivo juega un papel fundamental, ya que debe considerar diferentes escenarios posibles como, por ejemplo, si los operarios van sobre las carretas de aplicación, las hojas bajas podrían lesionarlos. Como alternativa se recomienda que los operarios se desplacen caminando y aplicando el producto junto a la carreta que transporta el fertilizante.



Figura 5. Porte y altura del dosel de palmas de 7 años de establecidas en campo. (a) Cultivar *E. guineensis*; (b) cultivar híbrido interespecífico OxG.

b. Poda y plateo de la palma

Es recomendable contar con una óptima condición de mantenimiento general del lote, tanto en su accesibilidad como en actividades rutinarias en el cultivo, como la poda (Figura 6) y el plateo (Figura 7). Lo anterior puede condicionar el éxito de las actividades planeadas en relación con la fertilización, especialmente cuando son manuales o semimecanizadas. Por una parte, un lote sin mantenimiento puede afectar considerablemente los rendimientos del personal que realiza la labor y, por otra, puede darse una mayor exposición al riesgo de afectar la integridad física de los operarios que ejecutan las labores.



Figura 6. Condición de poda en palma. (a) Adecuada; (b) no adecuada.



Figura 7. Condición del plato de la palma. (a) Con mantenimiento; (b) sin mantenimiento.

c. Disposición de residuos orgánicos en la palma

Otros escenarios posibles son aquellos en los que se aplica biomasa (hojas, tusa, etc.) al plato de la palma para contribuir a la eficiencia de la nutrición y a la estimulación del crecimiento de raíces, y es en donde se realiza la ubicación del fertilizante. Con el método de aplicación seleccionado, el propósito es disponer el fertilizante sobre la biomasa dispuesta alrededor de la palma, con la finalidad de favorecer la absorción de los nutrientes (Figura 8). En el caso de los fertilizantes que contienen nitrógeno es importante asegurarse de que el producto quede en contacto con el suelo, ya que será más susceptible de volatilización al quedar ubicado sobre residuos vegetales.



Figura 8. Aplicación de biomasa alrededor del plato. (a) Disposición de racimos vacíos (tusas); (b) disposición de hojas en contorno del plato de la palma.

Condiciones del suelo (momento adecuado de aplicación)

a. Humedad del suelo

La humedad del suelo depende principalmente de la precipitación o de aportes de agua mediante sistemas de riego en las épocas secas.

Según la textura del suelo, condiciones excesivas de humedad pueden ser contraproducentes y la aplicación de fertilizantes asistida con maquinaria agrícola o semovientes puede afectar negativamente la condición física del suelo.

La humedad del suelo es uno de los factores que más afectan los rendimientos de la palma de aceite, por condiciones deficitarias o excesivas que pueden inducir a un pobre crecimiento y bajos rendimientos de fruta fresca (Zakaria, 1998). De esta manera, puede afectar la eficiencia de la fertilización. Un suelo con

exceso de humedad puede presentar anegamientos (Figura 9) o escorrentías que implican pérdida de fertilizantes, e inhiben los procesos fisiológicos de las plantas. Mientras que las raíces en un suelo con humedad deficiente pueden tener baja absorción de agua y, por tanto, se reduce la toma de nutrientes, ya que para que estos sean absorbidos la presencia de agua es imprescindible.



Figura 9. Condición de exceso de humedad en el cultivo de palma de aceite.

b. Verificación de la humedad del suelo para la aplicación

Una condición adecuada de humedad para la fertilización del cultivo es aquella en la que el suelo está en capacidad de campo, es decir, los macroporos del suelo han drenado completamente excesos de agua. Generalmente se llega a esta condición de humedad luego de dejar drenar un suelo saturado entre 48 y 72 horas (Jaramillo, 2002), por efecto de precipitaciones o aplicaciones de agua mediante sistemas de riego. Se pueden tener aproximaciones de manera práctica utilizando la metodología del tacto, la cual consiste en tomar muestras de suelos en áreas no encharcadas o influenciadas por cuerpos de agua. Para la toma de muestra se utiliza un machete, palín o barreno. Con la herramienta seleccionada se toma una porción de suelo, a la profundidad de interés (ejemplo, entre 0 y 15 cm). Luego, la muestra se ubica en la palma de la mano dominante y se comprime con firmeza para formar una “bola” de forma irregular. Si después de realizada la compresión se genera un humedecimiento claramente visible en la palma de la mano, sin escurrimientos o goteos (Figura 10), se dice que el suelo se encuentra en capacidad de campo o cercano a este umbral. Para mayor detalle de esta técnica consultar la propuesta por la USDA (2000).



