COLOMBIA POTENCIA DE LA VIDA

AGROSAVIA EDITORIAL

Recursos genéticos y mejoramiento de la palma de aceite en AGROSAVIA, Colombia

Compiladores

Silvio Bastidas Pérez
Rafael Reyes Cuesta
Clara Inés Medina Cano



30 AÑOS AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

Recursos genéticos y mejoramiento de la palma de aceite en AGROSAVIA, Colombia

Compiladores

Silvio Bastidas Pérez
Rafael Reyes Cuesta
Clara Inés Medina Cano

AGROSAVIA
EDITORIAL

AGROSAVIA

Corporación colombiana de investigación agropecuaria

Recursos genéticos y mejoramiento de la palma de aceite en AGROSAVIA Colombia. / Silvio Bastidas Pérez [y otros veintidós]. -- Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2023.

416 páginas (Colección Estudios Agropecuarios)
Incluye referencias bibliográficas, fotografías y gráficos.
ISBN e-Book: 978-958-740-662-7

1. *Elaeis guineensis* 2. Recursos genéticos 3. Fitomejoramiento 4. Germoplasma 5. Ecofisiología 6. Palinología 7. Manejo integrado de plagas

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).
Centro de Investigación La Selva, kilómetro 7, vía Rionegro-Las Palmas, sector Llanogrande, Rionegro, Antioquia. Código postal 054040, Colombia.
Centro de Investigación Palmira, diagonal a la intersección de la carrera 36A con calle 23, Palmira, Valle del Cauca. Código postal 763533, Colombia.
Centro de Investigación Caribia, corregimiento de Sevilla, municipio Zona Bananera, departamento del Magdalena, 65 km al sur de la capital, Santa Marta. Código postal 478037, Colombia.
Centro de Investigación El Mira, kilómetro 38, vía Tumaco-Pasto, Nariño. Código postal 528517, Colombia.
Centro de Investigación Tibaitatá, kilómetro 14, vía Mosquera-Bogotá, Mosquera. Código postal 250047, Colombia.

Esta publicación es resultado de investigación del proyecto "Sistema Bancos de Germoplasma de la Nación colombiana para la alimentación y la agricultura transversal a las redes de innovación" (Convenio 2012). Recurrente Agrosavia-ICA-MADR.

Colección Estudios Agropecuarios
Tipología: Obras de Investigación

Fecha de recepción: 28 de junio 2021
Fecha de evaluación: 5 de mayo de 2022
Fecha de aceptación: 22 de agosto de 2022

Publicado: noviembre de 2023

Preparación editorial

Editorial AGROSAVIA
editorial@agrosavia.co
Dirección editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz
Edición: Liliana Gaona García
Corrección de estilo: Andrés Castillo Brieva
Diseño: Mónica Cabiativa
Diagramación: María Paula Berón Ramírez

Citación sugerida: Bastidas Pérez, S., Reyes Cuesta, R., & Medina Cano, (comp.) (2023). *Recursos genéticos y mejoramiento de la palma de aceite en AGROSAVIA, Colombia.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7406627

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones y de la información recogida en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación. Igualmente, expresan que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros, relativa a los derechos de autor u otros derechos que se vulneren como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co



https://co.creativecommons.org/?page_id=14

Contenido

Los autores 15

Reconocimiento 29

Prólogo 31

Sección I. Recursos genéticos y fitomejoramiento 33

Capítulo 1. Recursos genéticos de la palma de aceite en AGROSAVIA 35

Clara Inés Medina C., Mario Lobo A., Silvio Bastidas P., Leidy P. Moreno C.

Capítulo 2. Germoplasma de palma de aceite usado en procesos de mejoramiento 61

Clara Inés Medina C., Mario Lobo A., Silvio Bastidas P., Leidy P. Moreno C.

Capítulo 3. Procedimiento técnico para el sistema de selección recurrente modificado en palma de aceite 97

Silvio Bastidas Pérez

Capítulo 4. Resultados del primer ciclo de selección recurrente aplicado al mejoramiento genético de la palma de aceite en AGROSAVIA 129

Silvio Bastidas Pérez, Eduardo Peña Rojas, Rafael Reyes Cuesta

Capítulo 5. Resultados del primer ciclo de hibridación entre palmas de las especies *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés y *Elaeis guineensis* Jacq. 159

Silvio Bastidas P., Rafael Reyes C., Yesith Montero C., Leidy Paola Moreno C., William Tolosa M., Isueh Arenas R., Iván Gutiérrez B.

Sección II. Rol de otras disciplinas en el mejoramiento genético de la palma de aceite en AGROSAVIA 191

Capítulo 6. Ecofisiología y mejoramiento genético de la palma de aceite 193

Rafael Reyes Cuesta, Lizardo Norbey Ibarra Ruales

Capítulo 7. Palinología de las palmas de aceite africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) y americana (Elaeis oleifera [Kunth] Cortés) 249

Vanessa Rendón C., Clara Inés Medina C., Mario Lobo A., Silvio Bastidas P., Ramiro Fonnegra G.

Capítulo 8. Papel del mejoramiento genético en el manejo de disturbios fitosanitarios que afectan a las palmas de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. y *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés 265

Eduardo A. Peña Rojas, Silvio Bastidas Pérez, Rafael Reyes Cuesta

Sección III. Metodologías no convencionales usadas en el mejoramiento genético y la conservación de la palma de aceite en AGROSAVIA 321

Capítulo 9. Pruebas de progenies F2 y metodología para el mejoramiento acelerado de la palma de aceite 323

Silvio Bastidas P., Eduardo Peña R., Rafael Reyes C.

Capítulo 10. Los marcadores moleculares en la investigación de los recursos genéticos y fitomejoramiento de la palma de aceite 349

Luz Stella Barrero, Gerardo Gallego, Harold Suárez-Barón, Myriam Duque, Jaime A. Osorio Guarín, Erick Hernández, Felix E. Enciso Rodríguez, Gina A. Garzón Martínez, Leidy Paola Delgadillo Durán, Silvio Bastidas

Capítulo 11. Respuesta de embriones cigóticos de palma americana de aceite (*Elaeis oleifera* [Kunth] Cortés) y de los híbridos O × G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) crioconservados en nitrógeno líquido y su aplicabilidad 379

Alba Lucía Villa, Silvio Bastidas

Lista figuras

Figura 1.1 Colecciones de trabajo de palma *E. guineensis* ubicadas en el C. I. El Mira 40

Figura 1.2 Bancos de Germoplasma de palma de aceite 42

Figura 1.3 Pigmentación de la epidermis del fruto 48

Figura 1.4 Coloración del fruto de *E. oleifera* 49

Figura 1.5 Presencia de envoltura carnosa 50

Figura 2.1 Ejemplares de palma de aceite en el parque principal de Mocoa, Putumayo 66

Figura 2.2 Genealogía de los recursos genéticos de origen africano del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA 69

Figura 2.3 Colecciones de germoplasma en el C. I. El Mira 71

Figura 2.4 Genealogía de los recursos genéticos de origen asiático del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA 72

Figura 2.5 Genealogía de los recursos genéticos de origen americano del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA 77

Figura 2.6 Establecimiento de la colección de trabajo en el C. I. Palmira 80

Figura 2.7 Colección de trabajo de la palma *Elaeis guineensis* 80

Figura 3.1 Representación esquemática del SSR aplicado a dos poblaciones contrastantes de la palma de aceite *Elais guineensis* del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA 101

Figura 3.2 Identificación del tipo de palma según grosor de endocarpio 115

Figura 4.1 Detalles del sistema de selección recurrente modificado, aplicado al mejoramiento genético de la palma de aceite en AGROSAVIA 135

Figura 4.2 Procedencia de germoplasma *E. guineensis* tipo Dura de AGROSAVIA 152

Figura 5.1 Detalles del sistema de selección recurrente modificado, aplicado al mejoramiento genético de las especies *E. oleifera, E. guineensis* y la producción de híbridos entre palmas de las dos especies en AGROSAVIA 163

Figura 5.2 Tipo de palma *E. oleifera* 165

Figura 5.3 Parcela de híbrido O × G Corpoica Elmira

Figura 5.4 Precocidad de floración y fructificación, cultivar O × G Corpoica Elmira 179

Figura 6.1 Fisiología de la función productiva en palma de aceite 203

Figura 6.2 Comportamiento del diámetro de bulbo de plantas de vivero en cultivares de palma de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia) 204

Figura 6.3 Comportamiento de altura de plantas de vivero en cultivares de palma de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia) 205

Figura 6.4 Curva diaria de asimilación de CO_2 (Fn) en vivero de cuatro cultivares de palma africana Ténera en suelo franco-arcillo-limoso, Tumaco, Nariño (Colombia) 223

Figura 6.5 Curva diaria de asimilación de CO_2 (Fn) en vivero de cuatro cultivares de palma africana Ténera en suelo arenoso franco, Tumaco, Nariño (Colombia) 223

Figura 6.6 Curva diaria de asimilación de CO_2 (Fn) en campo de palma africana Ténera en suelo arenoso franco, Tumaco, Nariño (Colombia) 224

Figura 6.7 Curva diaria de potencial hídrico de la hoja (ψ_h) en palma africana de aceite Ténera, etapas vivero y campo, Tumaco (Colombia) 224

Figura 6.8 Curva diaria de radiación fotosintéticamente activa (RFA) en cultivos de palma africana de aceite Ténera, etapas vivero y campo, Tumaco, Nariño (Colombia) 225

Figura 6.9 Curva diaria de déficit de presión de vapor de agua en el aire (DPV) en cultivos de palma africana de aceite Ténera, etapas de vivero y campo, Tumaco, Nariño (Colombia) 225

Figura 6.10 Curva diaria de transpiración (T) de palma africana de aceite Ténera, etapa de vivero, en suelo franco-arcillo-limoso, Tumaco, Nariño (Colombia) 226

Figura 6.11 Relación entre potencial hídrico del suelo a 10 y 20 cm de profundidad en función del tiempo, Tumaco, Nariño (Colombia) 227

Figura 6.12 Relación entre el potencial hídrico del suelo y la fotosíntesis neta, entre las diez y once horas, durante 70 días de secamiento del suelo, para plantas de cuatro cultivares de palma africana de aceite Ténera (Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi), sembradas en dos tipos de suelo: franco-arcillo-limoso y arenoso franco (Tumaco, Colombia) 229

Figura 6.13 Comportamiento de la fotosíntesis neta (diez a once horas) en cuatro cultivares de palma africana de aceite Ténera para distintas interacciones, Tumaco, Nariño (Colombia) 231

Figura 6.14 Valores de la biomasa total de la palma para la interacción suelo × tratamiento en plantas de cuatro cultivares de palma africana de aceite Ténera (Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros, Deli × Yangambi) en dos tipos de suelo, Tumaco, Colombia 232

Figura 7.1 Inflorescencias de palma de aceite 250

Figura 7.2 Forma de los granos de polen *Elaeis guineensis* (Dura) 252

Figura 7.3 Granos de polen de palma nolí (*Elaeis oleifera*) 254

Figura 7.4 Granos de polen germinados en un medio con agar al 1 % y diferentes concentraciones de sacarosa, nitrato de calcio ($Ca[NO_3]_2$) y ácido bórico (H_3BO_3) 256

Figura 8.1 Manejo de mancha anular (MA) y anillo clorótico (AC) 284

Figura 8.2 Síntomas de marchitez sorpresiva 289

Figura 8.3 Mancha foliar asociada a *Uwemyces elaeidis* 296

Figura 9.1 Representación gráfica de un ciclo convencional de selección en la palma de aceite *E. guineensis* 324

Figura 9.2 Representación gráfica de un ciclo completo para una PPF2 en la palma de aceite *E. guineensis* 326

Figura 9.3 Procedimiento de campo para desarrollar las PPF2 en la palma de aceite *E. guineensis* 329

Figura 10.1 Variabilidad alélica observada para el marcador sMo00138 en parte de la población bajo estudio, correspondiente a híbridos de *E. guineensis* × *E. oleifera*. Los productos de reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés) fueron visualizados en geles de acrilamida al 6 % (urea 5 M) de acuerdo con el protocolo de Bassam et al. (1991) 359

Figura 10.2 ACM de datos genotípicos que muestran la distribución espacial de 362 muestras de palma de aceite. a. Distribución espacial de las 362 muestras 363

Figura 10.3 ACM de datos moleculares en el que se marcaron las muestras por colores para las variables (*E. guineensis* se muestra a la izquierda de cada figura [color rojo en a y b, y verde en c], *E. oleifera* a la derecha [color verde en a y b, y rojo en c] y los híbridos y retrocruzas en el intermedio [colores azul y naranja, respectivamente]) 364

Figura 10.4 Análisis *neighbor-joining* y de componentes principales (ACP) en 96 genotipos de palma de aceite 368

Figura 10.5 Distribución espacial de los tres primeros componentes principales en la población de híbridos O × G y parentales. Se observa una clara separación entre los parentales y los híbridos 370

Figura 10.6 Árbol de distancias genéticas generado con el método de agrupamiento de *neighbor joining*, en el que se observan tres grupos, dos que conforman subgrupos cercanos al parental resistente *E. oleifera* (A [subgrupos B, D, E y F]) y al parental susceptible *E. guineensis* (G [subgrupos H, I, J, K, L M y N]), y un tercer grupo intermedio, situado entre los dos parentales (O) 371

Figura 11.1 Proporción de germinación de las diferentes estructuras que componen el embrión en las cuatro accesiones de *E. oleifera* 389

Figura 11.2 Embrión de cuatro semanas de la accesión EM5007N, crioconservado durante seis meses. Se observa la plúmula formada, el haustorio (izquierda) afectado en su extremo (tejido muerto de color blanco) aunque no en su totalidad, y sin formación de radícula (derecha) 390

Figura 11.3 Proporción de germinación de las estructuras de los embriones de *E. oleifera* secados durante dos horas en gel de sílice 391

Figura 11.4 Comparación entre las proporciones de germinación de las estructuras plúmula, radícula y haustorio para los embriones sin secado (germinados) y con secado en sílica gel por dos horas 394

Figura 11.5 Plántula solo con plúmula sin desarrollo de radícula y haustorio, en la que se evidencia alta oxidación 395

Figura 11.6 Probabilidad de formación de plúmula en embriones de cuatro accesiones de *E. oleifera* en función del tiempo de almacenamiento en nitrógeno líquido 396

Figura 11.7 Proporción de germinación de plúmula en las cuatro accesiones de *E. oleifera* crioconservadas a lo largo del tiempo (días) 397

Figura 11.8 Probabilidad de formación de radícula en embriones de cuatro accesiones de *E. oleifera* en función del tiempo de almacenamiento en nitrógeno líquido. 398

Figura 11.9 Proporción de germinación de radícula en las cuatro accesiones de *E. oleifera* crioconservadas a lo largo del tiempo (días) 399

Figura 11.10 Probabilidad de formación de haustorio en embriones de cuatro accesiones de *E. oleifera* en función del tiempo de almacenamiento en nitrógeno líquido 400

Figura 11.11 Proporción de germinación de haustorio en las cuatro accesiones de *E. oleifera* crioconservadas a lo largo del tiempo (días) 401

Figura 11.12 Desarrollo heterogéneo de los embriones crioconservados en nitrógeno líquido 402

Figura 11.13 Esquema del protocolo para rescate de embriones, germinación *in vitro* y formación de plantas de *E. oleifera* e híbridos *E. oleifera* × *Elaeis guineensis* 404

Figura 11.14 Esquema del protocolo para criopresevación en nitrógeno líquido, rescate de embriones, germinación *in vitro* y formación de plantas de *E. oleifera* e híbridos *E. oleifera* × *E. guineensis* 405

Figura 11.15 Proceso de endurecimiento y adaptación, manejo en previvero y vivero, establecimiento y mantenimiento en campo de plantas del híbrido *E. oleifera* × *E. guineensis*, obtenidas mediante criopresevación en nitrógeno líquido, rescate y germinación *in vitro* de embriones, y formación de plantas (C. I. El Mira, Tumaco) 406

Lista de tablas

Tabla 1.1 Condiciones climáticas asociadas a cada una de las cuatro zonas palmeras de Colombia (promedios departamentales y municipales) 37

Tabla 1.2 Inventario de las tres colecciones de palma de aceite conservadas en el Banco de Germoplasma, después de su redimensionamiento y reubicación 40

Tabla 1.3 Número de accesiones de dos especies de palma de aceite y sus híbridos conservados en las colecciones del Banco de Germoplasma de AGROSAVIA 44

Tabla 2.1 Características de diez palmas Dura F1 empleadas en la obtención de las progenies Dura F2 de las colecciones de trabajo de *E. guineensis* situadas en el C. I. La Libertad, Villavicencio, departamento del Meta, y en el C. I. Palmira, departamento del Valle del Cauca (promedios de cinco años de producción) 82

Tabla 2.2 Características de las familias Ténera × Ténera*, de las cuales se originaron las progenies Ténera/Pisífera F3 de las colecciones de trabajo de *E. guineensis* situadas en el C. I. La Libertad, Villavicencio, departamento del Meta, y en el C. I. Palmira, departamento del Valle del Cauca (promedios de cinco años de producción) 82

Tabla 2.3 Características de racimos y frutos de las diez palmas superiores en cuanto a contenido de aceite en los racimos de la palma americana de aceite (*E. oleifera*), de la colección de trabajo ubicada en el C. I. El Mira, Tumaco 83

Tabla 2.4 Características del aceite de 30 progenies F1 de la palma nolí (*Elaeis oleifera* [Kunth] Cortés) de la colección de trabajo, conservadas en el C. I. El Mira, Tumaco 84

Tabla 3.1 Características y criterios de selección combinada en cada una de las poblaciones del sistema de selección recurrente modificado (SSRm) 104

Tabla 3.2 Plan de cruzamientos entre palmas tipo Dura con base en un diseño de apareamientos Carolina Norte 1 108

Tabla 3.3 Plan de cruzamientos entre palmas tipo Ténera con base en un diseño de apareamientos Carolina Norte 1 109