Figura 10. Inspección de la humedad del suelo al tacto.

c. Nivel freático

La eficiencia en la toma de nutrientes por parte de la planta se ve afectada en áreas con niveles freáticos superficiales (Figura 11), debido a que la saturación permanente de agua limita el crecimiento de las raíces. Por lo tanto, se requieren de drenajes que abatan o impacten en la profundidad del nivel freático y mejoren las condiciones de humedad del suelo (Jiménez y Arias, 2021). Se puede conocer su comportamiento a través de la implementación de pozos de observación (Figura 12) que permitirán observar su fluctuación en el tiempo.



Figura 11. Nivel freático cercano a la superficie del terreno.



Figura 12. Pozo de observación para seguimiento del nivel freático.

d. Infiltración del agua en el suelo

Es el fenómeno en el que el agua penetra a través de la superficie, se distribuye y almacena dentro del perfil en un determinado tiempo (Molina y Stember, 2015). La infiltración interviene en la mayoría de los modelos de transporte de agua-solutos, por ejemplo, fertilizantes. Además, este parámetro es ampliamente utilizado en la evaluación de la calidad física del suelo (Eiza y Carfagno, 2018).

La velocidad de infiltración del agua en la superficie del suelo se clasifica desde muy lenta hasta muy rápida (Tabla 3). Su utilidad radica principalmente en brindar elementos que complementen los criterios de decisión en relación con la aplicación de fertilizantes en cierta condición. Por ejemplo, fraccionar aplicaciones de fertilizantes en suelos con alta infiltración para evitar pérdidas por lixiviación. Mientras que suelos de lenta infiltración pueden presentar escorrentías y pérdidas de fertilizantes por este fenómeno (Molina y Stember, 2015). Esta condición de

baja velocidad de infiltración se corrige a través del subsolado, el cual mejora la condición física del suelo reduciendo los encharcamientos y excesos de humedad en la superficie (Zakaria, 1998).

Para determinar este parámetro físico del suelo existen diversas metodologías. La más empleada es la del doble anillo o cilindros concéntricos (Figura 13). Para conocer más acerca de cómo realizar esta prueba consultar Molina y Stember (2015).



Figura 13. Evaluación de la infiltración del agua en el suelo mediante anillos concéntricos.

Tabla 3. Clasificación de la velocidad de infiltración. Fuente: Montenegro y Malagón (1990).

Velocidad de infiltración (cm h^{-1})	Clasificación
< 0,1	Muy lenta
0,1 – 0,5	Lenta
0,5 – 2,0	Moderadamente lenta
2,0 – 6,3	Moderada
6,3 – 12,7	Moderadamente rápida
12,7 – 25,4	Rápida
> 25,4	Muy rápida

e. Topografía (pendiente)

La topografía o la pendiente de un terreno puede ser un factor que incida en la erosión del suelo y la posible pérdida de fertilizantes por escorrentía. Lo anterior depende del tipo de pendiente y su longitud, existiendo una relación de proporcionalidad. Es decir, a mayor pendiente, mayor velocidad del agua y la susceptibilidad a la erosión y arrastre de materiales o partículas, entre estas, los fertilizantes o nutrientes disueltos en el agua luego de su solubilización.

La topografía es un factor que puede limitar la ejecución de las actividades de fertilización (método de fertilización). Por ejemplo, cuando hay pendientes pronunciadas o relieves disectados, la mecanización de la labor es limitada. En el caso del método de aplicación manual de fertilizantes, la pendiente no representa mayores restricciones. Por otro lado, el uso de los métodos mecanizados o semimecanizados en suelos con pendientes, entre 9 y 25 grados (°) de inclinación, dependerá del criterio del profesional encargado. En suelos con pendientes mayores a 25° no es recomendable la siembra de palma de aceite (RSPO, 2013).

f. Estructura del suelo

La estructura del suelo está conformada por partículas sólidas que se unen entre sí de diversas formas, generando unidades de mayor tamaño llamadas agregados, unidades estructurales o peds. La estructura controla las interrelaciones entre las diferentes fases físicas del suelo, así como la dinámica de líquidos y de gases en él. Lo anterior es debido a que tiene una influencia directa en propiedades como porosidad, densidad aparente, régimen hídrico y térmico, permeabilidad, aireación, distribución de la materia orgánica, la infiltración, entre otras (Jaramillo, 2002). La degradación de un suelo se evalúa de acuerdo con el grado de deterioro de su estructura, que se relaciona con la erosión, con el cultivo y con las prácticas de manejo. Las mejores condiciones estructurales son definidas por gránulos y grumos (formas redondeadas), íntimamente relacionadas con la materia orgánica del suelo (Jaramillo, 2002; Montenegro y Malagón, 1990). La estructura del suelo se clasifica de acuerdo con el índice de agregación o diámetro ponderado medio (DPM) de sus agregados (Tabla 4). El DPM puede ser determinado mediante el método de tamizado en húmedo o de Tiulin (modificado por Yoder) (Montenegro y Malagón, 1990).

Tabla 4. Rangos de interpretación de la estabilidad estructural con relación al diámetro ponderado medio – DPM.

DPM (mm)	Clasificación
< 0,5	Inestable
0,5 – 1,5	Ligeramente estable
1,5 – 3,0	Moderadamente estable
3,0 – 5,0	Estable
> 5,0	Muy estable

Fuente: Montenegro y Malagón, (1990).

g. Consistencia del suelo

La consistencia es la propiedad que define la resistencia del suelo a ser deformado por las fuerzas que se aplican sobre este y depende directamente de los contenidos de humedad y materia orgánica, así como también de los tipos de arcilla que lo constituyen (Jaramillo, 2002). Los suelos suelen ser sometidos a cargas o esfuerzos que pueden alterar su condición estructural y de consistencia. Estos esfuerzos producen deformaciones que pueden manifestarse como rupturas, fragmentaciones o flujos de los materiales del suelo (Hillel, 1998).

La consistencia del suelo puede presentar cuatro estados: coherente, friable o de fragilidad, plástico y de fluidez (Jaramillo, 2002).

El estado coherente es cuando el suelo está seco, característico por la extrema dureza de sus terrones cuando no es arenoso. Es decir, suelos cohesivos, o por partículas sueltas, en suelos arenosos denominados en estos casos como suelos no cohesivos. El impacto del tránsito de maquinaria y/o de semovientes sobre el suelo en este estado de consistencia es nulo, dado que el suelo presenta la mayor resistencia a ser deformado y mayor capacidad portante.

Cuando se incrementa el contenido de humedad del suelo, hasta sobrepasar los límites del estado coherente, este cambia su condición de consistencia al estado friable o de fragilidad, en el que es blando, con una capacidad portante disminuida en relación con el estado coherente. Sin embargo, no imposibilita el tráfico de maquinaria ni de semovientes. Dentro del estado de friabilidad se manifiestan dos índices de consistencia importantes para su manejo en relación con la labranza del suelo: límite de soltura y límite inferior de plasticidad o límite plástico. El primero representa el contenido máximo de humedad que puede haber en un suelo, sin que se adhiera a cuerpos extraños, siendo así el punto

óptimo de labranza. Mientras que el segundo hace referencia al límite máximo de humedad que debe tener el suelo para ser sometido a laboreo con bajo riesgo de deterioro físico.

El estado plástico corresponde al rango de humedad del suelo en el cual se deja moldear y conserva las deformaciones que le ocasionan fuerzas externas. Este rango está comprendido entre el límite inferior de plasticidad y el superior o límite líquido, y es el mismo en el cual se dan las mayores fuerzas de adhesión. Es decir, el suelo se adhiere fácilmente al entrar en contacto con superficies o elementos externos. El límite líquido se define como el contenido mínimo de humedad del suelo, en el cual este empieza a comportarse como un fluido, esto es a deformarse bajo su propio peso. En esta condición aumentan los riesgos de compactación y del deterioro físico del suelo asociados a labores mecanizadas en los cultivos.

El estado de fluidez es cuando el suelo sobrepasa el contenido de humedad del límite líquido y empieza a fluir por su propio peso debido a condiciones de saturación de humedad. En general, este estado implica las mayores dificultades para realizar actividades u operaciones agrícolas mecanizadas.

La consistencia del suelo es una propiedad que se relaciona ampliamente con su laboreo. Desde el punto de vista agrícola, el estado de consistencia más importante es el friable (Jaramillo, 2002).

Condición del clima (momento adecuado de aplicación)

a. Precipitación

La lluvia muy frecuente, intensa y duradera puede condicionar la ejecución de la labor en campo, dado que se pueden provocar excesos de humedad en el suelo y anegamientos.

Por otra parte, en los casos en los que no se cuenten con sistemas de riego que suministren agua al cultivo, al no presentarse precipitaciones en las épocas secas, la humedad del suelo será baja y no permitirá la correcta disolución en el agua del suelo y posterior asimilación de las fuentes fertilizantes aplicadas.

Para planear correctamente la aplicación del fertilizante durante el año es necesario conocer la distribución promedio mensual de la precipitación. Con esta información la plantación puede identificar franjas o ventanas de tiempo en las cuales se puede desarrollar efectivamente la labor de fertilización, minimizando contratiempos. Las aplicaciones de fertilizantes deben proyectarse para aquellos

meses en los que históricamente se muestra que existe la máxima posibilidad de que caerán, por lo menos, 10 mm de lluvia dentro de los cuatro días después de la aplicación. Asimismo, una vez iniciadas las campañas de fertilización, estas se deben posponer en caso de presentarse un clima inusualmente seco o lluvioso (Fairhurst, 2010).