Tabla 3.4 Proporciones teóricas de segregación en dos diferentes tipos de cruzamiento entre *Elaeis guineensis* para obtener palmas Pisífera 114

Tabla 3.5 Criterios para clasificar palmas de tipo Pisífera por su grado de fertilidad 118

Tabla 3.6 Ejemplo de un diseño de cruzamientos Carolina Norte 1, donde *N* familias Ténera se emplean en prueba de progenies, y *n* palmas Pisífera son valoradas, cada una de acuerdo con cinco palmas Dura seleccionadas por su buen desempeño productivo 119

Tabla 4.1 Características cuantitativas de las familias Dura × Dura seleccionadas en el C. I. El Mira como fuentes de progenitores madre Dura F1, con base en los promedios de las palmas seleccionadas por familia (promedios de cinco años de producción) 137

Tabla 4.2 Características determinantes de la producción de aceite de diez palmas Dura F1 superiores dentro de familias seleccionadas Ténera × Ténera (promedios de cinco años de producción) 138

Tabla 4.3 Características determinantes de la producción de aceite de las diez mejores palmas Dura F1 seleccionadas dentro de las familias descartadas (promedios de cinco años de producción) 139

Tabla 4.4 Criterios para agrupar las palmas Dura seleccionadas 140

Tabla 4.5 Características expresadas por las palmas Dura y Ténera segregadas por diez familias Ténera × Ténera seleccionadas en la población de origen africano 142

Tabla 4.6 Características determinantes de la producción de aceite de las diez mejores palmas Ténera F1 seleccionadas en las familias (promedios de cinco años de producción) 144

Tabla 4.7 Palmas Pisífera medianamente fértiles, preseleccionadas como progenitores padres en progenies Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera 145

Tabla 4.8 Potencial de producción de aceite de 38 progenies D × P en el C. I. El Mira, Tumaco, estimaciones en laboratorio 147

Tabla 4.9 Comportamiento productivo de las progenies Ténera F1 en pruebas comerciales en las zonas palmeras occidental y oriental del país (tonelada de fruto/ha) 148

Tabla 4.10 Comportamiento de las progenies Ténera en cuanto a composición de frutos, calidad de aceite y desarrollo morfológico en el C. I. El Mira, Tumaco 149

Tabla 4.11 Plan de cruzamientos Dura F2 × Dura F2 con el fin de generar variabilidad y evitar endogamia no planificada en la colección de trabajo de la palma de aceite de AGROSAVIA 151

Tabla 5.1 Características relacionadas con la producción de aceite de quince palmas Nolí Cereté, seleccionadas para generar progenies nolí F1 × nolí F1 167

Tabla 5.2 Potencial de producción de racimos de fruta fresca (RFF) de ocho cruzamientos del híbrido O × G Corpoica Elmira en PEA, C. I. Caribia, Zona Bananera, Magdalena 174

Tabla 5.3 Potencial de producción de racimos de fruta fresca (RFF) de ocho cruzamientos del híbrido O × G Corpoica Elmira en PEA, C. I. El Mira, Tumaco, Nariño 175

Tabla 5.4 Potencial de producción de aceite del híbrido O × G Corpoica Elmira en los C. I. El Mira, Tumaco (Nariño), y Caribia, Zona Bananera (Magdalena) 177

Tabla 6.1 Variables climáticas requeridas para el cultivo de palma de aceite 196

Tabla 6.2 Variables de crecimiento de plantas de vivero en bolsas plásticas, de cultivares de palma de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia) 204

Tabla 6.3 Características de la hoja 4 de plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS 205

Tabla 6.4 Distribución de la biomasa de plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS 206

Tabla 6.5 Razones de área y peso foliar, parte aérea, sistema radical y área foliar específica, de plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS 207

Tabla 6.6 Biomasa de la hoja y su distribución en plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS 208

Tabla 6.7 Ecuaciones y modelos para estimar el área de la hoja (A) y su peso seco (W), en plantas de vivero en bolsas plásticas de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS 209

Tabla 6.8 Ecuaciones para estimar diámetro de bulbo (DB) y altura de planta (AP) en plantas de vivero en bolsas plásticas de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia) 209

Tabla 6.9 Características físicas de los dos tipos de suelo de Tumaco, Nariño (Colombia), empleados en el estudio 210

Tabla 6.10 Características de crecimiento de plantas de vivero de palma africana de aceite en materos plásticos y con dos tipos de suelo en Tumaco, Nariño (Colombia), 499 DDS 211

Tabla 6.11 Características de la hoja 4 de plantas de vivero de palma africana de aceite en materos plásticos y con dos tipos de suelo en Tumaco, Nariño (Colombia), 499 DDS 212

Tabla 6.12 Ecuaciones que describen el crecimiento de plantas de vivero de palma africana en materos plásticos y con dos tipos de suelo en Tumaco, Nariño (Colombia) 213

Tabla 6.13 Biomasa de raíces, parte aérea y razón parte aérea sistema radical (PA/SR) de las palmas de aceite híbrido O × G y Ténera D × P en vivero, en Tumaco, Nariño (Colombia), 330 DDS 214

Tabla 6.14 Materiales genéticos de palma de aceite evaluados 215

Tabla 6.15 Valores de biomasa de seis genotipos de palma de aceite en dos ambientes de manejo agronómico del vivero (modificado, tradicional), 218 DDSV, Tumaco, Nariño (Colombia) 216

Tabla 6.16 Tasas de producción de materia seca y de crecimiento relativo de raíces de palma africana de aceite (*Elaeis guineensis*) de 1 a 30 años de edad, Tumaco, Nariño (Colombia) 218

Tabla 6.17 Valores de fotosíntesis neta (Fn) determinada en la hoja 4 de palma africana Ténera en vivero, por tipo de suelo y genotipo, Tumaco, Nariño (Colombia) 230

Tabla 6.18 Fotosíntesis neta (Fn) determinada en la hoja 9 en estudio de campo sobre el efecto de la disponibilidad de agua en la fisiología de la palma africana Ténera en suelo arenoso franco (A. Fr.), Tumaco, Nariño (Colombia) 233

Tabla 7.1 Porcentaje de germinación del polen de *E. guineensis* y *E. oleifera* en seis medios de crecimiento, con variación de dos de sus componentes y porcentajes de germinación para las especies 257

Tabla 8.1 Enfermedades y complejos fitosanitarios (EyCF) que afectan a las plantaciones de palma de aceite en Colombia (*Elaeis guineensis, Elaeis oleifera* e híbridos *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) 267

Tabla 8.2 Comportamiento de materiales genéticos frente a pudrición del cogollo (PC) en Tumaco, Colombia, 2007 280

Tabla 8.3 Comportamiento de catorce materiales de palma de aceite *Elaeis guineensis* y dos del híbrido interespecífico O × G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) frente al disturbio de la pudrición de cogollo (PC) bajo condiciones de campo y en fase juvenil (0-24 meses), Tumaco, Colombia 281

Tabla 8.4 Identificación de los genotipos de palma de aceite *Elaeis guineensis* e híbridos O × G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) sometidos a prueba de susceptibilidad en vivero a las enfermedades mancha anular (MA) y anillo clorótico (AC), Tumaco, Colombia 285

Tabla 9.1 Recursos genéticos de la palma de aceite involucrados en las pruebas de progenies F2 331

Tabla 9.2 Primera generación de retrocruza entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*, mediante cruzamiento de palmas del híbrido O × G (F1) con polen de *E. guineensis* 332

Tabla 9.3 Segunda generación de retrocruza entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*, mediante cruzamiento de palmas de los híbridos RC1 con polen de *E. guineensis* 333

Tabla 9.4 Prueba de ji al cuadrado (X^2)para el porcentaje de segregación en las progenies de cinco RC1 334

Tabla 9.5 Comportamiento en campo de los híbridos O × G de primera generación de retrocruzamiento (RC1) entre las especies *E. guineensis* y *E. oleifera* con algunas características vegetativas y de producción 337

Tabla 9.6 Perfil lipídico de los aceites de las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*, promedios por ácido graso 338

Tabla 10.1 Descripción de muestras de tejido vegetal tomadas en centros de investigación de AGROSAVIA 357

Tabla 10.2 Características de los 27 marcadores SSR identificados como polimórficos 357

Tabla 10.3 Comparación entre el rango de tamaño de los alelos en pares de bases (PB) reportados por otros autores y los encontrados por Gallego et al. (2012) 360

Tabla 10.4 Heterocigosidad esperada (He)* para los diez marcadores microsatélites evaluados en 362 materiales de palma de aceite por Gallego et al. (2012) 362

Tabla 10.5 Resumen del análisis de variabilidad de cinco nuevos SSR y un control, de acuerdo con Barrero et al. (2013a) 366

Tabla 11.1 Promedio de humedad de las semillas de cuatro accesiones de palma americana (*E. oleifera*) 383

Tabla 11.2 Escala de evaluación de la viabilidad de palma de aceite tipo Ténera (Dura × Pisífera) 385

Tabla 11.3 Prueba de viabilidad (tetrazolium) de embriones cigóticos de cuatro accesiones de palma americana (*E. oleifera*) 385

Tabla 11.4 Prueba de X^2 para la germinación de las cuatro accesiones de *E. oleifera* establecidas *in vitro* 388

Tabla 11.5 Prueba de X^2 para los embriones sin secado y con secado en sílica gel de las cuatro accesiones de *E. oleifera* 393





Los autores

Clara Inés Medina Cano
Correo: cmedina@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3252-7005

Licenciada en Educación Agropecuaria de la Universidad de Antioquia, con especialización en Biotecnología Vegetal de la Universidad Católica de Oriente. Magíster en Ciencias (Ciencias Agrarias) con énfasis en Cultivos Tropicales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, y doctorado en Ciencias Agropecuarias, Área Agraria, con énfasis en Ecofisiología Vegetal de la Universidad Nacional de Colombia. Investigadora PhD asociada de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. Ha trabajado en el manejo y conservación de recursos genéticos de especies con semilla ortodoxa e intermedia; en la conservación, caracterización y utilización de recursos genéticos vegetales conservados en el Banco de Germoplasma de la Nación colombiana; en descriptores morfológicos para el conocimiento de la variabilidad de especies promisorias; en la caracterización ecofisiológica de frutales como lulo (*Solanum quitoense* Lam y *Vaccinium meridionale* Swart), y en la colecta y conformación de bancos de germoplasma para colecciones de trabajo y procesos de caracterización de mortiño (*Vaccinium meridionale* Swart) y fique (*Furcraea* sp.). Ha publicado más de 100 artículos en revistas nacionales e internacionales

Mario Lobo Arias (q. e. p. d.)

Ingeniero agrónomo de la Universidad de Caldas. Magíster en Ciencias de la Universidad Nacional. Investigador PhD pensionado de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, sede Centro de Investigación La Selva, con especialidad en recursos genéticos y mejoramiento vegetal. Trabajó en la conformación y desarrollo de los Bancos de Germoplasma de la Nación colombiana. Durante sus años de carrera profesional participó en investigación de recursos genéticos, premejoramiento y mejoramiento de especies frutales como lulo (*Solanum quitoense* Lam) y tomate de árbol (*Solanum betaceum*). Profesor universitario de la Universidad Nacional de Colombia. Ha publicado más de 280 artículos en revistas nacionales e internacionales.

Silvio Bastidas Pérez
Correo: silvio.bastidas@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3624-247X

Ingeniero agrónomo de la Universidad de Nariño. Magíster en Fitotecnia con énfasis en Genética y Fitomejoramiento de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Investigador máster pensionado de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, sede Palmira. Su área de interés es el mejoramiento genético de cacao (*Theobroma cacao*) y de palmáceas de interés económico y perennes, como palma de aceite (*Elaeis guineensis*), nolí (*Elaeis oleifera*), cocotero (*Cocos nucifera*) y chontaduro (*Bactris gasipaes*). También se interesa en la generación y ejecución de proyectos de investigación sobre estas especies y la conservación y mantenimiento del banco de germoplasma de palmáceas. Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas sobre palmáceas, en temas relacionados con manejo de su cultivo, y premejoramiento y mejoramiento de sus especies.

Eduardo Peña Rojas
Correo: epena@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-9970-5531

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Magíster en Ciencias con énfasis en Protección de Cultivos de la Universidad de Puerto Rico (Recinto de Mayagüez). Investigador máster pensionado de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, sede Palmira. Su área de interés es la protección vegetal de palmáceas de interés económico, como palma de aceite (*Elaeis guineensis*), nolí (*Elaeis oleifera*), cocotero (*Cocos nucifera*) y chontaduro (*Bactris gasipaes*). Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas sobre temas relacionados con el manejo agronómico e integrado de plagas en especies palmáceas de interés económico.

Rafael Reyes Cuesta
Correo: rreyes@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7574-6550

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Magíster en Ciencias (Fisiología Vegetal) de la Universidade Federal de Viçosa, Brasil, y doctor en Sistemas de Producción Agrícola Tropical Sostenible con énfasis en Ecofisiología de la Universidad de Costa Rica. Investigador PhD asociado de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, sede Palmira. Su área de interés es la ecofisiología, la fisiología de la producción y el mejoramiento fisiológico de palmáceas de interés económico y frutales perennes, como palma de aceite (*Elaeis guineensis*), nolí (*Elaeis oleifera*), cocotero (*Cocos nucifera*), chontaduro (*Bactris gasipaes*) y guanábana (*Annona muricata*). Ha formulado y ejecutado proyectos de investigación en palmáceas de interés económico y frutales, y de conservación y mantenimiento del banco de germoplasma de palmáceas.

Yesith Darith Montero Cantillo
Correo: ymonteroc@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-0521-2016

Ingeniero agrónomo egresado de la Universidad del Magdalena, Colombia. Profesional de apoyo a la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, sede Caribia, entidad a la que está vinculado desde 2008. En la actualidad se desempeña en la Red de Innovación de Cultivos Permanentes con las especies palmáceas de interés económico y especies forestales para usos múltiples. Lideró la evaluación para ampliación de registro del híbrido de palma O × G Corpoica Elmira y el clon de marañón (Mapiria) en la zona norte de Colombia, por medio de pruebas de evaluación agronómica. Así mismo, participa en los proyectos de guandul, y de renovación y conservación de los Bancos de Germoplasma Vegetal de la Nación de guayaba y mango.

Leidy Paola Moreno Caicedo
Correo: lpmoreno@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6225-0484

Ingeniera agrónoma de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá, con especialización en Cultivos Perennes Industriales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Fitomejoramiento de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Profesional de apoyo a la investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, sede Palmira. Ha adelantado trabajos de investigación en fenología, caracterización de progenies y mejoramiento de palma americana de aceite (*Elaeis oleifera*). Su área de interés es el mejoramiento genético y la producción de material de siembra de calidad de palmáceas de interés económico, como palma de aceite (*Elaeis guineensis*), nolí (*Elaeis oleifera*), los híbridos interespecíficos O × G y chontaduro (*Bactris gasipaes*).

William Tolosa Montaño
Correo: wtolosa@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2926-1621

Ingeniero agrónomo de la Universidad de Nariño. Candidato a magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Producción de Cultivos de la misma universidad. Profesional de investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, Centro de Investigación El Mira, Tumaco. Su área de interés es la multiplicación de material de siembra de calidad, manejo agronómico, transferencia de tecnología y protección vegetal de palmáceas de interés económico, en particular de las especies palma de aceite (*Elaeis guineensis*), nolí (*Elaeis oleifera*), cocotero (*Cocos nucifera*) y chontaduro (*Bactris gasipaes*).

Isueh Arenas Rubio
Correo: iarenas@agrosavia.co / issueh@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6841-0936

Ingeniera agrónoma de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá, magíster en Agroforestería y Agricultura Sostenible del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica, con experiencia en el desarrollo de alternativas de manejo agronómico de especies vegetales con posibilidad de tolerar altas temperaturas. En la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA coejecuta proyectos de investigación de palma aceitera en la región Caribe colombiana, dentro de los cuales se destacan: 1) "Pruebas de evaluación agronómica de los híbridos de palma de aceite provenientes de los cruces entre *Elaeis oleifera* y *Elaeis guineensis* (O × G)", 2) "Plan de vinculación del híbrido interespecífico O × G Corpoica Elmira como alternativa de producción para zonas afectadas por pudrición del cogollo con la implementación de vitrinas tecnológicas", 3) "Validación de la selección temprana de embriones de híbridos O × G provenientes de criopreservación", y d) "Generación de

híbridos O × G por medio de la utilización de recursos genéticos del Banco de Germoplasma de la Nación colombiana para la obtención de cultivares comerciales nacionales".

Iván Antonio Gutiérrez Berdugo
Correo: igutierrez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8091-4181

Agrónomo egresado de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia. Con 28 años de experiencia en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, en la actualidad apoya los proyectos de la Red de Innovación de Cultivos Permanentes relacionados con palma de aceite y especies forestales del Caribe colombiano, y los relacionados con las colecciones de mango y guayaba de los Bancos de Germoplasma de la Nación. Se encuentra vinculado a los proyectos del fríjol guandul en el Plan Nacional Semilla y de regeneración de 48 accesiones del Banco de Germoplasma. Del mismo modo, participa en todo el proceso de bancos forrajeros programados en el plan de vinculación "Implementación de estrategias de vinculación y transferencia de tecnología en la producción de cultivos forrajeros". Apoyó y participó en todo el proceso de certificación del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) de las prueba de evaluación agronómica (PEA) de palma de aceite para del hibrido O × G Corpoica Elmira en la zona norte de Colombia.

Lizardo Norbey Ibarra Ruales
Correo: lnibarrar@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1051-717X

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Fue profesional de apoyo a la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, sede Palmira, durante el periodo 2019-2020. Su área de interés es la formulación y ejecución de proyectos de investigación en fisiología

vegetal. Con experiencia en el empleo de equipos para determinar intercambio de gases en plantas, contenidos de humedad en tejido vegetal y suelo, y su interpretación. En AGROSAVIA apoyó y coejecutó el proyecto de investigación "Respuesta fisiológica y productiva de diferentes genotipos de material comercial Ténera de palma aceitera a variaciones en la disponibilidad de agua".