Como ejemplo, se cuenta con la precipitación promedio mensual y acumulada anual de dos plantaciones, ubicadas en dos zonas palmeras de Colombia para el periodo 2017–2021. La plantación ubicada en la Zona Oriental reportó 2.844 mm año⁻¹ en promedio. Mientras que la plantación de la Zona Norte reportó en promedio 1.406 mm año⁻¹.

De acuerdo con los registros de precipitaciones de la Zona Oriental, en promedio siete meses del año (abril a octubre) presentan lluvias con magnitudes superiores a 250 mm mes⁻¹. Sin embargo, en cuatro de estos siete meses (abril a julio) hubo precipitaciones mensuales entre 350 y 410 mm mes⁻¹ (Figura 14). En cuanto a la plantación de la Zona Norte, los meses de mayor pluviosidad se encuentran entre mayo y noviembre, estando alrededor de los 150 mm mes⁻¹. Octubre es el único mes en el que las precipitaciones superaron los 250 mm, en promedio.

Estas condiciones contrastantes de precipitación dejan ver que cada plantación es un caso particular. Posiblemente en la Zona Oriental se presenten mayores restricciones al momento de ejecutar actividades de fertilización, condicionada principalmente por la alta pluviosidad comparada con las condiciones de la Zona Norte.

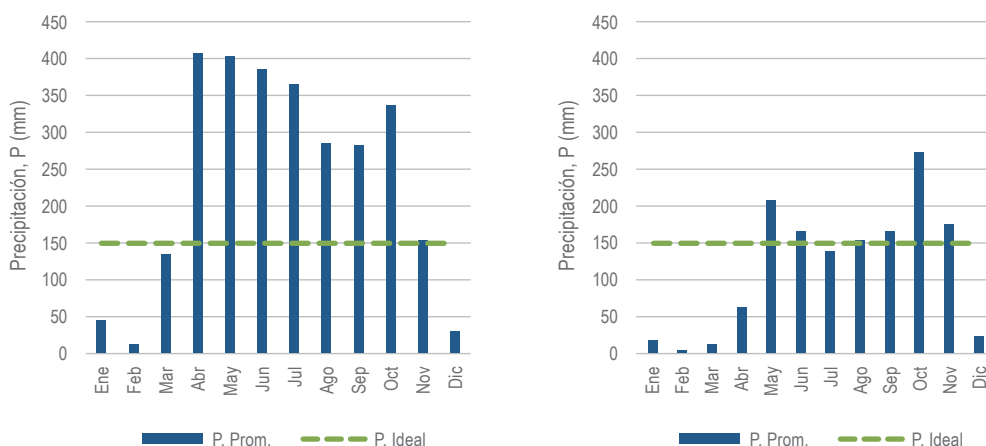


Figura 14. Precipitación media mensual de los años 2017–2021 para una plantación en Zona Oriental (izquierda) y en Zona Norte (derecha).

b. Ventana de aplicación

Esta hace referencia al intervalo de tiempo disponible para ejecutar las labores asociadas a la aplicación de fertilizantes, principalmente en los escenarios en los que no se dispone de riego para humedecer el suelo.

Para identificar las ventanas de aplicación durante el año es necesario observar el comportamiento de la precipitación agrupada por periodos de diez días, denominados décadas. Es decir, la primera década de cada mes está conformada por la acumulación de las precipitaciones de los primeros diez días del mes; la segunda década corresponde a la precipitación de los siguientes diez días, del día 11 al día 20; en cuanto a la tercera década, son los últimos días del mes.

De acuerdo con el ejemplo anterior, en las figuras 15 y 16 se expone el comportamiento mensual multianual de la precipitación, identificando las diferentes décadas de cada mes para las dos plantaciones. En el caso de la plantación ubicada en la Zona Oriental, se aprecian con mayor claridad las transiciones de las épocas secas a húmedas y viceversa (Figura 15). Estas transiciones se dan en los meses de marzo y noviembre. Mientras que agosto, a pesar de registrar precipitaciones entre 250 y 300 mm, corresponde a una disminución de las lluvias de los meses predecesores y tienden a presentarse días contiguos sin precipitaciones que permitirían ejecutar las labores. No obstante, la cantidad de lluvia en este mes tiende a ser el doble de lo registrado en los meses de transición y podría estar sujeto al criterio del profesional si ejecuta o no la aplicación del fertilizante (Figura 17).