Vanessa Rendón C.
Correo: varendon@cispcolombia.org
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7729-7506

Ingeniera agropecuaria del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y especialista en Gerencia de Proyectos de la Corporación Universitaria de Asturias. Líder de proyectos en Il Comitato Internazionale per lo Sviluppo dei Popoli (CISP), Italia. Practicante y tesista de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA durante 2008, en el marco del proyecto "Desarrollo de pruebas agronómicas para certificar la tolerancia de algunos híbridos interespecíficos de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) al disturbio pudrición del cogollo en la zona palmera occidental de Colombia". Su tesis se enfocó en la caracterización de polen de palma de aceite (*Elaeis guineensis*), nolí (*Elaeis oleifera*) y los híbridos producto de cruzamientos entre ambas especies. Su área de trabajo en la actualidad es la dirección, monitoreo y seguimiento de proyectos sociales.

Ramiro Fonnegra Gómez
Correo: fonnegraramiro@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8218-8136

Biólogo de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Doctorado en Ciencias (Botánica) de la Universidade de São Paulo, Brasil. Profesor jubilado del Instituto de Biología de la Universidad de Antioquia. Coinvestigador en el grupo Ofidismo y Escorpionismo

y en el de Productos Naturales. Fue representante de las universidades públicas y privadas con programas de Biología ante la Sala Especializada de Productos Fitoquímicos y Suplementos Dietarios, Comisión Revisora, del Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (Invima). Ha publicado manuales y textos sobre botánica general, etnobotánica, palinología, taxonomía vegetal, plantas medicinales, plantas antiofídicas y cerca de 100 artículos en revistas nacionales e internacionales.

Luz Stella Barrero Meneses
Correo: lbarrero@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2138-8705

Licenciada en Biología y Química de la Universidad del Tolima. Magíster en Microbiología de la Universidad de los Andes. Doctora y posdoctora en Genética Vegetal de la Universidad Cornell. Investigadora PhD asociada de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, con experiencia en caracterización de germoplasma e identificación y aislamiento de genes y locus de rasgo cuantitativo (QTL) asociados con características de interés en diferentes cultivos mediante el uso de ómicas, mapeo genético y por asociación y edición de genes. Ha sido investigadora visitante de la Universidad Cornell, del Boyce Thompson Institute y del United States Department of Agriculture, Agricultura Resecar Servicie (USDA-ARS). Ha liderado estrategias de bioprospección, biotecnología y de bancos de germoplasma para la alimentación y agricultura en Colombia. Consultora del Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (CGIAR) y experta en foros del Convenio sobre Diversidad Biológica (CBD). Ha recibido varios reconocimientos, premios y becas nacionales e internacionales. Fue directora del Laboratorio de Genética Molecular Vegetal, asesora de la Dirección de Investigación y jefe del Departamento de Agrobiodiversidad de Corpoica (en la actualidad, AGROSAVIA).

Gerardo Gallego
Correo: g.gallego@cgiar.org
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9038-5669

Biólogo con énfasis en genética de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Doctor en Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia. Desde hace 29 años lidera el laboratorio de biotecnología del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Fue coordinador regional del proyecto "América Latina: construcción de capacidad multipaís en acatamiento del Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología (Brasil, Colombia, Costa Rica, Perú), Proyecto GEF/Banco Mundial, 2008-2012". Ha sido docente en universidades publicas y privadas en los niveles de maestría y doctorado, en diferentes cursos relacionados con biología molecular y gerencia de la investigación científica. Ha sido consultor y asesor en temas de biotecnología de plantas y miembro de juntas directivas de asociaciones y corporaciones relacionadas con la agricultura en Colombia. Autor de artículos en revistas indexadas y capítulos de libros. En la actualidad lidera proyectos relacionados con el cacao y la industria y el programa Cacao para la Paz (CFP) en Colombia.

Harold Suárez-Barón
Correo: harold.suarez@javerianacali.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4109-9305

Biólogo de la Universidad del Quindío, magíster y doctorado en Evolución y Biología del Desarrollo de la Universidad de Antioquia. Experiencia profesional como asistente de investigación de la Unidad de Biotecnología del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Durante los últimos años se desempeñó como profesor del Instituto de Biología de la Universidad de Antioquia y como investigador asociado (*deland fellow*) en el Arnold Arboretum de la Universidad de Harvard, Boston, EE. UU. Obtuvo entrenamiento en las universidades de Dakota de Sur y

Yale, en el Jardín Botánico de Nueva York y en la Academia China de Ciencias. Ha recibido diferentes reconocimientos, entre los que se destacan la mención *summa cum laude* por su disertación doctoral (2021); el premio Maynard F. Moseley, otorgado por la Sociedad Americana de Botánica (2021), y el premio Shizu y Yu Takeuchi, mención de honor en Biología (2022). Desde el año 2022 trabaja como profesor asociado del Programa de Biología en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.

Myriam Cristina Duque Echeverri
Correo: mcduque1400@hotmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1274-4018

Matemática con énfasis en Bioestadística de la Universidad del Valle, Colombia. Sus principales áreas de interés son diseño de experimentos, muestreo, análisis multivariado, genética cuantitativa, genómica, genética poblacional y métodos econométricos. Desde 1980 hasta 2013 fue consultora estadística del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y está pensionada en la actualidad. Durante estos años trabajó para el Programa de Fríjol, la Unidad de Agrobiodiversidad y Biotecnología, el Programa de Arroz y el Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR). Recibió múltiples cursos de actualización profesional, fue instructora de varios cursos nacionales e internacionales en representación del CIAT en las áreas de diseño de experimentos, genómica y biodiversidad. Recibió el premio Scopus 2009, Colombia (editorial Elsevier), y varias de sus publicaciones han sido distinguidas nacional e internacionalmente, en revistas indexadas.

Jaime Andrés Osorio-Guarín
Correo: josoriog@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5486-2680

Biólogo egresado de la Pontificia Universidad Javeriana y máster en Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia. Calificado en investigación básica o aplicada en diversas áreas como biología molecular, fitomejoramiento y genética. Su tesis de pregrado se basó en el estudio de la diversidad genética del cacao con marcadores microsatelitales. En la maestría trabajó en la identificación de genes relacionados con la respuesta de resistencia a la enfermedad de *Fusarium oxysporum*. En laboratorio desarrolló la implementación de la técnica de genotipificación por secuenciación (GBS), con el objetivo de aplicarla en especies nativas. Ha trabajado en proyectos relacionados con el mapeo molecular y el análisis de locus de rasgos cuantitativos (QTL) para la resistencia a enfermedades en cacao, así como de rasgos de calidad en uchuva y de productividad en palma aceitera y cacao. Además, ha estado involucrado en proyectos relacionados con el análisis de expresión diferencial por reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa (qPCR) y la validación funcional de genes.

Erick Geovanni Hernández
Correo: erickg.hernandez1@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7668-5956

Ingeniero de Producción Biotecnológica de la Universidad Francisco de Paula Santander. Candidato a magíster en Ciencias Biológicas con énfasis en Microbiología, de la Universidad de los Andes. Ha participado en proyectos de investigación que involucran interacciones moleculares entre bacterias fitopatógenas y plantas mediante el uso de técnicas microbiológicas, de genética clásica, biología molecular, genómica y bioinformática, al igual

que en diagnóstico fitosanitario y mejoramiento genético de especies vegetales de importancia económica para Colombia y la Comunidad Andina de Naciones (CAN), como arroz (*Oryza sativa*), yuca (*Manihot esculenta*), palma de aceite (*Elaeis guineensis*), cítricos y musáceas, en instituciones como el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. Cuenta con publicaciones en revistas indexadas y una mención honorífica por sus aportes de investigación en el campo de la fitopatología. En la actualidad se desempeña como docente en la Fundación Universitaria Agraria de Colombia.

Félix Eugenio Enciso Rodríguez
Correo: fencisorodriguez@ufl.edu
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3490-6586

Biólogo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, magíster en Ciencias Biológicas de la Universidad de los Andes y doctor en Mejoramiento Vegetal, Genética y Biotecnología de la Universidad Estatal de Michigan. Investigador PhD asociado de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. En la actualidad es investigador posdoctoral asociado en el laboratorio de mejoramiento y genómica de arándano (*Vaccinium corymbosum*) de la Universidad de la Florida. Su área de interés es la genómica en especies vegetales de interés comercial con énfasis en caracterización molecular, diseño de marcadores moleculares, análisis de asociación genética, selección asistida por marcadores, además de la aplicación de herramientas de validación funcional de genes como transformación genética y edición genómica en especies como papa y arándano.

Gina Alessandra Garzón Martínez
Correo: ggarzon@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-5620-9055

Bióloga de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, magíster en Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Javeriana y doctora en Biología de Plantas de la Universidad de Aberystwyth, Gales, Reino Unido. En la actualidad es investigadora PhD de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, Centro de Investigación Tibaitatá. Su interés principal es el estudio de los recursos genéticos vegetales mediante herramientas moleculares, genómicas y fenómicas, con el fin de apoyar programas de mejoramiento genético. Ha participado en proyectos relacionados con la identificación y uso de marcadores moleculares para estudios de diversidad genética, y la generación de información genética mediante herramientas transcriptómicas y genómicas para especies como uchuva (*Physalis peruviana*), palma de aceite (*Elaeis guineensis*), chontaduro (*Bactris gasipaes*), papa (*Solanum tuberosum*) y cacao (*Theobroma cacao*).

Leidy Paola Delgadillo Durán
Correo: ldelgadillo@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1416-7907

Bióloga, magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Genética y Fitomejoramiento de la Universidad Nacional de Colombia. Investigadora máster en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, Centro de Investigación Tibaitatá. Desde 2010 trabaja en la caracterización de bancos de germoplasma de varios cultivos de interés agronómico como uchuva, palma de aceite, aguacate, chontaduro, pasiflora, entre otros, con marcadores moleculares convencionales como COS II, SSR, y de última generación como SNP, mediante técnicas como GBS. Desde 2015 trabaja en el cultivo del cacao en la expresión genética y la búsqueda de genes relacionados con factores bióticos y abióticos con transcriptómica. Ha publicado artículos científicos en revistas

indexadas, entre los cuales se destaca la estandarización de un protocolo para la inoculación de *Phytophthora palmivora* en plántulas de *Theobroma cacao*.

Alba Lucía Villa Triana
Correo: avilla@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6572-5198

Bióloga de la Universidad del Tolima. Magíster en Ciencias Básicas de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Investigadora máster de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. Con experiencia en conservación de recursos genéticos vegetales y énfasis en cultivo de tejidos vegetales y criopreservación, ha generado y ajustado protocolos para diferentes especies con propagación vegetativa, generación de protocolos de criopreservación de ápices de papa y semillas de papayuela (*Vasconcellea goudotiana* y *Vasconcellea pubescens*) y algodón (*Gossypium* sp.). También ha liderado procesos de investigación en palma africana (*Elaeis guineensis*), palma americana (*Elaeis oleifera*) e hibridos O × G (*E. oleifera* × *E. guineensis*) con rescate de embriones y criopreservación. Maneja procesos de indexación en papa para producción de minitubérculos mediante aeroponía para el Plan Nacional de Semillas y los Bancos de Germoplasma. Ha trabajado con el manejo de material vegetal para producción masiva de plántulas *in vitro* dirigida a proyectos del sistema general de regalías (SGR) en especies de cebolla de rama, cebolla ocañera y papa.



Reconocimiento

Se expresa reconocimiento a los coejecutores y colaboradores de los proyectos de investigación relacionados con el mejoramiento genético estatal de la palma de aceite en Colombia. También a directivos, personal administrativo, investigadores y demás colaboradores que participaron desde entidades como la Secretaría de Agricultura y Ganadería del Valle del Cauca (en la actualidad, Secretaría de Desarrollo Rural, Agricultura y Pesca) en la Estación Agrícola de Palmira y la Estación Agroforestal del Pacífico de Calima-Buenaventura; el Instituto de Fomento Algodonero (IFA); el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA (Corpoica hasta 2017), que brindaron respaldo y apoyo institucional para el logro de los resultados que se presentan en este documento.

La obra propuesta reúne información histórica, conocimientos y productos tecnológicos sobre palma de aceite, resultado de la investigación y los desarrollos tecnológicos apoyados y adelantados por las entidades arriba mencionadas en distintos momentos: la antigua Secretaría de Agricultura y Ganadería del Valle del Cauca, que hasta antes de 1960 financió el trabajo en las estaciones ya citadas; el IFA y el ICA, que en el periodo 1960-1993 trabajaron en varias regiones del país; la alianza ICA-MADR-Corpoica (ahora AGROSAVIA), que entre 1994 y 2018 financió los proyectos de conservación de los bancos de germoplasma de palma de aceite y palma americana de aceite en los Centros de Investigación El Mira (San Andrés de Tumaco) y Nataima (El Espinal); y AGROSAVIA, que entre 1994 y 2022 desarrolló labores alusivas a la palma en distintas regiones del país.

Los autores del capítulo 10 expresan su agradecimiento al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) por la financiación del estudio con marcadores moleculares SSR y SNP (convenios Corpoica-CIAT 072 de 2011 y Corpoica Agenda Interna 211 de 2012), dentro del cual se enmarcó esta investigación.





Prólogo

Este libro surgió de la necesidad de dejar escritos los procedimientos básicos del fitomejoramiento aplicados por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA en el programa estatal de mejoramiento genético de la palma de aceite, de tal forma que sirvieran de guía a los relevos generacionales en la disciplina y en las especies palmáceas, en los diferentes centros de investigación de la Corporación. El libro también es un medio para documentar la trazabilidad de la investigación y de los cultivares generados hasta el presente.

El programa lo inició en 1960 el extinto Instituto de Fomento Algodonero (IFA) y lo implementó hasta 1968; desde 1969 hasta 1993 la responsabilidad recayó en el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), y desde 1994 hasta el presente, lo gestiona AGROSAVIA (Corpoica hasta mayo de 2018). El programa carece de financiación propia; se desarrolla a través de proyectos de investigación, con financiación gubernamental por vigencias de dos a cinco años máximo, y entre sus resultados se destaca el primer cultivar mejorado.

Los recursos genéticos para el desarrollo del programa están disponibles en el Banco de Germoplasma y en las colecciones de trabajo de las especies *Elaeis guineensis* y *Elaeis oleifera,* en custodia de AGROSAVIA. Por *banco de germoplasma* se entiende una colección de la diversidad y variabilidad de una especie, expresada en su acervo de genes, en la que pueden estar involucradas características de resistencia y calidad, necesarias para la producción de un cultivar, y que la diferencian de una *colección de trabajo,* la cual consiste en un grupo de accesiones obtenidas de los procesos de selección y que son fuente del potencial productivo de la especie, del acervo de genotipos, base y soporte del mejoramiento genético para desarrollar genotipos de alto rendimiento.

La estructura del libro sigue la secuencia de la aplicación del sistema de selección recurrente modificado (SSRm) del programa de mejoramiento genético de la palma de aceite de AGROSAVIA, con las hibridaciones intra- e interespecíficas entre palmas de las tres poblaciones involucradas en el programa: africana, asiática y americana. El libro consta de tres secciones: 1) "Recursos genéticos y fitomejoramiento", donde se mencionan los recursos genéticos vinculados al programa, y se aborda la conformación del SSRm y su aplicación desde el mejoramiento clásico; 2) "Rol de otras disciplinas en el mejoramiento genético de la palma de aceite en AGROSAVIA", que describe investigaciones de otras disciplinas como apoyo al mejoramiento genético, y 3) "Metodologías no convencionales usadas en el mejoramiento genético y la conservación de la palma de aceite en AGROSAVIA", que es consecuencia del obstáculo insalvable, por cuestiones de tiempo y recursos, al que se enfrenta el mejoramiento clásico de especies perennes; en esta sección básicamente se reseñan las metodologías con las cuales intentamos agilizar los procesos relacionados con los sistemas de selección.

Silvio Bastidas Pérez

Sección I



Recursos genéticos y fitomejoramiento



Capítulo 1
Recursos genéticos de la palma de aceite en AGROSAVIA

Clara Inés Medina C., Mario Lobo A., Silvio Bastidas P., Leidy P. Moreno C.

Las especies de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. y *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés (Tropicos, 2019) tienen una variabilidad genética importante para la industria oleoquímica. Esta variabilidad permite mejorar atributos que son valiosos para los cultivos comerciales, entre ellos la tolerancia a factores bióticos y abióticos adversos, actuales o potenciales. Los genes de las dos especies mencionadas constituyen un recurso genético con potencial para desarrollar cultivares de palma cercanos al "genotipo ideal" descrito por la demanda del sector agroindustrial. Para almacenar tales recursos, la nación colombiana estableció el Sistema de Bancos de Germoplasma, cuyo objetivo final es contribuir al desarrollo de la agricultura del país y a su seguridad alimentaria.

Los recursos genéticos de la palma de aceite se conservan como colecciones de campo y presentan dos ventajas: 1) sus caracteres o atributos pueden aprovecharse de inmediato, por ejemplo, para generar híbridos intra- e interespecíficos con altos contenidos de ácidos grasos insaturados, y 2) obtener genotipos recombinantes en cada ciclo de floración, porque siguen un proceso de polinización cruzada natural, al azar, que favorece la evolución de las especies.

En 2021, el área sembrada de palma de aceite ascendió a 595.722 ha, de las cuales 499.364 estaban en producción, con 1'747.377 t de aceite crudo y 312.512 t de aceite de palmiste (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [Fedepalma], 2022). Los cultivos de palma de aceite se encuentran en 152 municipios de 21 departamentos del país; en la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) se

encuentran registrados 6.856 productores, de los cuales 85 % son palmicultores de pequeña escala. Colombia aporta el 2 % de la producción de aceite mundial, y se ubica en el primer lugar de Latinoamérica y en el cuarto del planeta (Fedepalma, 2021). Lo anterior indica que el país tiene condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de la agroindustria de la palma de aceite, las cuales se distribuyen en cuatro zonas palmeras, situadas en las regiones tropical seca y húmeda, cuyas características climáticas contrastan entre sí (tabla 1.1).

La industria de la palma de aceite ha utilizado cultivares de la especie *E. guineensis* derivados de programas de producción de semilla, establecidos en países africanos y asiáticos (Corley & Castro, 2004; Sambanthamurthi et al., 2009; Kushairi et al., 2000). Esta uniformidad propició la vulnerabilidad del cultivo, ya que todos los cultivares comerciales resultaron susceptibles al complejo denominado pudrición del cogollo (PC), sobre todo en las zonas palmeras occidental y central de Colombia. El sector palmicultor está renovando esas zonas con cultivares híbridos interespecíficos obtenidos del cruzamiento entre la palma africana de aceite[1] *E. guineensis* (susceptible a la PC) y la americana de aceite[2] *E. oleifera* (resistente a la PC). Este último recurso genético permaneció prácticamente relegado en los bancos de germoplasma y en las colecciones de trabajo, hasta que el incremento exponencial de la PC le dio importancia e hizo que se incluyera en los programas de mejoramiento de palma nacionales y extranjeros (Durand-Gasselin et al., 2010; Montúfar et al., 2018). A la fecha, la especie *E. oleifera* es el único recurso genético disponible contra la PC (Barcelos et al. 2015; Corley & Tinker, 2003).

1 De nombre científico *Elaeis guineensis*, sus sinónimos son palma africana de aceite y palma de aceite, y se abrevia en este documento con la letra G.

2 De nombre científico *Elaeis oleifera*, sus sinónimos son palma americana de aceite y palma de nolí, y se abrevia en este documento con la letra O.

Tabla 1.1. Condiciones climáticas asociadas a cada una de las cuatro zonas palmeras de Colombia (promedios departamentales y municipales)

Zona palmera	Divisiones territoriales	Temperatura media (máxima y mínima) (°C)	Precipitación media (máxima y mínima) (mm/año)	Humedad relativa (máxima y mínima) (%)	Brillo solar (horas/año)	Altitud (m s. n. m.)
Norte	9 departamentos 64 municipios	27,4 (27,1 a 28,7)	1.525,1 (802,3 a 2.658,9)	79 (74 a 84)	2.316,2 (1.874,8 a 2.607,7)	84 (1 a 800)
Central	8 departamentos 45 municipios	27,5 (27,4 a 28,8)	2.545,0 (1.454,4 a 3.922,6)	77 (71 a 82)	1.977,5 (1.731,1 a 2.249,9)	215 (19 a 970)
Suroccidental	3 departamentos 3 municipios	25,4 (24,8 a 26,0)	3.723,6 (2.193,8 a 5.193)	88 (86 a 92)	929,9 (705 a 1.385,5)	129 (10 a 300)
Oriental	5 departamentos 36 municipios	25,8 (25,1 a 26,6)	3.806,3 (2.489,8 a 4.695,7)	78 (73 a 83)	1.535,6 (1.345,4 a 1.677,9)	313 (117 a 870)

Fuente: Fedepalma (2017)

En el año 2018, según el Registro Nacional de Cultivares del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2019), la oferta de cultivares híbridos interespecíficos ascendió a quince cultivares, producidos por cuatro empresas de semillas nacionales y cuatro internacionales. AGROSAVIA (Corpoica hasta 2017) ha desarrollado en el Centro de Investigación (C. I.) El Mira (ubicado en Tumaco, Nariño) cuatro cultivares comerciales de palma de aceite (un híbrido intraespecífico y tres interespecíficos). Bajo condiciones de campo, estos cultivares han demostrado resistencia a la PC, en especial los híbridos interespecíficos. Además, como continuidad del proceso de introgresión de genes entre las dos especies, también se generaron híbridos de segunda (RC2) y tercera (RC3) generación de retrocruzamiento como materiales genéticos experimentales.

Banco de Germoplasma

La colección de palma de aceite[3] de AGROSAVIA se estableció con genotipos de las prospecciones hechas en el departamento de Córdoba, Colombia, donde crece en forma espontánea la especie *E. oleifera,* y con genotipos de *E. guineensis* originados en África y Asia (Valencia et al., 2010). Posteriormente, el Banco se fue enriqueciendo con nuevas accesiones generadas mediante cruzamientos con las introducidas. Las accesiones del Banco se describen, en su mayoría, a partir de características de los frutos y del racimo y, en algunos casos, mediante descriptores morfológicos vegetativos de la etapa juvenil de la palma en el campo. Esta caracterización de los materiales ha permitido identificar palmas promisorias, cuyas progenies conforman las colecciones de trabajo del programa de mejoramiento de la palma de aceite, conducido por AGROSAVIA.

El Gobierno colombiano facilitó la conformación del Sistema de Bancos de Germoplasma de la Nación para la Alimentación y la Agricultura (SBGNAA), a partir de las colecciones de trabajo creadas en las décadas del cuarenta y cincuenta del siglo pasado por el Departamento de Investigación Agrícola (DIA) y luego fortalecidas por el ICA. Entre 1994 y 1996, el Sistema se manejó mediante convenios anuales de cooperación técnica y científica, suscritos entre el ICA y la entonces Corpoica (en la actualidad AGROSAVIA). En los años

3 *Palma de aceite,* término genérico, incluye las especies *E. guineensis, E. oleifera* y los híbridos interespecíficos.

siguientes (1997 a 2004), se firmaron convenios tripartitos entre estas dos entidades y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), y a partir de 2005 se retornó al convenio entre el ICA y Corpoica.

La colección de germoplasma de palmas de aceite —integrante del Sistema de Bancos— tiene como objetivo principal garantizar la conservación del recurso natural constituido por las especies de palma de aceite *E. guineensis* y *E. oleifera,* y promover su utilización en los programas de mejoramiento. Su base de trabajo, constituida por palmas de interés económico, se inició cuando Corpoica recibió del ICA tres colecciones de palma de aceite con una población de 879 ejemplares registrados en 76 accesiones o entradas, que crecían dispersas en 117 ha del C. I. El Mira, Tumaco, Nariño. Lo anterior consta en el Acta de Entrega n°. 004 de 1995 del ICA a Corpoica de la siguiente forma:

- **Colección de la especie *E. guineensis* (figura 1.1)**: comprende 43 accesiones y está conformada por 443 palmas dispersas en más de cien hectáreas, sembradas en la llamada Estación Experimental El Mira entre 1970 y 1983.
- **Colección de la especie *E. oleifera***: comprende 21 accesiones y está integrada por 252 palmas dispersas en quince hectáreas, sembradas en la Estación Experimental El Mira en 1977.
- **Colección de híbridos interespecíficos O × G**: conformada por doce accesiones derivadas de hibridación interespecífica entre las dos especies anteriores, con 184 plantas sembradas (1,3 ha) en la Estación Experimental El Mira en 1977.

La dispersión de las palmas de las tres colecciones en 117 hectáreas hizo difícil y costoso su mantenimiento y conservación. Al respecto, vale la pena aclarar que en un cultivo de palma de aceite corriente y en condiciones de terreno sin accidentes geográficos, las 879 plantas de las 76 accesiones ocuparían únicamente 6,1 ha.



Figura 1.1. Colecciones de trabajo de palma *E. guineensis* ubicadas en el C. I. El Mira. a. Colección materiales tipo Dura; b. Colección materiales tipo Pisífera.
Fotos: Rafael Reyes Cuesta, Silvio Bastidas Pérez

Redimensionamiento y reubicación

Para evitar sobrecostos de mantenimiento y conservación, Corpoica emprendió, entre los años 2002 y 2006, dos acciones importantes: 1) redimensionar las colecciones del Banco de Germoplasma en cuanto a número de plantas por accesión, para lo cual fue necesario reproducir las accesiones mediante polinización controlada, y 2) reubicar las colecciones en un área específica para ellas. Los resultados se incluyen en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Inventario de las tres colecciones de palma de aceite conservadas en el Banco de Germoplasma, después de su redimensionamiento y reubicación

Colección y especie	Número de accesiones (uds.)	Número de palmas (uds.)	Área ocupada (ha)	Ubicación
Palma de aceite africana (*Elaeis guineensis*)	136	680	4,8	Centro de Investigación El Mira, Tumaco, Nariño
Palma nolí (*Elaeis oleifera*)	21	252	1,8	
Híbridos O × G*	18	141	1,0	
Total	175	1.073	7,5	

* **Sinónimos:** híbridos O × G, híbridos *oleifera* × *guineensis*, híbridos interespecíficos *E. oleifera* × *E. guineensis*.
Fuente: Elaboración propia

En el momento de redimensionar las colecciones, se acató la normatividad establecida en el *Manual de procedimientos técnicos, administrativos y presupuestales para el manejo de los bancos de germoplasma vegetal, animal y de microorganismos* del ICA (2011a). Para las colecciones de campo de especies perennes, el documento establece que deben conservarse, como mínimo, seis plantas por accesión, aunque su número puede variar según la supervivencia.

Primera regeneración e incremento

Se regeneraron las 43 accesiones iniciales de *E. guineensis* mediante cruzamientos endogámicos, con autofecundaciones y cruzamientos entre hermanos completos y hermanos medios. Además, se hicieron introducciones y recombinaciones con materiales de diferente origen. Con ello se incrementó la colección inicial de *E. guineensis* en 93 accesiones para un total de 136. La regeneración se hizo con dos fines, rejuvenecer las colecciones y dimensionarlas, tal como lo exige el *Manual de procedimientos* del ICA (2011a).

También se aumentó la colección de híbridos interespecíficos O×G con seis nuevas accesiones: Manicoré × La Mé (una), Cereté × Deli (cuatro) y Deli × Cereté (una), para un total de 18 (tabla 1.2). Las palmas Manicoré y Cereté son de la especie *E. oleifera* (Alvarado et al., 2013; Bastidas et al., 2013), pero de diferente origen genético, y las denominadas La Mé y Deli son del taxón *E. guineensis* (Richardson, 1995). Finalmente, en el C. I. El Mira, las 136 accesiones de palma de aceite, las 21 de nolí y las 18 de híbridos interespecíficos ocuparon 7,5 ha (figura 1.2). Cada colección se estableció en un lote diferente, lo cual condujo a una reducción en los costos de conservación.



Figura 1.2. Bancos de Germoplasma de palma de aceite. a. *E. guineensis*; b. *E. oleifera*; c. Híbridos interespecíficos.
Fotos: Rafael Reyes Cuesta, Leidy Paola Moreno

Segunda regeneración

A partir de los años 2005-2006, la enfermedad de la PC adquirió características exponenciales en cuanto a nivel de incidencia en Tumaco, zona palmera occidental (Sarria et al., 2008). Esta situación puso en riesgo los recursos genéticos de la palma *E. guineensis* conservados en el C. I. El Mira y motivó una segunda regeneración de la colección de esta especie, para su traslado al C. I. Nataima, ubicado en El Espinal, Tolima. Este movimiento fue autorizado por el ICA conforme acta de reunión realizada en el Instituto, en Bogotá, el 16 de septiembre de 2008.

Para lo anterior, se inició un plan de regeneración de las 136 accesiones de *E. guineensis* en el C. I. El Mira, mediante cruzamientos endogámicos entre palmas hermanas, con lo cual se alcanzaron 130 cruzamientos exitosos (uno por accesión), con pérdida de seis accesiones tipo Pisífera de la colección, pertenecientes a las series La Mé de Costa de Marfil y Pobé de Benín, debido a la imposibilidad de reproducirlas mediante cruzamientos endogámicos, por presentar alta esterilidad femenina, fenómeno reportado por varios investigadores (Corley & Tinker, 2003; Setiawati et al., 2018; Forster et al., 2017).

La regeneración de las 130 accesiones tomó cuatro años hasta la obtención de semillas germinadas, con regeneración de algunas en un menor lapso y con un mínimo de dos años para estas últimas. La mayor duración de este plan se debió a la coincidencia de los ciclos de floración masculino o femenino, por lo cual fue necesario esperar al cambio de ciclo de floración de masculino a femenino, o viceversa.

La metodología de campo aplicada en el trabajo siguió las directrices establecidas en el documento *Procedimiento técnico para la producción de semilla de palma de aceite* Elaeis guineensis *Jacq., del cultivar mejorado, obtenido por Corpoica en el Centro de Investigación El Mira* (Peña et al., 2003), y comprendía las siguientes actividades básicas: aislamiento de inflorescencias femeninas y masculinas, procesamiento del polen, almacenamiento de este último, polinización controlada, cosecha de racimos de frutos, y obtención de las semillas para su germinación (Peña et al., 2003). El proceso finalizó cuando se enviaron, del C. I. El Mira al C. I. Nataima, 20 semillas germinadas de cada accesión recuperada, con lo cual se garantizó la siembra en campo de seis palmas por accesión.

De los 130 cruzamientos llevados a cabo, solo 114 pudieron regenerarse; los 16 restantes se perdieron durante el proceso. La tabla 1.3 presenta las accesiones de las dos especies mencionadas y de los híbridos interespecíficos, así como la ubicación de las colecciones del Banco de Germoplasma, después de su traslado al C. I. Nataima.

Esta segunda regeneración de las accesiones del Banco proporcionó germoplasma premejorado a diversos proyectos de investigación en fitomejoramiento y otras disciplinas, ejecutados entre 2006 y 2013 por investigadores de Corpoica.

Tabla 1.3. Número de accesiones de dos especies de palma de aceite y sus híbridos conservados en las colecciones del Banco de Germoplasma de AGROSAVIA

Colección regenerada	Accesiones o híbridos (n.º)	Palmas (n.º)	Área ocupada (ha)	Ubicación
Palma de aceite africana (*Elaeis guineensis*)	112	714	6	C. I. Nataima, Espinal, Tolima
Híbrido O × G	7	30		
Palma nolí (*Elaeis oleifera*)	30	267	3,4	C. I. El Mira, Tumaco, Nariño
Híbrido O × G	18	114		
Total	**167**	**1.125**	**9,4**	

Fuente: Elaboración propia

Cultivares

Como se mencionó antes, los recursos genéticos anteriores facilitaron el desarrollo de cuatro cultivares de palma de aceite:

- Híbrido intraespecífico Ténera Corpoica Elmira de palma de aceite de la especie *Elaeis guineensis* (Bastidas et al., 2006; Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2004).
- Híbrido interespecífico O × G Corpoica Elmira de primera generación (F1) de hibridación entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis* (ICA, 2011b).
- Híbrido interespecífico Pacífico RC1 de primera generación de retrocruzamiento hacia la especie *E. guineensis* tipo Pisífera Yangambi (ICA, 2014a).
- Híbrido interespecífico Tumaco RC1 de primera generación de retrocruzamiento hacia la especie *E. guineensis* tipo Dura Deli (ICA, 2014b).

El proceso de obtención de estos cultivares se describe en los capítulos 4, 5 y 9.

Variabilidad disponible en el Banco de Germoplasma

Una base genética estrecha soporta la palmicultura mundial, al menos en sus orígenes durante el siglo pasado. Las plantaciones comerciales mundiales de *E. guineensis* se originaron a partir de cuatro palmas ornamentales

cultivadas en el Jardín Botánico de Bogor, Indonesia, en 1848, las cuales dieron origen a la serie Deli de la palma de aceite tipo Dura (Cochard et al., 2009; Hartley, 1988; Soh, 2012; Setiawati et al., 2018; Rajanaidu, 2016), y alrededor del 90 % de la producción de semillas desciende de la línea materna Dura Deli (Rajanaidu, 2000). Por su parte, las líneas masculinas tienen una base genética más amplia, al involucrar un mayor número de palmas de diferentes países africanos (Sterling & Alvarado, 2002).

Con respecto a la palma de aceite y a las especies relacionadas, se supone que en el país y en el exterior existe todavía variabilidad genética sin explotar, en las poblaciones naturales ubicadas en los centros de origen y dispersión, así como en las colecciones de trabajo de instituciones de investigación. Por ejemplo, la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma) conformó una colección de *E. guineensis* derivada de una prospección realizada en Angola, África, en la cual se encontró alta variabilidad intrapoblacional (Rey et al., 2004). Por su parte, un estudio sobre diversidad genética y fenotípica de 34 accesiones de la especie *E. oleifera* de cuatro países de Suramérica (Brasil, Colombia, Ecuador y Perú) indicó diferencias en los componentes del racimo y en el rendimiento entre países, y la presencia de alelos específicos por cada país de origen (Arias et al., 2015).

El origen de la palma de aceite de las primeras plantaciones en Colombia y en el Banco de Germoplasma se describe a continuación.

La base genética del Banco de Germoplasma y de las colecciones de trabajo de la especie *E. guineensis* del programa de mejoramiento de palma de aceite de AGROSAVIA proviene de dos introducciones principales, una de origen africano y la otra de origen asiático. Estas introducciones propiciaron el inicio y desarrollo de la palmicultura nacional (Bastidas, Figueredo & Reyes, 1993; Bastidas, Peña & Reyes, 2003), tal como ocurrió en otros países palmeros (Rajanaidu, 2000; Sterling & Alvarado, 2002).

A su vez, la base genética de la especie *E. oleifera* conservada en el Banco de Germoplasma es reducida, pues se cuenta con material proveniente de una sola zona de colecta, el valle del río Sinú (municipio de Cereté, departamento de Córdoba, Colombia), área muy pequeña del subcentro de origen de la

especie, el cual se extiende desde el norte de Suramérica hasta el norte de Centroamérica (Barcelos, 1998; Ghesquière et al., 1987; Rey et al., 2004).

Hay otro subcentro de origen de la especie *E. oleifera* ubicado en la cuenca amazónica de Brasil, Colombia, Ecuador y Perú (Montúfar et al., 2018), del cual no se han incorporado accesiones al Banco de Germoplasma a cargo de AGROSAVIA. En este subcentro se conocen los ecotipos Manicoré y Coarí, originarios del estado Amazonas, Brasil (Barcelos et al., 2015); Taisha, originario de la provincia de Pastaza, Ecuador (Barba & Baquero, 2013), y Poloponta, de la Amazonía peruana (Mejía, 1995). Lo anterior señala, primero, la necesidad de explorar y colectar la variabilidad potencial de la palma americana de aceite *E. oleifera* en el país, y posteriormente, en consonancia con la Decisión 391 de la Comunidad Andina de Naciones (CAN), de estudiar la posibilidad de solicitar acceso al germoplasma de la cuenca amazónica. Con base en lo anterior, se puede afirmar que en el Banco de Germoplasma de la palma de aceite a cargo de AGROSAVIA existe potencial para las fuentes de variación descritas a continuación.