En la plantación ubicada en la Zona Norte (Figura 16), estas transiciones no se aprecian de manera acentuada por su condición de baja pluviosidad, que es predominante la mayor parte del tiempo. Las medias mensuales de precipitación obtenidas sugieren mayores posibilidades para llevar a cabo labores de fertilización durante seis meses contiguos, entre mayo y septiembre. Mientras que en octubre tienden a presentarse las mayores precipitaciones. Posteriormente, en noviembre la cantidad de lluvias disminuye considerablemente, siendo este el mes de transición de la época de lluvia a la época seca (Figura 17).

En general, cuando se dispone de sistemas de riego, las ventanas de aplicación son mayores y dan una mayor flexibilidad en términos logísticos, debido a que se aprovechan las épocas secas en las que se le suministra agua para regar el cultivo y que, a su vez, puede generar la condición necesaria de humedad en el suelo para realizar una adecuada aplicación.

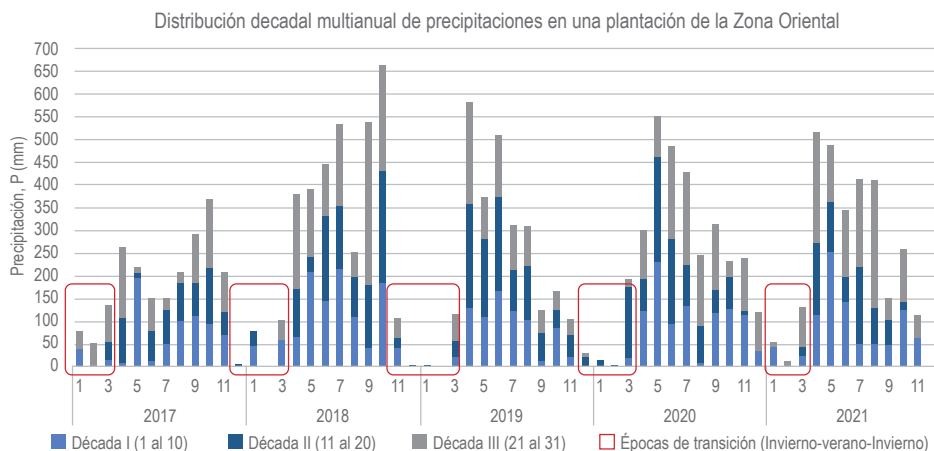


Figura 15. Distribución decadal multianual de precipitaciones en una plantación de la Zona Oriental.

Nota: Las décadas corresponden a periodos de 10 días consecutivos de precipitación acumulada.

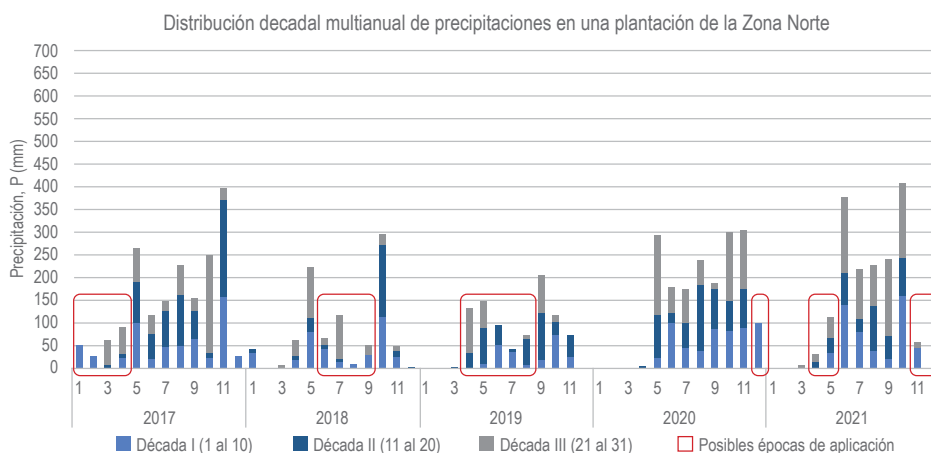


Figura 16. Distribución decadal multianual de precipitaciones en una plantación de la Zona Norte.

Nota: Las décadas corresponden a periodos de 10 días consecutivos de precipitación acumulada.

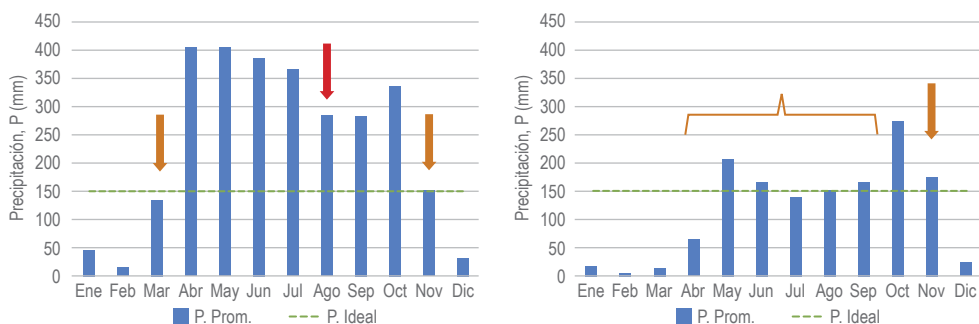


Figura 17. Identificación de posibles momentos para la ejecución de labores de fertilización.