Fuentes de variación

Las siguientes variaciones son útiles para el mejoramiento genético de la palma de aceite:

- **Especie**: se conservan palmas de *Elaeis guineensis* y *Elaeis oleifera* y de los híbridos interespecíficos obtenidos entre ambas especies.
- **Origen primario**: el origen geográfico del germoplasma es una fuente de variación importante; por ejemplo, se ha encontrado más vigor híbrido en los cultivares de tipo Ténera cuando los padres, Dura y Pisífera, provienen de Asia y África, respectivamente.
  - **Palmas de origen africano**: las de la serie Yangambi (Zaire, en la actualidad República Democrática del Congo) ingresaron a Colombia en 1933 por Palmira, Valle del Cauca,[4] y se establecieron en la Estación Agrícola Palmira. La primera generación del cruzamiento de estas introducciones se sembró en la Estación Experimental del Bajo Calima

4 En todos los casos, el año hace referencia al de siembra de los materiales en el campo, no al año de introducción de las semillas.

en Buenaventura, Valle del Cauca, en 1947, y la segunda en Tumaco, Nariño, en 1970. Palmas de las series La Mé (Costa de Marfil) y Pobé (Benín) llegaron directamente a la estación Experimental El Mira, en 1977, como introducciones de proyectos de investigación. Otras accesiones originarias de Zaire y Camerún arribaron en 1985 al Centro Regional de Investigación (CRI) El Mira a partir de cultivos comerciales de palma del departamento del Meta (Bastidas et al., 2003).

- **Palmas de origen asiático**: las de la serie Deli (de Sumatra, Indonesia) llegaron en 1949 a Sevilla, Magdalena, provenientes de la Estación Experimental Lancetilla, Honduras; otra introducción importante fue las del tipo Deli, que ocurrió en 1953 con genotipos provenientes de Surinam, cuyo origen era Sumatra, las cuales fueron sembradas en la Estación Experimental La Pepilla de Aracataca, Magdalena. Posteriormente, la primera generación de cruzamientos intraespecíficos de estas dos introducciones se sembró en el Estación Experimental El Mira, en 1972. Complementario a esto, otras introducciones asiáticas provenientes de Malasia se sembraron en el CRI El Mira en 1983, como recombinantes de origen asiático (Bastidas et al., 2003).
- **Palmas de origen americano**: en 1971, un grupo de investigadores del Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux (IRHO),[5] del ICA y de las empresas palmeras Coldesa e Indupalma, realizaron una prospección de palmas nolí, en áreas de influencia del municipio de Cereté, y como resultado se seleccionaron 54 palmas. Luego, entre 1973 y 1976, algunas se cruzaron entre sí, lo que generó 59 progenies F1 (Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux [IRHO], 1973), las cuales se sembraron en la Estación Experimental El Mira, en 1977, donde se les asignó la serie Cereté por su origen (Bastidas, Peña, Reyes & Tolosa, 2007; Bastidas, Peña & Reyes, 2013).

- **Pigmentación de la epidermis**: la epidermis del fruto de estas palmas adquiere colores diferentes por la presencia de antocianinas (figura 1.3).
  - En la especie *E. guineensis* se distinguen dos tipos (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1988; Singh et al., 2014):

5 En la actualidad, el Recherche Agronomique et de Coopération Internationale pour le Dévelopement (CIRAD).

- ***Nigrescens***: en el fruto inmaduro, la epidermis es de color negro violáceo; este es el tipo más común en las plantaciones.
- ***Virescens***: en el fruto inmaduro, la epidermis es de color verde. La selección artificial ha reducido la frecuencia de esta característica del fruto en las plantaciones comerciales.[6]

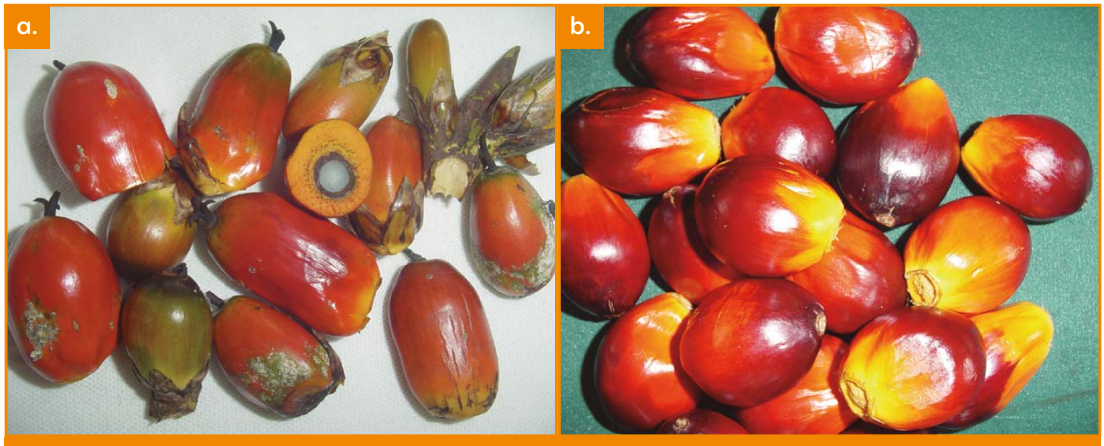


Figura 1.3. Pigmentación de la epidermis del fruto. a. *Virescens*; b. *Nigrescens*.
Fotos: Silvio Bastidas Pérez

- En la especie *E. oleifera* se definen también dos tipos (Moreno & Romero, 2015) (figura 1.4):
  - **Verde**: el fruto inmaduro presenta tonalidades verdes, que al madurar se tornan de color amarillo. Este tipo de fruto es poco frecuente en condiciones naturales, desde 1,4 a 10 % en el norte de Colombia y 2 % en las palmas amazónicas de Brasil (Barcelos, 1986; Hurtado & Ramos, 1970; Vallejo, 1976).
  - **Rojo**: el fruto es de color amarillo antes de la maduración y adquiere una tonalidad roja anaranjada en plena madurez. En las poblaciones de palma americana de la serie Cereté, su frecuencia varía de 90 a 98,6 %, mientras que en las de la Amazonía brasileña es de 90 % (Barcelos, 1986; Hurtado & Ramos, 1970; Vallejo, 1976)..

6 El color verde del fruto tipo *virescens* es de carácter monofactorial y dominante, por lo cual puede eliminarse fácil en los procesos de selección.



Figura 1.4. Coloración del fruto de *E. oleifera*. a. Color verde en estado inmaduro; b. Coloración amarillo mostaza en inmaduro; c. Coloración anaranjada en maduro.

Fotos: Leidy Paola Moreno

- **Envoltura carnosa**:
  - En la especie *E. guineensis* se presenta un tipo de fruto conocido como *poissoni* o *mantled*, en el cual carpelos suplementarios carnosos cubren o rodean la parte principal (Hartley, 1988). Esta cualidad, catalogada como anormal, puede incrementar el porcentaje de mesocarpio y aceite; es una envoltura y da lugar a dos tipos de frutos (figura 1.5) (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1988):
    - ***Poissoni***: con envoltura carnosa.
    - **Común**: sin envoltura carnosa.
  - Hasta la fecha no se ha encontrado una palma *E. oleifera* con frutos tipo *poissoni*.

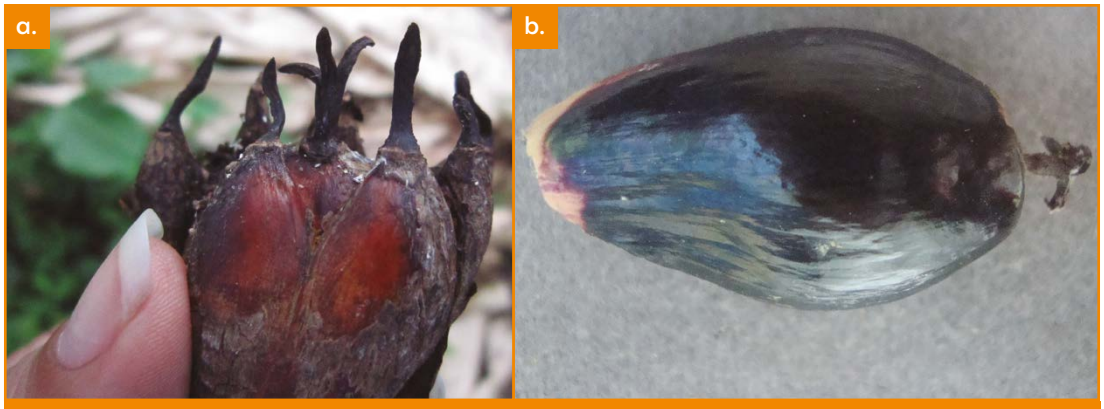


Figura 1.5. Presencia de envoltura carnosa. a. *Poissoni*; b. Común.
Fotos: Leidy Paola Moreno

- **Presencia de carotenos en la pulpa**: el color de la pulpa (mesocarpio) de los frutos varía del amarillo pálido al amarillo anaranjado; se debe a la acumulación de carotenos —promotores de la vitamina A— en diferentes proporciones. En relación con esta característica, se conocen dos tipos de frutos (Hartley, 1988):
  - **Común**: tiene carotenos y es el más frecuente en las plantaciones de palma de aceite. La concentración de carotenos es mucho mayor en la especie *E. oleifera* que en *E. guineensis*. En los frutos de las palmas *E. oleifera* de origen colombiano sembradas en Malasia[7] se han encontrado desde 791,2 hasta 3.003,5 ppm de carotenos (Mohd et al., 2000).
  - ***Albescens***: presenta baja proporción de carotenos; por ello, la pulpa es de color amarillo pálido (*albescens* significa "que se blanquea, blancuzco").

Este atributo está ligado al color de la epidermis del fruto: la de color amarillo claro corresponde a la pulpa tipo *albescens* y la de color anaranjado rojizo, a la pulpa tipo común.

7 En Malasia encontraron que el nolí de origen colombiano contiene 92,6 cg/g de índice de yodo (Sharma, 1999). Este índice es una propiedad química relacionada con la insaturación de los aceites (Corley & Tinker, 2003; Rey et al., 2004).

- **Fibras y grosor del endocarpio**: la presencia de fibras alrededor de la semilla y el espesor del endocarpio de la drupa, conocido localmente como "cuesco", determinan tres tipos de palma, conocidas erróneamente como variedades:[8]
  - **Dura**: se caracteriza porque presenta drupas con fibras dispersas en la pulpa (mesocarpio) y un cuesco grueso, de 2 a 4 mm de espesor (Kushairi et al., 2000; Müller & Andrade, 2010).
  - **Pisífera**: por lo general, el cuesco está ausente y hay fibras agrupadas en el centro del fruto; en ocasiones hay una almendra del tamaño de una arveja en el centro de la drupa, rodeada por un anillo de fibras (Kushairi et al., 2000; Müller & Andrade, 2010).
  - **Ténera**: se caracteriza, en primer lugar, por un anillo de fibras alrededor del cuesco y, en segundo lugar, por un cuesco delgado, con menos de 2 mm de espesor; hay también drupas Ténera de cuesco grueso (Kushairi et al., 2000; Müller & Andrade, 2010), por lo cual el cuesco es un criterio importante de selección.
  - Existe un cuarto tipo, el Macrocarpa, que se caracteriza por un cuesco de espesor superior a 4 mm (Corley & Tinker, 2003; Hartley,1988) (*macrocarpa* significa "de fruto grande").

En la especie *E. oleifera* se presenta un solo tipo, que equivale al tipo Dura de *E. guineensis,* y cuyo espesor de cuesco varía entre 1 y 3 mm.

- **Prolificidad**: en la especie *E. oleifera* hay palmas mutantes capaces de producir dos o más inflorescencias en algunas hojas, y las femeninas implican un aumento significativo del número de racimos por palma al año. Este atributo morfológico solo se ha encontrado en palmas *E. oleifera* de origen colombiano de la serie Cereté y en sus híbridos con palmas *E. guineensis*. En 268 palmas nolí observadas en el C. I. El Mira, 52 fueron prolíficas (19,4 %). La prolificidad presenta algún grado de heredabilidad a los híbridos O×G; fueron identificadas seis palmas prolíficas (2,53 %) entre 237 híbridas analizadas (Bastidas & Hurtado, 1992, 1993).

8 La presencia en los frutos de cuesco (*shell* [sh]) y fibras determina tres tipos de palma: Dura (Sh+ Sh+), Pisífera (sh- sh-), y un híbrido entre los dos, el tipo Ténera (Sh+ sh-), el cual produce los tres tipos cuando se cruza con otro Ténera (Cunha et al., 2010; Forster et al., 2017; Ngando-Ebongue et al., 2011; Setiawati et al., 2018).

- **Palma idolátrica**: las de este tipo producen hojas con foliolos fusionados (Bastidas et al., 2013; Corley & Tinker, 2003; Hartley,1988). Son descendientes de una palma considerada una quimera, es decir, una rareza dentro de la especie.

Las fuentes de variación reseñadas arriba son una muestra de la variabilidad presente en el Banco de Germoplasma de palma de aceite de AGROSAVIA. Es posible ampliar esa variabilidad con los recursos genéticos disponibles para hacer múltiples combinaciones de los atributos antes descritos, no solo con los relativos al origen de la especie y a su naturaleza integral, sino también con los que se asocian al color de la epidermis de la drupa, la concentración de carotenos, el cuesco, las fibras y la prolificidad. La combinación de genotipos aumenta la variación, lo cual podría denominarse "variabilidad potencial" o "variabilidad oculta". La premisa que justifica esta variabilidad oculta es la siguiente: aunque un mismo cruzamiento se repita muchas veces, los genotipos obtenidos serán siempre diferentes y los fenotipos respectivos se asemejarán entre sí, pero no serán iguales. Este resultado se debe a la naturaleza heterocigótica de las dos especies consideradas.

Fuentes de resistencia a la PC disponibles en el Banco de Germoplasma

La pudrición del cogollo (PC) es el principal problema sanitario de la palma de aceite en Colombia y América Latina (Martínez et al., 2010). En el Banco de Germoplasma de palma de aceite de AGROSAVIA hay materiales con factores de resistencia a la enfermedad, cuya evidencia se describe a continuación.

Factores de resistencia en *E. oleifera*

En 1964, las palmas nolí (*E. oleifera*) de crecimiento silvestre en la plantación Coldesa, de Turbo, Antioquia —emparentadas con ancestros de las palmas nolí conservadas en el Banco de Germoplasma— no fueron afectadas por la PC (Hardon, 1969; Vallejo, 1976), y las palmas vecinas de *E. guineensis* sí presentaron la enfermedad.

En la Estación Experimental El Mira, más de 2.000 palmas nolí (*E. oleifera*) sembradas en 1977, en un lote de 15 ha, resistieron la PC sin presentar

ningún caso hasta el año 2021; mientras que las 460 ha contiguas de *E. guineensis* tuvieron un alto porcentaje de palmas enfermas, lo que obligó a su erradicación total entre 2006 y 2010. En la actualidad, las 15 ha de palmas nolí han dado lugar a las progenitoras del híbrido O×G, denominado Corpoica Elmira.

Los híbridos O×G de la colección del Banco de Germoplasma —sembrados en 1977 en la Estación Experimental El Mira y en otras plantaciones de la región—, producidos con palmas nolí seleccionadas en fincas del valle del río Sinú, municipio de Cereté, Córdoba, sobrevivieron a la PC y permanecen sanos a la fecha.

Factores de resistencia en *E. guineensis*

En el periodo 2004-2010 ocurrió la mayor incidencia de PC en la zona palmera de Tumaco (Alegría et al., 2015). Se observaron diferencias de grado y rapidez por afectación de la enfermedad en palmas Ténera de *E. guineensis,* según el origen genético de los padres y la procedencia. Las diferencias se consideraron del siguiente modo: algunas palmas eran altamente susceptibles; otras soportaron la PC, pero enfermaron de forma tardía, y otro grupo de palmas permaneció sano, pero fue erradicado. Algunos investigadores consideran que estas últimas son escapes; otros creen que son resistentes y se preguntan si aún estarían vivas de no haberse erradicado.

Referencias

Alegría, M., Vélez, D., Varón, F., Martínez, G., Torres, G., & Corredor, J. (2015). Comportamiento frente a la pudrición del cogollo (PC) de palmas derivadas de cruzamientos entre palmas *Elaeis guineensis* sobrevivientes a la epidemia en Tumaco, Nariño. *Palmas, 36*(2), 69-77. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11078

Alvarado, A., Escobar, R., & Henry, J. (2013). El híbrido O×G Amazon: una alternativa para regiones afectadas por pudrición del cogollo en palma de aceite. *Palmas, 34*(n.º especial, tomo I), 305-314. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10689

Arias, D., González, M., Prada, F., Ayala-Díaz, I., Montoya, C., Daza, E., & Romero, H. M. (2015). Genetic and phenotypic diversity of natural American oil palm (*Elaeis oleifera* [H.B.K.] Cortés) accessions. *Tree Genetics & Genomes, 11*(122). https://doi.org/10.1007/s11295-015-0946-y

Barba, J., & Baquero, Y. (2013). Híbridos O×G obtenidos a partir de oleíferas Taisha Palmar del Río (PDR), Ecuador: variedad-PDR (Taisha × Avros). *Palmas, 34*(n.º especial, tomo 1), 315-325.

Barcelos, E. (1986). Características genético-ecológicas de populações naturais de caiaué (*Elaeis oleifera* [H.B.K.] Cortés) na Amazônia brasileira [Tesis de maestría, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil].

Barcelos, E. (1998). Etude de la diversité génétique du genere *Elaeis* (*E. oleifera* [Kunth] Cortés et *E. guineensis* Jacq.) par marqueurs moléculaires (RFLP et AFLP) [Tesis de maestría, Université Montpellier].