Para programar las aplicaciones de fertilizantes es importante contar con históricos de datos confiables de precipitación (mm día^{-1}), preferiblemente de los últimos diez años. Los datos pueden ser obtenidos de estaciones meteorológicas o pluviómetros bien mantenidos y, con estos, se busca determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos de lluvia (Goh y Härdter, 2003).

Duración de las ventanas de aplicación

Si bien con los históricos de precipitación se pueden identificar, de manera general, las ventanas de aplicación en un año, es necesario definir un criterio o indicador práctico que permita determinar la duración de cada ventana, teniendo en cuenta la incertidumbre que pueda existir en variables climáticas como la precipitación.

De acuerdo con las particularidades que puedan presentarse, suelos con una buena condición de drenaje requieren entre 48 y 72 h para evacuar excesos de humedad. En los escenarios de tiempos o ventanas de aplicación reducidas es recomendable realizar fraccionamientos para evitar la lixiviación de nutrientes de fuentes nitrogenadas y potásicas. Una condición ideal para la aplicación de este tipo de fuentes, como lo son el nitrógeno (N) y el potasio (K), son días nublados, con poco viento y con precipitaciones entre 10 y 20 mm para evitar su lixiviación (Owen, 1992; Fairhurst, 2010). En el caso de fuentes nitrogenadas como la urea, no es recomendable aplicarla al suelo seco, ni tampoco cuando las lluvias sean menores a 5 mm día^{-1} posterior a su aplicación (Goh y Härdter, 2003). De acuerdo con los autores mencionados, por una parte, los fertilizantes nitrogenados deben ser aplicados entre 3 y 4 meses antes del inicio de las épocas secas y, por otra, cantidades mayores a 500 g/palma deberían fraccionarse con la finalidad de minimizar las pérdidas por lixiviación, especialmente cuando se realizan aplicaciones previas o durante periodos intensos de precipitación. La aplicación de fertilizantes debe evitarse durante los meses con altas probabilidades que excedan 250 mm mes^{-1} y con más de 15 días de lluvias. Las pérdidas de fertilizantes de fósforo (P), potasio (K) y magnesio (Mg) solubles, asociadas a la escorrentía, son menores si se aplican en meses con menos de 100 mm mes^{-1} (Goh *et al.*, 2003).

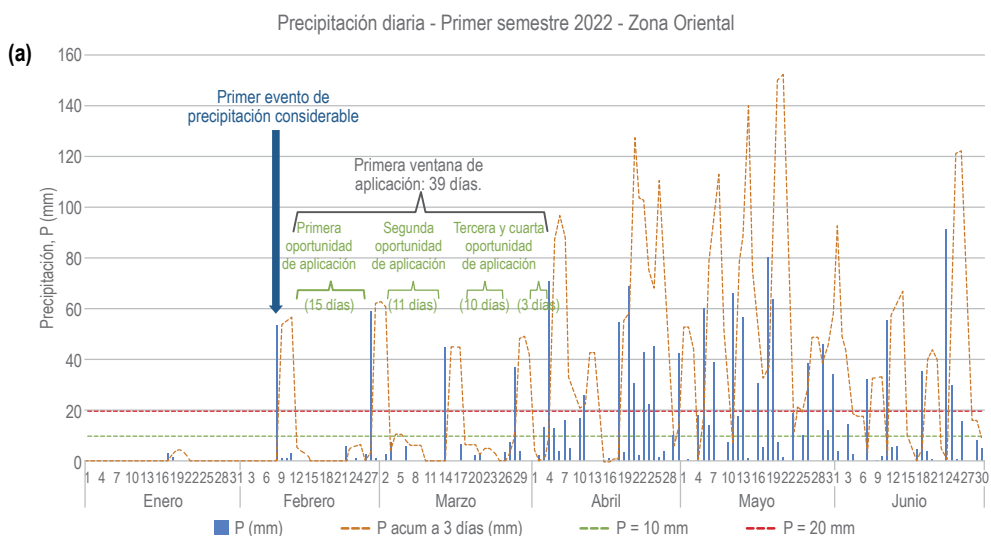
Dado lo anterior, se sugiere hacerle seguimiento a la precipitación diaria y adoptar como criterio precipitaciones acumuladas entre 10 y 20 mm (o cercanos) para un periodo de 3 días (Figura 18). Lo anterior, complementado con la consulta de pronósticos del clima emitidos por fuentes oficiales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)³ que permitan tener mayor certeza

3 Ver IDEAM (s.f.): <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/aplicaciones-meteorologicas>

de las probabilidades de ocurrencia de eventos lluviosos que puedan interferir con el desarrollo de la labor. La consulta de estos pronósticos contribuye a la toma de decisiones en relación con la pertinencia de realizar una campaña de fertilización para un momento determinado.

A manera de ejemplo, al revisar en detalle la precipitación diaria del primer semestre de 2022 en la plantación ubicada en la Zona Oriental (Figura 18 (a)), el primer evento considerable de lluvias ocurrió el 8 de febrero (53,8 mm). Las precipitaciones de los 3 días posteriores correspondieron a ligeras lloviznas inferiores a 3 mm. De esta manera, la precipitación acumulada para el 12 de febrero fue de 5,40 mm, condición propicia para iniciar la ejecución de labores asociadas a la fertilización del cultivo y, a su vez, el inicio de la primera ventana de aplicación del año.

Tanto en la Zona Oriental como en la Norte se identificaron cuatro periodos de tiempo u oportunidades de aplicación durante el primer semestre de 2022. En la Zona Oriental (Figura 18 (a)) la ventana de aplicación comprendida entre febrero y marzo fue de 39 días, dividida en cuatro oportunidades de aplicación, tiempo que sería el disponible para ejecutar la aplicación de un fraccionamiento del plan de nutrición. En cuanto a la ventana de aplicación en condiciones de la Zona Norte, durante el primer semestre de 2022, esta se estableció en 35 días, entre los meses de abril y mayo principalmente, igualmente segmentada en cuatro oportunidades de aplicación (Figura 18 (b)).



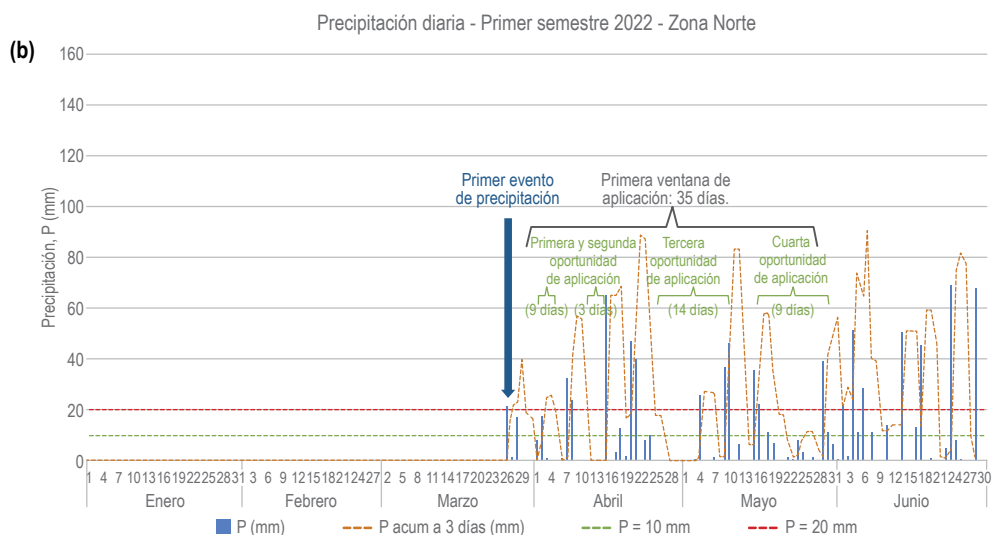


Figura 18. Precipitación diaria (semestre I – 2022) y posibles oportunidades de aplicación que conforman la primera ventana de tiempo para ejecutar labores asociadas a la fertilización del cultivo. (a) Condición de la Zona Oriental; (b) condición de la Zona Norte.

Bibliografía

- Arias, N. (2019). Indicadores y eficiencia de la nutrición para la toma de decisiones. *Palmas*. 40(4), 128-139. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/12963/12813>
- Arias, N. y Beltrán G. (2010). *Diseño y evaluación del programa de manejo nutricional en palma de aceite: tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite. Guía para facilitadores*. <http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107625>
- Cayón, D. (1999) Apuntes sobre fisiología del crecimiento y desarrollo de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Palmas*, 20(3), 43-54. <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/710/710>
- Eiza, M. y Carfagno, P. (2018). Medición de la infiltración en el suelo. Infiltrómetro de anillo simple y simulador de lluvias. *Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos* (pp. 25-37) Ediciones INTA. <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/3834>
- Fairhurst, T. (2010). Algunas prácticas de manejo para máximo rendimiento en cultivos maduros de palma de aceite. *Palmas*, (31)Especial, 44- 72. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1515>
- FAO. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>