Barcelos, E., Rios, S. A., Raimundo, N. V., Da Cunha, R. N. V., Lopes, R., Motoike, S. Y., Babiychuk, E., Skirycz, A., & Kushnir, S. (2015). Oil palm natural diversity and the potential for yield improvement. *Frontiers in Plant Science, 6*(190). https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00190

Bastidas, S., & Hurtado, L. B. (1992). Palmas prolíficas en la especie *Elaeis oleifera*, una mutación afortunada. *Palmas 13*(3), 55-60. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/352

Bastidas, S., & Hurtado, L. B. (1993). Evaluación de palmas prolíficas en la especie *Elaeis oleifera* e híbridos interespecíficos *E. oleifera* × *E. guineensis*. *Palmas 14*(4), 55-60.

Bastidas, S., Figueredo, P., & Reyes, R. (1993). Obtención de materiales de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) adaptados al trópico latinoamericano. *Palmas, 14*(número especial), 49-56.

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2003). Genealogía del germoplasma de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) del proyecto de mejoramiento genético de Corpoica. *Palmas 24*(1), 21-29.

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Pérez, J., & Tolosa, W. (2007). Comportamiento agronómico del cultivar híbrido RC1 de palma de aceite (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) × *Elaeis guineensis*. *Revista Corpoica-Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8*(1), 5-11. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:77

Bastidas, P. S., Peña, R. E., & Reyes, C. R. (2013). *Preguntas sobre palma de* aceite Elaeis guineensis *Jacq., palma nolí* Elaeis oleifera *(Kunth) Cortés y los híbridos interespecíficos nolí × palma de aceite* (E. oleifera × E. guineensis). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12614/66171_64853.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bastidas, S., Reyes, R., & Peña, E. (2006). Palma de aceite Ténera Corpoica Elmira: alternativa nacional. *Revista Innovación y Cambio Tecnológico, 4*(2,3), 47-50.

Cochard, B., Adon, B., Rekima, S., Billotte, N., Desmier, R., Koutou, A., Nouy, B., Omoré, A., Purba, A., Glazsmann, J., & Noyer, J. (2009). Geographic and genetic structure of African oil palm diversity suggests new approaches to breeding. *Tree Genetics & Genomes, 5*, 493-504. https://doi.org/10.1007/s11295-009-0203-3

Corley, R. H. V., & Castro, F. (2004). Programa de mejoramiento de palma de aceite de Unipalma. *Palmas, 25*(n.º especial, tomo II), 311-325.

Corley, R. H. V., & Tinker, P. B (eds.). (2003). *The oil palm* (4th edition). Blackwell Science Ltda. https://doi.org/10.1002/9780470750971

Cunha, R. N. V., Lopes, R., Gomes Júnior, R. A., Lobato Rodrigues, M. R., Teixeira, P. C., Carvalho da Rocha, R. N., & Alves de Lima, W. A. (2010). Material genético utilizado para a produção sustentável da cultura da palma de óleo na Amazônia. In A. Ramalho Filho (ed.), *Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na amazônia* (part II, chapter 3). Embrapa Solos.

Durand-Gasselin, T., Amblard, P., & Corredor, J. (2010). Visión futura del mejoramiento genético de la palma de aceite en Latinoamérica: varias resoluciones sobre cooperación en Colombia para mejoramiento del material de siembra. *Palmas, 31*(n.º especial, tomo I), 155-170.

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [Fedepalma]. (2017). *Anuario estadístico 2017: la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo 2012-2016.* https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/semanario-palmero/publicaciones/PORTADAS_ANUARIO_ESTADISTICO_2017.pdf

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [Fedepalma]. (2021). *Anuario Estadístico 2021. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo 2016-2020.* https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1556

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [Fedepalma]. (2022). *Minianuario estadístico 2022. Principales cifras de la agroindustria de palma de aceite en Colombia. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite.* https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/141253?show=full

Forster, B. P., Sitepu, B., Setiawati, U., Kelanaputra, E. S., Nur, F., Rusfiandi, H., Rahmah, S., Ciomas, J., Anwar, Y., Bahri, S., & Caligari, P. D. (2017). Oil palm (*Elaeis guineensis*). In *Genetic improvement of tropical crops* (pp. 241-290). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59819-2_8

Ghesquière, M., Barcelos, E., Santos, M. M., & Amblard, P. (1987). Polymorphisme enzymatique chez *Elaeis oleifera* H.B.K. (*Elaeis melanococca*): analyse des populations du Bassin amazonien. *Oléagineux, 42*(4), 143-153.

Hardon, J. J. (1969). Interespecific hybrids in the genus *Elaeis* II. vegetative growth and yield of the F1 hybrids of *Elaeis guineensis* × *Elaeis oleifera*. *Euphytica, 18*, 380-388. https://doi.org/10.1007/BF00397785

Hartley, C. W. S. (1988). *The oil palm (*Elaeis guineensis *Jacq.)* (3ª ed.). Longman Scientific & Technical.

Hurtado, M. J. R., & Ramos, N. G. (1970). Estudio de la palmera nolí (*Elaeis melanococca* Gaert.) y preliminares de su fitomejoramiento en Colombia. *Acta Agronómica, 20*(1, 2), 9-23.

Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux [IRHO]. (1973). *Híbrido interespecífico* Elaeis melanoccoca × Elaeis guineensis*, intercambio internacional.*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2004). *Resolución 00961. "Por la cual se ordena el registro en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del* ICA*, del híbrido de palma de aceite Ténera Corpoica Elmira, para las subregiones naturales Pacífico Colombiano y Orinoquía Colombiana, con el número de registro PLA-04-3".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2011a). *Manual de procedimientos técnicos, administrativos y presupuestales para el manejo de los bancos de germoplasma vegetal, animal y de microorganismos* [Documento de trabajo].

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2011b). *Resolución 001446. "Por la cual se ordena el registro del híbrido interespecífico de palma de aceite O×G Corpoica Elmira en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del* ICA *para la subregión natural Pacífico Colombiano, con el número de registro PLA-11-04".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2014a). *Resolución 000977. "Por la cual se ordena el registro del híbrido de palma de aceite O×G Pacífico RC1 de la Corporación Colombiana de Investigación agropecuaria (Corpoica) en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del* ICA *para la subregión natural Pacífico Colombiano, con el número de registro PLA-14-27".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2014b). *Resolución 000978. "Por la cual se ordena el registro del híbrido de palma de aceite O×G Tumaco RC1 de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA para la subregión natural Pacífico Colombiano, con el número de registro PLA-14-26".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2019). *Registro nacional de cultivares.* https://www.ica.gov.co/getattachment/Areas/Agricola/Servicios/Evaluacion-Agronomica-y-Control-en-Comercializacio/REGISTRO-NACIONAL-DE-CULTIVARES.xlsx.aspx?lang=es-CO

Kushairi, A., Rajanaidu, N., Jalani, B. S., Rafii, Y. M., & Mohd Din, A. (2000). Materiales de siembra de palma de aceite del Porim. *Palmas, 21*(3), 51-63. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/744

Martínez, G., Sarria, G. A., Torres, G. A., & Varón, F. (2010). *Phytophthora palmivora* es el agente causal de la pudrición del cogollo de la palma de aceite. *CID Palmero, 31* (número especial, tomo 1), 334-344. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1538

Mejía, C. K. (1995). *Diagnóstico de recursos vegetales de la Amazonia peruana* [Documento técnico n.º 16]. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana [IIAP].

Mohd, D., Rajanaidu, N., & Jalani, B. S. (2000). Performance of *Elaeis oleifera* from Panama, Costa Rica, Colombia and Honduras in Malaysia. *Journal of Oil Palm Research, 12*(1), 71-80. http://jopr.mpob.gov.my/performance-of-elaeis-oleifera-from-panama-costa-rica-colombia-and-honduras-in-malaysia/

Montúfar, R., Louise, C., & Tranbarger, T. J. (2018). *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés: A neglected palm from the Ecuadorian Amazon. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas, 39*(1), 11-18. https://doi.org/10.26807/remcb.v39i1.584

Moreno, L. P., & Romero, H. M. (2015). Phenology of the reproductive development of *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés. *Agronomía Colombiana, 33*(1), 36-42. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n1.47199

Müller, A. A., & Andrade, B. A. D. (2010). Aspectos gerais sobre a fenologia da cultura da palma de óleo. Em *Zoneamento Agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia* (pp. 83-92). Embrapa Solos.

Ngando-Ebongue, G. F., Ajambang, W. N., Koona, P., Firman, B. L., & Arondel, V. (2011). Oil palm. In S. Gupta (ed.), *Technological innovations in major world oil crops* (Vol. 1, pp. 165-200). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0356-2_7

Peña, R. E., Bastidas, P. S., Reyes, C. R., & Rankin, C. J. (2003). *Procedimiento técnico para la producción de semilla de palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.) de material mejorado obtenido por Corpoica en el C. I. El Mira*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Rajanaidu, N. (2000). Materiales futuros de siembra para la industria de la palma de aceite. *Palmas, 21*(número especial, tomo 2), 291-299.

Rajanaidu, N. (2016). Una mirada al mejoramiento genético de la palma de aceite en los últimos cincuenta años: una aventura personal. *Palmas, 37*(número especial, tomo I), 190-202. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11903

Rey, B. L., Gómez, C. P., Ayala, D. I., Delgado, A. W., & Rocha, S. P. (2004). Colecciones genéticas de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq., y *Elaeis oleifera* (H.B.K.) de Cenipalma: características de importancia para el sector palmicultor. *Palmas, 25* (número especial 2), 39-48.

Richardson, D. L. (1995). La historia del mejoramiento genético de la palma aceitera en la compañía United Fruit en América. *ASD Oil Palm Papers* (11),1-22. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.11-1995-min.pdf

Sambanthamurthi, R., Singh, R., Kadir, A. P. G., Abdullah, M. O., & Kushairi, A. (2009). Opportunities for the oil palm via breeding and biotechnology. In S. M. Jain & P. M. Priyadarshan (eds.), *Breeding plantation tree crops: Tropical species* (pp. 377-421). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_11

Sarria, G. A., Torres, G. A., Aya, H. A., Ariza, J. G., Rodríguez, J., Vélez, D. C., Varón, F., & Martínez, G. (2008). *Phytophthora* sp. es el responsable de las lesiones iniciales de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite en Colombia. *Palmas, 29,* 31-41.

Setiawati, U., Sitepu, B., Nur, F., Forster, B. P., & Dery, S. (2018). *Crossing in oil palm: A manual* (Vol. 6). CABI. https://doi.org/10.1079/9781786395917.0000

Singh, R., Low, E. T., Ooi, L. C., Ong-Abdullah, M., Nookiah, R., Ting, N. C., Marjuni, M., Chan P. L., Ithnin, M., Manaf, M. A. A., Nagappan, J., Chan, K. L., Rosli, R., Halim, M. A., Azizi, N., Budiman, M. A., Lakey, N., Bacher, B., Van Brunt, A. ... Sambanthamurthi,

R. (2014). The oil palm *VIRESCENS* gene controls fruit colour and encodes a R2R3-MYB. *Nature Communications, 5*, Article 4106. https://doi.org/10.1038/ncomms5106

Sharma, M. (1999). Utilization of nigerian PS1 y PS2 selection in oil palm breeding programmes at UP Bhd. In *Proceedings of the seminar on PS1 and PS2 oil palm planting materials* (pp. 18-29). Palm Oil Research Institute of Malaysia (Porim).

Soh, A. C. (2012). Breeding and genetics of the oil palm. In *Palm oil* (pp. 31-58). Aocs Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-9818936-9-3.50005-8

Sterling, F., & Alvarado, A. (2002). Historia de las colecciones de germoplasma de palma aceitera de ASD de Costa Rica. *ASD Oil Palm Papers (Costa Rica)* (24), 17-23.

Tropicos. (2019). *Elaeis oleifera*. http://www.tropicos.org/NameSearch.aspx?exact=true&name=Elaeis+oleifera&commonname=

Valencia, R. A., Lobo Arias, M., & Ligarreto, G. A. (2010). Estado del arte de los recursos genéticos vegetales en Colombia: Sistema de Bancos de Germoplasma. *Revista Corpoica de Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 11*(1), 85-94. https://doi.org/10.21930/rcta.vol11_num1_art:198

Vallejo, R. G. (1976). *Estudio de poblaciones espontáneas de nolí (*Elaeis oleifera *H.B.K. Cortés) en Colombia* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional; Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).



Capítulo 2
Germoplasma de palma de aceite usado en procesos de mejoramiento

Clara Inés Medina C., Mario Lobo A., Silvio Bastidas P., Leidy P. Moreno C.

Los sistemas de selección de plantas, aplicados en los procesos de mejoramiento genético, no son eficaces cuando carecen de variabilidad en las poblaciones en las cuales se hace la selección. Esto hace necesario considerar tanto la diversidad disponible como la posibilidad de generarla mediante el empleo de los recursos genéticos presentes en los bancos de germoplasma y en las colecciones de trabajo, ya que el éxito de un sistema de selección está en la base genética y en la variabilidad aprovechable (Lobo, 2008). Para ello también se debe tener en cuenta la posibilidad de introducir esta variabilidad en los bancos y en las colecciones de trabajo.

Los recursos genéticos conservados en los bancos representan la *variabilidad genética,* la cual se crea con procesos de selección natural y artificial. No es posible conservar todo el acervo genético de una especie en los bancos, pero sí mantener en ellos la variabilidad útil, es decir, la que requieren los proyectos de desarrollo de cultivares (Berretta & Rivas, 2001).

Antes de adoptar un *sistema de selección,* se deben revisar aspectos como tipo de cultivo, sistemas de reproducción natural y polinización, ciclo biológico, etc. Primero hay que revisar los recursos genéticos disponibles en el banco y en las colecciones, y luego el nivel de mejoramiento de estos recursos, ya que son la herramienta para afrontar con seguridad los efectos del medio ambiente, tanto bióticos como abióticos, ejercidos sobre la planta y el cultivo.

Las zonas palmeras norte, central, oriental y suroccidental de Colombia se han desarrollado con la siembra de cultivares mejorados. Sin embargo, desde su origen, las plantaciones comerciales a nivel mundial se desarrollaron a partir de una base genética estrecha (Setiawati et al., 2018; Soh, 2012) y son de amplia adaptación. Exigen, por tanto, un buen manejo agronómico para comportarse bien en ambientes menos favorables. La PC, causada por *Phytophthora palmivora* (Martínez et al., 2010; Sarria et al., 2008), afectó los cultivos de *E. guineensis* y favoreció el uso de cultivares híbridos, producto del cruzamiento entre palmas *E. oleifera* y *E. guineensis*, los cuales sustituyeron en los cultivos a las palmas de *E. guineensis* de tipo Ténera.[1]

En este capítulo se hace una relación detallada de los recursos genéticos de las palmas *E. guineensis* y *E. oleifera* existentes en el programa de mejoramiento genético en los centros de investigación de AGROSAVIA.

Palma de aceite africana (*E. guineensis*)

En 1948, Víctor Manuel Patiño, un naturalista y explorador botánico notable, oriundo de Palmira, Valle del Cauca, escribió:

> Hasta donde es posible saberlo, la especie *Elaeis guineensis* pasó al continente americano a raíz de la trata de esclavos, en el siglo XVI. Los centros de aclimatación de la especie en este continente fueron las Antillas, las Guayanas y Brasil. (Patiño, 1948)

En la isla de Martinica, entre 1763 y 1780, el botánico alemán Nicholas Joseph Jacquin clasificó la especie como *Elaeis guineensis* K. (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1988; Patiño, 1948).

1 La resistencia de los híbridos ha sido reportada por varios investigadores, entre ellos los siguientes, según orden cronológico: Méndez (1974), Vallejo y Cassalett (1975), Meunier y Boutin (1975), Meunier et al. (1976), Turner (1981), Hartley (1988), Le Guen et al. (1991), Franqueville (2001), Corley y Tinker (2003), Bastidas et al. (2003), Amblard et al. (2004), Torres et al. (2004), Zambrano (2004), Chinchilla et al. (2007), Barba et al. (2010a, 2010b).

Introducción y dispersión en el continente americano

La palma de aceite ingresó a América Central como cultivo comercial por iniciativa de la multinacional bananera United Fruit Company, la cual creó en 1926 la Estación Experimental Lancetilla, en Tela, Honduras (Alvarado et al., 2010; Escobar et al., 1996; Sterling & Alvarado, 2002).

Esta empresa tenía como objetivo introducir nuevos cultivos tropicales —entre ellos la palma de aceite— en la citada estación experimental de Honduras y evaluarlos allí. ¿Qué motivó a la empresa bananera a sembrar palma de aceite? Sencillamente, la necesidad de sustituir, en plantaciones extensas, los cultivos de banano afectados por la marchitez causada por *Fusarium* sp. Desde 1926 hasta 1940, la colección de palma de aceite, producto de la introducción original, se manejó en la estación experimental del país centroamericano, desde donde se dispersó a otros países de América (Richardson, 1995).

En los artículos "La historia del mejoramiento genético de la palma aceitera en la United Fruit Company en América" (Richardson, 1995), y "Oil palm planting materials by ASD of Costa Rica" (Escobar et al., 1996), se describe en detalle el proceso de introducción de la especie y de su establecimiento como cultivo en América. De esos artículos se extrajo la siguiente información sobre el origen de los recursos genéticos del Banco de Germoplasma de AGROSAVIA, la cual se presenta según año de ocurrencia:

- **1927**: la Estación Experimental de Lancetilla, Tela, Honduras, recibe semillas de palma de aceite colectadas en el Lejano Oriente. En 1928, llegan más de estas semillas para incrementar el germoplasma, y se siembran.
- **1929**: semillas derivadas de polinización abierta de tres palmas de Nigeria, tres de Sierra Leona y una de Angola se siembran en la Estación Experimental Lancetilla. Ese mismo año también se importan semillas de Zaire (hoy República Democrática del Congo).
- **1929**: se hacen cuatro introducciones de palma de aceite de tipo Dura y dos de tipo Ténera en la Estación Experimental Lancetilla, con materiales procedentes del Jardín Botánico de Eala, en Zaire. El Departamento de Agricultura

de Estados Unidos (United States Department of Agriculture [USDA]) envía a la estación otras introducciones originarias de este país africano.

- **1951**: la Estación Experimental Lancetilla cuenta con germoplasma proveniente de Malasia, Java, Sumatra, Sierra Leona, Zaire, Nigeria, Angola y Camerún, y con el introducido e identificado inicialmente como del Lejano Oriente y de África occidental.

Desde la Estación Experimental Lancetilla se distribuyeron inicialmente, a otros países de América, semillas de palma de aceite tipo Dura de la serie Deli y de polinización abierta, originarias de Java y Sumatra (Hartley, 1969), debido a su mejor comportamiento en las pruebas de campo con respecto a las del mismo tipo de origen africano. El cronograma de distribución fue el siguiente:

- 1936: a la hacienda Birichichi, Honduras.
- 1937: a una compañía palmera de Guatemala.
- 1943: a una plantación en San Alejo, Honduras.
- 1943: a una plantación en Quepos, Costa Rica.
- 1944: a la Estación Experimental Tingo María, Perú.
- 1945: a la plantación La Esperanza, Nicaragua.
- 1946: a la Bananera, en la costa atlántica de Guatemala, y a Tiquisate, en la costa pacífica de ese país. En 1948 había ya 360 ha plantadas en Tiquisate.
- 1949: a la hacienda Patuca, en Sevilla, departamento de Magdalena, Colombia, donde se establecen palmas tipo Dura de la serie Deli de polinización abierta.
- 1949: a la plantación Scott, en Santo Domingo de los Colorados, Ecuador.
- 1950: a la plantación Tepachula, en Chiapas, México.

Por consiguiente, una parte de los ancestros del germoplasma de palma de aceite, involucrados en el programa de mejoramiento genético de la Corporación, son palmas tipo Dura Deli de origen asiático. Por ser semillas de polinización abierta, este germoplasma asiático pudo contaminarse en la Estación Experimental Lancetilla con polen de palmas *E. guineensis* de origen africano (Hartley, 1969).

Introducción de germoplasma de origen africano en Colombia

Las palmas de aceite (*E. guineensis*) de origen africano, a diferencia de las asiáticas, se distinguen por las siguientes características:

- Emiten un número considerable de racimos pequeños.
- El endocarpio o cuesco de sus frutos (drupas) tiene forma irregular.
- Las espigas de la inflorescencia, en las cuales se ordenan los frutos, terminan en una espina larga, delgada y aguda (Bastidas et al., 2013; Kushairi et al., 2000; Sambanthamurthi et al., 2009).

Primera introducción

El germoplasma de palma de aceite de origen africano ingresó al país de acuerdo con el cronograma indicado a continuación. El año de introducción de los recursos genéticos se indica al inicio de cada evento; después del ingreso a Colombia, se señala la fecha de siembra[2] en campo.

- 1923: Florent Claes, director del Jardín Botánico de Bruselas, Bélgica, sugirió al Gobierno colombiano introducir el cultivo de la palma de aceite en el país.
- 1931: Claes introdujo las primeras semillas de la especie *E. guineensis*. Las tomó del Jardín Botánico de Eala, Zaire, y las entregó al obispo Monconill en Bogotá, quien ordenó a sus misioneros de Florencia (Caquetá), y de Mocoa (figura 2.1) y Puerto Asís (Putumayo) distribuirlas entre los pobladores de esos territorios.

2 Algunas introducciones no fueron establecidas en campo por diferentes causas, como pérdida de viabilidad, ausencia de germinación, muertes en vivero, falta de interés, etc. Esto también aplica para el germoplasma de origen asiático.



Figura 2.1. Ejemplares de palma de aceite en el parque principal de Mocoa, Putumayo.
Foto: Leidy Paola Moreno Caicedo

- 1933: de esas semillas se obtuvieron 206 palmas, las cuales se sembraron como especie ornamental en la Estación Experimental de Palmira[3]. Algunas de ellas se cruzaron entre sí y su descendencia se plantó después en la Estación Agroforestal del Bajo Calima, cerca de Buenaventura, Valle del Cauca (Patiño, 1948).
- 1936: de una segunda introducción de semillas, originarias también de Eala, Zaire, se plantaron 40 palmas de tipo Ténera de polinización abierta en la Estación Experimental de Palmira.

El germoplasma de tipo Ténera plantado en Palmira estaba emparentado con descendientes de la palma Sungei Pantjur 540T (SP540T),[4] porque los envases de las semillas introducidas en ese año (1936) traían el membrete de

3 Semillas de F. Claes, donadas al administrador de la Estación Experimental de Palmira.

4 SP540T significa "Sungei Pantjur" (SP), Sumatra, Indonesia; el 540 es el número de la palma, y *T* corresponde a "tipo Ténera".

la variedad Djongo.[5] Este membrete indicaba que las semillas descendían de la famosa palma Ténera Djongo de Eala, Zaire, la cual originó la línea SP540T en Sumatra, Indonesia, y un número grande de líneas de los tipos Ténera y Pisífera localizadas hoy en Asia, África y América.[6] Por consiguiente, las semillas provenientes del Jardín Botánico de Eala, Zaire, introducidas a Colombia, tuvieron descendientes de tipo Ténera Yangambi[7] en la Estación del Bajo Calima (Hartley, 1974, 1988).

- 1945: Víctor M. Patiño seleccionó, en la Estación Experimental de Palmira, palmas sobresalientes por dos criterios: espesor de la pulpa (mesocarpio) superior a 7 mm y peso del fruto por encima de 13 g.
- 1947: se establece una pequeña plantación en la Estación Agroforestal del Bajo Calima, con semillas obtenidas de cruzamientos controlados entre palmas de tipo Ténera seleccionadas en 1933 y 1936 en la Estación Experimental de Palmira (Arias et al., 1988; Vallejo, 1978).

El germoplasma plantado en la Estación Agroforestal del Bajo Calima se convirtió en la población parental de palma de aceite (*E. guineensis*) de origen africano. Esta población es la *primera base* del programa de mejoramiento genético de la palma de aceite a nivel nacional, y representa también la fuente de padres de tipo Pisífera, tal como en otros programas de mejoramiento genético de la palma de aceite (Kushairi et al., 2000; Sambanthamurthi et al., 2009). Los progenitores Pisífera se obtienen por segregación a partir de cruzamientos Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera. La Estación Agroforestal del Bajo Calima fue el *centro de dispersión* de la especie *E. guineensis* de origen africano en Colombia.

5 En dialecto aborigen del antiguo Congo Belga (después Zaire y hoy República Democrática del Congo), *djongo* significa "la mejor".

6 Semillas de polinización abierta de la palma Ténera Djongo fueron sembradas en Palmeraie de la Rive, en Yangambi, Zaire, en 1922. Más del 70 % de las palmas seleccionadas luego en esta plantación son descendientes de esa palma Djongo (Hartley, 1988).

7 El tipo Ténera Yangambi se caracteriza por producir un alto número de racimos de frutos grandes y ovoides, con nueces grandes de cuesco delgado localizadas hacia el centro de la parte basal del fruto (Corley & Tinker, 2003).

Segunda introducción

En la década del setenta se hizo una nueva introducción de germoplasma africano de palma de aceite (*E. guineensis*) en Colombia, y su origen fue el siguiente:

- 1977: con palmas de las series La Mé de Costa de Marfil y Pobé de Benín, el IRHO (Cirad en la actualidad) produjo doce cruzamientos, Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera, y algunas autofecundaciones en palmas de tipo Ténera. Este germoplasma se plantó en la Estación Experimental El Mira, en Tumaco, departamento de Nariño. A partir de la siembra de este germoplasma en la Estación Experimental El Mira, estos recursos genéticos se incluyeron en el primer ciclo de selección recurrente del programa de mejoramiento antes mencionado. La figura 2.2 representa el árbol genealógico del germoplasma de *E. guineensis* de origen africano introducido en Colombia.

Introducción de germoplasma de origen asiático en Colombia

El germoplasma de palma de aceite de origen asiático (*E. guineensis*) exhibe las siguientes características:

- Produce menor cantidad de inflorescencias femeninas, en comparación con palmas de origen africano.
- Los racimos son pesados y de gran tamaño (si se comparan con los de palmas de origen africano).
- El endocarpio o cuesco de los frutos es regular; cuando se realiza un corte transversal a un fruto, se lo observa de forma circular, como una corona.
- La espiga del racimo en la cual se ordenan los frutos termina en una espina roma, gruesa y corta, mientras la espiga de las palmas de origen africano termina en una espina puntiaguda, delgada y larga (Bastidas et al., 2013; Kushairi et al., 2000; Sambanthamurthi et al., 2009).

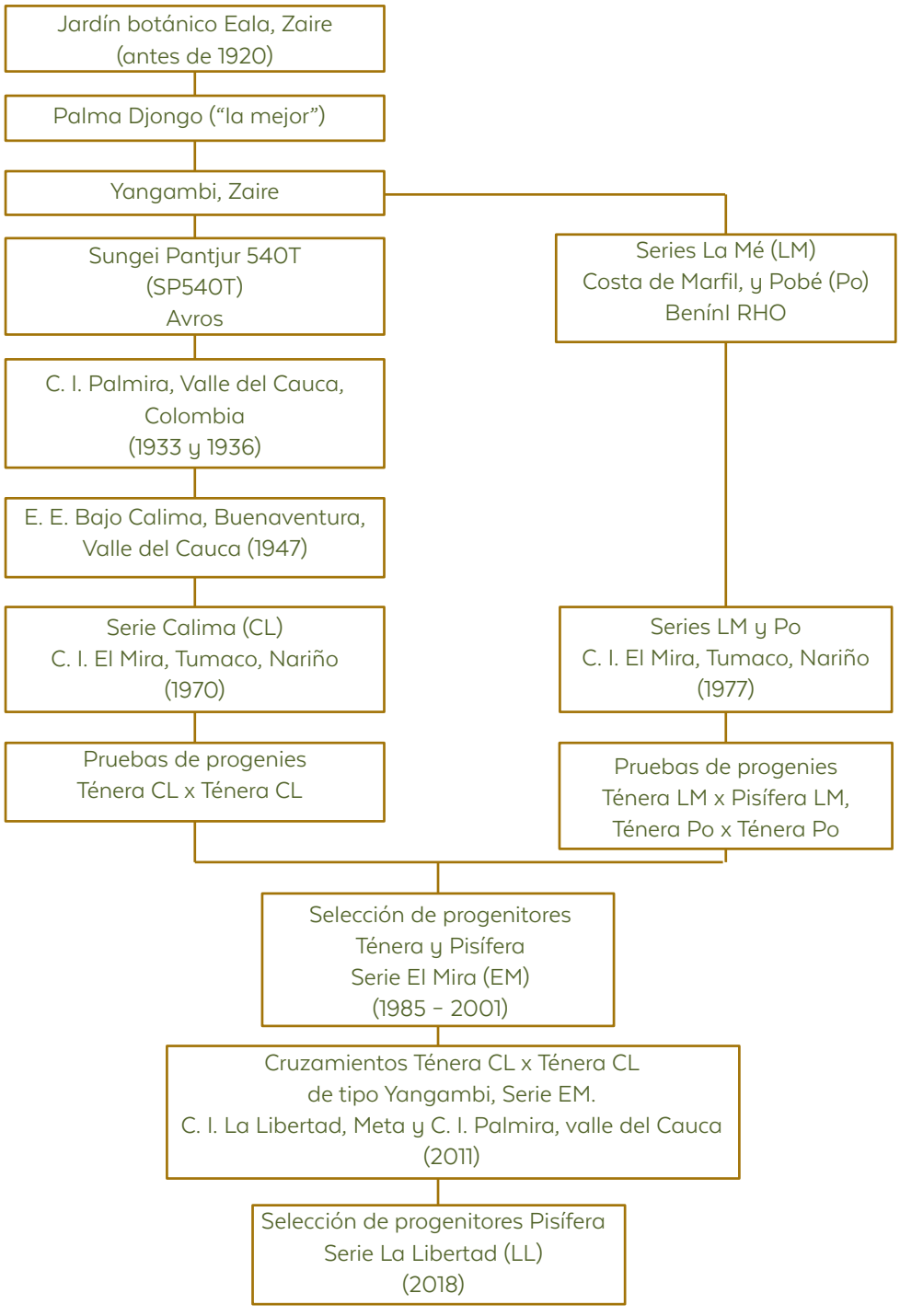


Figura 2.2. Genealogía de los recursos genéticos de origen africano del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA.

Fuente: Elaboración propia

Primera introducción

El germoplasma de palma de aceite de procedencia asiática se introdujo en el país de acuerdo con el cronograma indicado abajo. El año de cada una de las introducciones a Colombia se indica al principio del párrafo y corresponde a la fecha de siembra en campo.

- 1949: la United Fruit Company importó de la Estación Experimental Lancetilla, Honduras, semillas de libre polinización del tipo Dura Deli, originarias de Sumatra, Indonesia. Esta introducción fue importante para el programa de mejoramiento genético manejado por la Corporación, dado que corresponde al tipo Deli, usado como progenitor femenino por la mayoría de los programas de mejoramiento a nivel mundial (Kushairi et al., 2000; Sambanthamurthi et al., 2009). Con palmas provenientes de estas semillas se plantaron 172 ha en la hacienda Patuca, Sevilla,[8] departamento de Magdalena (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1974).
- 1953: una segunda fuente de semillas del tipo Dura Deli, originadas en Sumatra, también de libre polinización, fue introducida al país a través de Surinam. Con estas semillas se estableció una pequeña plantación en la Estación Experimental La Pepilla, Aracataca, departamento de Magdalena (Arias et al., 1988).

El germoplasma plantado en las dos localidades anteriores —Patuca y La Pepilla— constituye la población parental de *E. guineensis* de origen asiático. Esta población es la *segunda base* del programa de mejoramiento genético, y representa la fuente de progenitores femeninos del tipo Dura Deli, como en otros programas similares (Kushairi et al., 2000; Sambanthamurthi et al., 2009). La hacienda Patuca y la Estación Experimental La Pepilla se convirtieron en el *centro de dispersión* de la especie *E. guineensis* de origen asiático en Colombia.

Segunda introducción

En la década del ochenta se hacen nuevas introducciones de germoplasma asiático de palma de aceite directamente en el Centro Regional de Investigación El Mira (figura 2.2). Algunas progenies ingresan al programa de

8 En la actualidad, Sevilla corresponde al municipio de Zona Bananera.

mejoramiento, como las accesiones originadas en la Estación Experimental La Pepilla, y otras son conservadas en el Banco de Germoplasma de la palma de aceite en custodia de AGROSAVIA:[9]

- 1981: se introducen trece progenies de tipo Ténera producidas por la Federal Land Development Authority (Felda) de Malasia.
- 1981: se importan de Surinam cinco descendencias tipo Dura de la serie Deli.
- 1983: se introducen semillas de diez cruzamientos Dura × Dura y de tres autofecundaciones de palmas Dura realizadas en la Estación Experimental La Pepilla de Aracataca.



Figura 2.3. Colecciones de germoplasma en el C. I. El Mira.
a. Pruebas de progenies Dura PA × Dura PE; b. Pruebas de progenies Dura PA × Dura PA
Fotos: Rafael Reyes Cuesta y Silvio Bastidas Pérez

Después de la siembra del germoplasma de origen asiático en la Estación Experimental El Mira, en 1972 y 1983 (figura 2.3), estos recursos genéticos se incluyeron en el primer ciclo de selección recurrente del programa de mejoramiento de la palma de aceite de AGROSAVIA. La figura 2.4 presenta el árbol genealógico del germoplasma de *E. guineensis* de origen asiático introducido en Colombia.

9 En el programa de mejoramiento de la palma de aceite de AGROSAVIA se adoptó el sistema de selección recurrente modificado, con base en dos poblaciones contrastantes, asiática y africana, y la norma fue el uso de palmas de origen asiático como fuente de madres Dura, y palmas de origen africano como fuente de padres Pisífera (Vallejo, 1981).