- Goh, K.-J., Härdter, R. y Fairhurst, T. (2003). Fertilización para un beneficio máximo. En T. Fairhurst y R. Härdter (Ed.), *Palma de Aceite: Manejo para Rendimientos Altos y Sostenibles* (pp. 307-336). International Plant Nutrition (IPNI). [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/A2B341EACE9244F9852579DD0071F80E/\\$FILE/Libro%20de%20palma%20+%20contenido%201.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/A2B341EACE9244F9852579DD0071F80E/$FILE/Libro%20de%20palma%20+%20contenido%201.pdf)
- Goh, K.-J. y Härdter, R. (2003). Nutrición General de la Palma de Aceite. En T. Fairhurst y R. Härdter (Ed.), *Palma de aceite: Manejo para Rendimientos Altos y Sostenibles* (pp. 213-256). International Plant Nutrition (IPNI). [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/A2B341EACE9244F9852579DD0071F80E/\\$FILE/Libro%20de%20palma%20+%20contenido%201.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/A2B341EACE9244F9852579DD0071F80E/$FILE/Libro%20de%20palma%20+%20contenido%201.pdf)
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press. <https://dewagumay.files.wordpress.com/2011/12/environmental-soil-physics.pdf>
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70085/70060838.2002.pdf>
- Jiménez, J. y Arias, N. (2021). *Aspectos básicos para el conocimiento de sistemas de drenajes y su mantenimiento en el cultivo de la palma de aceite*. Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma. <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/141164>
- León, S., L. A. (2004). Características, uso y manejo de fertilizantes para palma de aceite. *Palmas*, (25)Especial, 105-114. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1072>
- Molina, D. y Stember, J. (2015). *Caracterización y adecuación de suelos para el establecimiento del cultivo de la palma de aceite*. Cenipalma y Fedepalma. <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107596>
- Montenegro, H. y Malagón, D. (1990). *Propiedades Físicas de los Suelos*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Mosquera-Montoya, M., Ruiz-Álvarez, E., Munévar-Martínez, D.E., Guerrero, Á., Cala, S., Silva, A. y Arteaga, J.S. (2023). Estudio de costos de producción 2022 para plantaciones de palma de aceite referentes por su productividad. *Palmas*. (En proceso de publicación).
- Munévar, F., 2001. Fertilización de la palma de aceite para obtener altos rendimientos. *Revista Palmas* [en línea], vol. 22, no. 4, pp. 9-17. ISSN 0121-2923. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/888>.
- Munévar, F., Franco, P.N. y Arias, N.A., 2016. *Guía general para el muestreo foliar y de suelos en palma de aceite* [en línea]. 3a edición. Bogotá: Boletín Técnico 37. Fedepalma. ISBN 978-958-8360-58-4. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/view/11857/11853>.

- Owen, E.J. (1992). Fertilización de palma africana "*Elaeis guineensis* Jacq." en Colombia. *Palmas*, (13)2, pp. 39-64. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/344>
- Prabowo, N., Foster, H., Nelson, S. y Sitepu, B. (2013). 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. *Palmas*, (34)Especial, pp. 221-242. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10684/10669>
- Rey, L., Ayala, I., Ruiz, R. y Gómez, P. (2006). Boletín Técnico No. 20. Selección de palmas de aceite élite en plantaciones comerciales de Colombia. Primera. Bogotá, Colombia: Cenipalma.
- RSPO. (2013). *Principios y criterios para la producción de aceite de palma sostenible*. RSPO. <https://www.rspo.org/file/021013P&C2013SPANISHFINAL.pdf>
- Ruiz, R., Motta, D. y Romero, H. (2013). *Estimativos de producción para determinar el potencial productivo de racimos de fruta fresca*. Cenipalma. <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/81090>
- Stewart, W. (2007). Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*, (67). International Plant Nutrition Institute - IPNI. [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/EC5D7D4A78BB6D6D852579A3006CB4D4/\\$FILE/Consideraciones%20en%20el%20Uso%20Eficiente%20de%20Nutrientes.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/EC5D7D4A78BB6D6D852579A3006CB4D4/$FILE/Consideraciones%20en%20el%20Uso%20Eficiente%20de%20Nutrientes.pdf)
- USDA. (2000). *Cálculo de la humedad del suelo por tacto y apariencia*. USDA. <https://nrcspad.sc.egov.usda.gov/distributioncenter/pdf.aspx?productID=258>
- Zakaria, Z.Z. (1998). Manejo de suelos y fertilizantes en plantaciones de palma de aceite en Malasia. *Palmas*, (19) Especial, pp. 207-217. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/666/666>