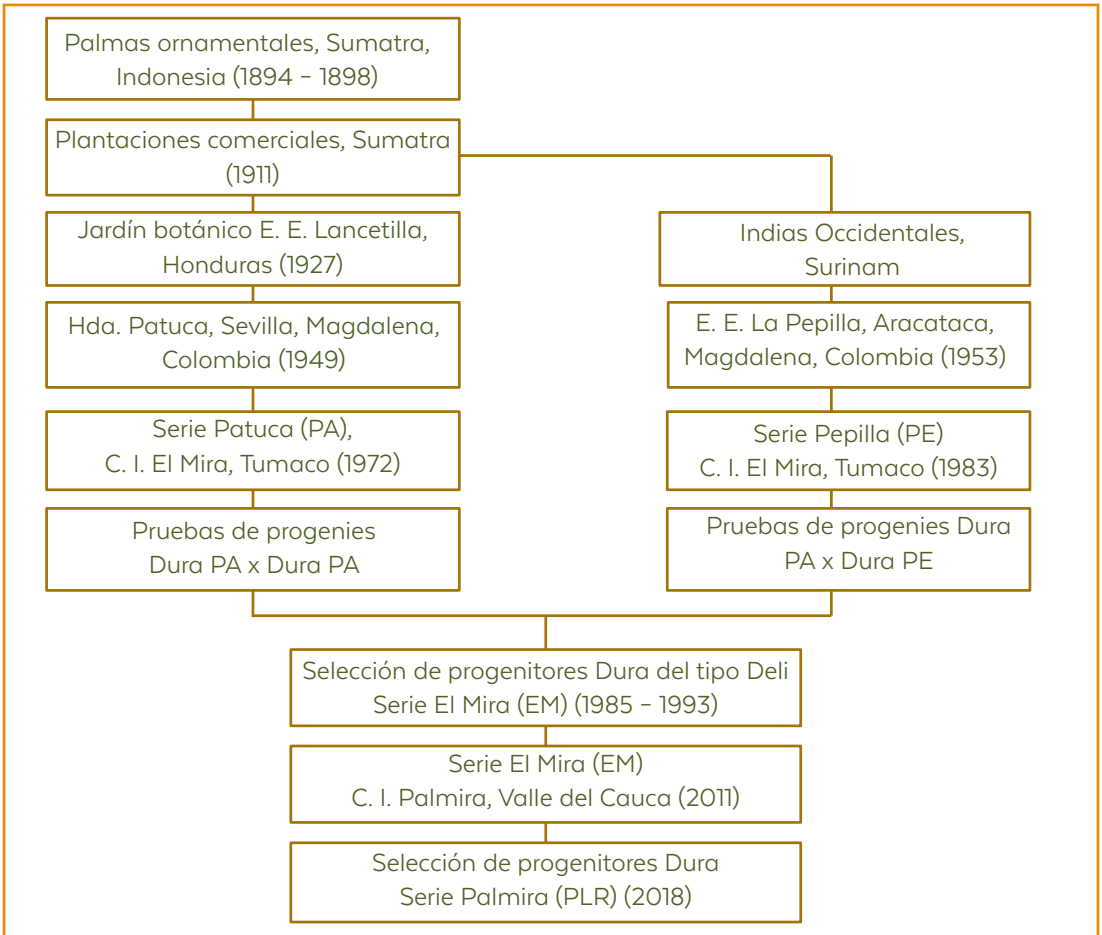


Figura 2.4. Genealogía de los recursos genéticos de origen asiático del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA.
Fuente: Elaboración propia

Palma americana de aceite *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés

La palma americana de aceite fue descrita por primera vez en 1763 por Nicholas Joseph Jacquin, quien incorporó el género *Elaeis* y le dio el nombre genérico de "corozo", y además indicó que esta palma crecía espontáneamente en el norte de Colombia (Barcelos, 1986; Vallejo, 1976). En 1897, Karl Sigismund Kunth la clasificó como *Alfonsia oleifera* Kunth, y más tarde la especie fue trasladada al género *Elaeis* por Cortés, quien la denominó *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés (Tropicos, s. f.).

Hasta mediados del siglo pasado, la palma americana de aceite permaneció en estado silvestre, y los grupos de crecimiento espontáneo eran explotados por los pobladores cercanos. Esta palma adquirió importancia agronómica al iniciar la segunda mitad del siglo pasado (1950-1970), porque demostró resistencia a las principales enfermedades de la palma africana de aceite (*E. guineensis)* (Hardon, 1969; Rao & Ahmad, 1983; Vallejo, 1975, 1976). Además de la resistencia, la especie *E. oleifera* posee las siguientes cualidades:

- Produce aceite con alta proporción de ácidos grasos insaturados, en especial oleico y linoleico (Moretzsohn et al., 2002).
- Tiene una baja tasa de crecimiento, de 10 a 15 cm/año, lo que equivale a un mayor periodo de explotación del cultivo (Bastidas et al., 2013; Rey et al., 2004).
- Produce aceite con alto índice de yodo, carotenos precursores de la vitamina A y tocoferoles (Forster et al., 2017; Le Guen et al., 1991; Sánchez Chia, 2012).

Origen y dispersión en el continente americano

Según la hipótesis del origen americano del género *Elaeis*, es probable que se formara en la era terciaria, antes de la separación de África y Suramérica. Luego de la separación, en África evolucionó la especie *E. guineensis* y en América, *E. oleifera* (Evans, 1991). El centro de origen americano de *E. oleifera* está plenamente aceptado por la comunidad científica, debido a las áreas de dispersión, usos y evidencias lingüísticas, por lo cual se le asignó el nombre de "palma americana de aceite" (Smith, 2015). En Colombia se la conoce por uno de sus nombres indígenas, "palma nolí" (Hurtado, 1969; Patiño, 1977). Varios autores sitúan su centro de origen en una amplia zona del continente americano, desde México y Centroamérica hasta el norte de Suramérica, incluida la cuenca del Amazonas (Barcelos, 1998; Ghesquière et al., 1987). Otros limitan aún más su centro de origen, al considerar que proviene de la costa del Pacífico en Costa Rica, desde donde se dispersó hacia el sur hasta llegar a la cuenca amazónica (Morcote-Ríos & Bernal, 2001).

En la actualidad, la especie se ha dispersado y crece de manera espontánea en valles, orillas de ríos y terrazas pantanosas de Brasil, Colombia, Costa

Rica, Guayana Francesa, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Surinam, Ecuador, Perú y Venezuela (Meunier, 1975; Vallejo, 1976).

El centro de origen de la especie *E. oleifera* presenta dos subcentros de dispersión geográficamente bien diferenciados, aislados uno del otro por la cordillera de los Andes. El primero (Sc1) se extiende desde México y Centroamérica (Honduras, Costa Rica, Panamá) hasta el norte de Suramérica (norte de Colombia y Venezuela, Guayana y Surinam), y el segundo (Sc2) corresponde a la cuenca amazónica, en amplias regiones de Brasil, Colombia, Perú y Ecuador (Barcelos, 1998; Ghesquière, 1987; Montúfar et al., 2018). El aislamiento geográfico ha impedido el flujo de genes entre palmas de los dos subcentros, por lo cual se puede afirmar que la variabilidad es menor al interior de cada uno. Un estudio sobre diversidad genética y fenotípica de 34 accesiones de la palma nolí de cuatro países de Suramérica (Brasil, Colombia, Ecuador y Perú) demostró diferencias estadísticas en los componentes del racimo y en el rendimiento, y la presencia de alelos específicos en cada país de origen. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre zonas geográficas (regiones) dentro de cada país (Arias et al., 2015). El Sc1 ha evidenciado mayor variación morfológica (Ooi et al., 1981), por lo cual puede ser el centro de origen de la especie *E. oleifera*, mientras que el Sc2 puede ser un centro de diversificación secundaria (Ghesquière, 1987; Meunier, 1975). Los dos subcentros de dispersión, en escala de tiempo geológico, pueden convertirse en centros de especiación, es decir, puntos donde la especie se separa en subespecies.

Dispersión en Colombia

Entre los países centro de origen de la especie, Colombia es el único con los *dos subcentros* de dispersión:

- El primero comprende la región noroccidental de Colombia, en las partes bajas y las llanuras del Golfo de Urabá; el valle del río Sinú; las riberas de los ríos San Jorge, Cauca (bajo Cauca), Magdalena (medio y bajo), y las áreas cercanas al río Cesar (Meunier, 1975; Vallejo, 1976).

- El segundo comprende la Amazonía colombiana y el suroriente del país. Este subcentro forma parte de una amplia zona de dispersión compartida por Colombia, Ecuador, Perú y Brasil, y se caracteriza por bosques de galería y áreas boscosas poco densas sujetas a inundaciones periódicas (Meunier, 1975; Vallejo, 1976).

Prospecciones y selección

Los recursos genéticos de *E. oleifera* fueron incluidos en el programa de mejoramiento de la palma de aceite de AGROSAVIA, en el orden cronológico que se describe a continuación:

- 1959: Maurice Ferrand, experto de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), suscitó el interés institucional y gubernamental de Colombia por las especies oleaginosas *E. guineensis* y *E. oleifera* en la consultoría prestada bajo el título *Posibilidades de las oleaginosas en Colombia* (Ferrand, 1960). La "misión Ferrand 1959", como se llamó a este trabajo, se llevó a cabo desde julio de 1958 hasta junio de 1959, y fue acompañada por funcionarios del IFA desde la sede de este instituto en Cereté (Ferrand, 1960).
- 1959: el IFA hizo una de las primeras prospecciones de la palma nolí en cercanías de Cereté y realizó la evaluación en campo de ejemplares de esta palma en fincas del valle del río Sinú, desde 1959 hasta 1964. El trabajo fue el primer intento gubernamental de investigar esta especie oleaginosa.
- 1965: en la plantación La Arenosa de *E. guineensis*, ubicada en Turbo, departamento de Antioquia, se mantuvieron en observación algunas palmas nolí (*E. oleifera*) que habían crecido de forma espontánea dentro del cultivo, el cual había sido afectada por la pudrición del cogollo (PC) en 1964. Las palmas nolí permanecieron inmunes a esa enfermedad (Hardon, 1969; Vallejo, 1976).
- 1965: la empresa palmera Indupalma de Colombia estudió el comportamiento de algunas palmas nolí en una hacienda cercana a San Alberto, departamento de Cesar.

- 1971: un grupo de investigadores del IRHO (Cirad), del ICA, y agrónomos de las empresas palmeras Coldesa[10] e Induplma[11], realizaron otra prospección de palmas nolí en áreas de influencia del municipio de Cereté, y como resultado quedaron 54 ejemplares seleccionados.
- 1973 a 1976: el IRHO y el ICA desarrollan un programa de hibridación interespecífica con el objetivo de solucionar el problema de la PC (IRHO, 1973). Emplean como madres palmas seleccionadas en el valle del río Sinú, Cereté, y como donantes de polen, palmas *E. guineensis* de la serie La Mé provenientes de Costa de Marfil. A pesar de estos esfuerzos, la plantación La Arenosa Coldesa pierde cerca de 2.500 ha por la PC (Sanz, 2016), y la región de Turbo, Antioquia, deja de ser zona palmera hasta principios del presente siglo. Sin embargo, las palmas nolí (*E. oleifera*) resisten el impacto de la PC.
- 1977: en la Estación Experimental El Mira, se someten a pruebas de habilidad combinatoria general (HCG) y específica (HCE) las progenies de 100 cruzamientos interespecíficos entre palmas nolí y palmas africanas del programa de hibridación antes mencionado, 36 progenies de HCG y 64 de HCE.
- 1977: en la Estación Experimental El Mira se establecen 59 progenies de palma nolí obtenidas tanto por cruzamiento —hibridación intraespecífica— entre palmas seleccionadas en el valle del río Sinú, como por autofecundación de algunas de las 54 palmas seleccionadas.

El germoplasma antes descrito conforma la población parental de palma de aceite de origen americano (*E. oleifera*) y es la *tercera base* del programa de mejoramiento genético de la palma de aceite de AGROSAVIA. Este germoplasma es la fuente de resistencia a varias enfermedades, entre ellas la PC (Amblard et al., 2004; Chinchilla, 2007; Rajanaidu, 1994) y amarillamiento fatal y fusariosis. El árbol genealógico del germoplasma de la palma de aceite de origen americano introducido al programa de mejoramiento genético en Colombia se expone en la figura 2.5.

10 Coldesa: plantación comercial de palma africana de aceite, ubicada en Turbo, Antioquia.

11 Indupalma: plantación comercial de palma africana de aceite, ubicada en San Alberto, Cesar.

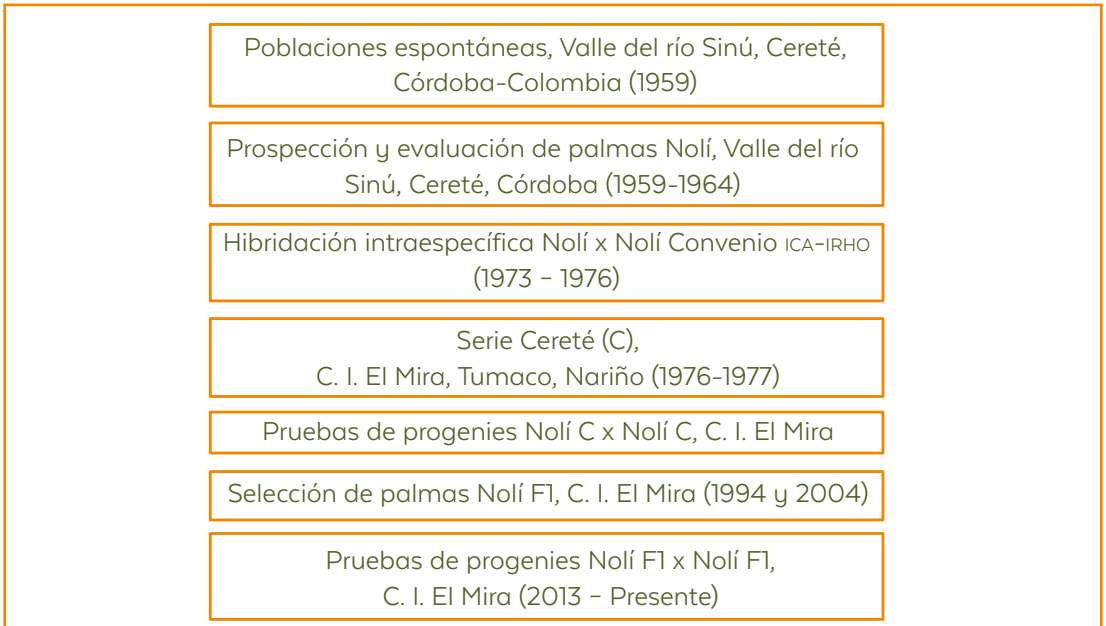


Figura 2.5. Genealogía de los recursos genéticos de origen americano del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA.
Fuente: Elaboración propia

Colecciones de trabajo

La explotación comercial a nivel mundial de la palma *E. guineensis* se basa en cultivares cuya base genética es reducida. La producción de cultivares en 1848 se hizo con cuatro palmas ornamentales del Jardín Botánico de Buitenzorg, en Bogor, Java (Setiawati et al., 2018; Soh, 2012), sometidas a procesos básicos de multiplicación y selección, y su descendencia fue utilizada para establecer grandes plantaciones en Sumatra, Indonesia, entre 1910 y 1920. Otra fuente de cultivares son los descendientes de la palma Djongo del Jardín Botánico de Eala, Zaire; con ellos se establecieron cultivos comerciales en Zaire y en toda África ecuatorial (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1988). Estas dos fuentes de germoplasma fueron utilizadas rápidamente para dispersar la especie *E. guineensis* en Centro y Suramérica (Colombia incluida). Se puede afirmar, por tanto, que la palmicultura mundial es el resultado de la combinación y recombinación de un germoplasma con estrecha base genética (Sterling & Alvarado, 2002).

Los recursos genéticos conservados en los bancos de germoplasma son valiosos para el mejoramiento de las especies. Ahora bien, hay un factor técnico que debe tomarse en cuenta: los programas de mejoramiento dependen más de los recursos genéticos disponibles en las colecciones de trabajo, que de los conservados en los bancos, porque los primeros pasaron por ciclos de selección y mejoramiento, mientras que los segundos, en la mayoría de los casos, no pasaron por procesos de selección.

¿Cómo pueden definirse un banco de germoplasma y una colección de trabajo? Un *banco de germoplasma* es una colección de la diversidad y la variabilidad de una especie (o de varias especies), se maneja de acuerdo con un conjunto de normas y procedimientos técnicos ya estandarizados con el fin de conservarla, y se usa como fuente de recursos genéticos en los procesos de mejoramiento (International Board for Plant Genetic Resources [IBPGR], 1991; ICA, 2011a). La diversidad genética es el número total de características en el acervo genético de una especie, mientras que la variabilidad es la tendencia de las características genéticas a variar entre plantas de una especie (Bakoumé, 2016).

Una *colección de trabajo* es un grupo de accesiones de una especie, obtenidas de un banco de germoplasma o de otra fuente (cultivos, fincas, etc.) mediante procesos de selección. Se utiliza para mejorar un cultivo con tres procedimientos: selección por caracteres, cruzamiento e hibridación. En otras palabras, una colección de trabajo es una muestra de accesiones premejoradas y mejoradas, y su objetivo primordial es ser usada en el mejoramiento genético, no en la conservación de los recursos (IBPGR, 1991; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2014).

De acuerdo con estas definiciones, las colecciones de trabajo conforman un acervo de genotipos, columna vertebral y fuente del potencial productivo (evaluado) de la especie para el programa de mejoramiento (por ejemplo, genotipos de alto rendimiento o con adaptación específica), mientras que el banco de germoplasma es fuente de cualidades complementarias (acervo de genes), absolutamente necesarias para el mejoramiento genético, por ejemplo, genes para resistencia a una enfermedad.

Las colecciones de trabajo del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA están constituidas por tres fuentes de germoplasma, diferentes por su origen primario. La colección de la especie *E. guineensis* tiene germoplasma originario de África (primera fuente) y de Asia (segunda fuente), mientras que la de *E. oleifera* tiene recursos genéticos originarios de Colombia (tercera fuente). Esa misma conformación se encuentra en el Banco de Germoplasma.

Las colecciones de trabajo de la especie *E. guineensis* están constituidas por cruzamientos recombinantes de las mejores palmas de cada tipo (Dura, Ténera, Pisífera, ver capítulo 1) de la siguiente manera:

La colección de palmas Dura F2, establecida en el C. I. La Libertad en 2010 y en el C. I. Palmira en 2011, se formó con cruzamientos de palmas Dura F1, cuya producción fue superior a 27,4 t de racimos de fruta fresca (RFF) por ha/año, con potencial de producción de aceite superior a 7,2 t/ha/año (tabla 2.1).

De igual manera, la colección de trabajo origen de las palmas Pisífera[12] se hizo mediante cruzamiento de palmas Ténera F2, provenientes de familias Ténera × Ténera cuya producción promedio fue de 25,9 t de RFF/ha/año, con un potencial de producción de aceite de 7,7 t/ha/año (tabla 2.2). La siembra de esta colección también se realizó en 2010 y 2011 en los C. I. La Libertad y Palmira, respectivamente.

El establecimiento de estas colecciones en el C. I. Palmira (figuras 2.6, 2.7), aisladas geográficamente de cultivos comerciales de palma de aceite, obedeció más a la decisión de establecer una copia de seguridad que una colección de trabajo. Dado que la especie *E. guineensis* es susceptible a PC, se espera que en el C. I. Palmira las palmas permanezcan libres de la enfermedad. Además, estas colecciones son estratégicas porque brindan apoyo al C. I. El Mira en la producción de semillas de los híbridos interespecíficos obtenidos al cruzar palmas de *E. oleifera* con polen de *E. guineensis* producido en el C. I. Palmira.

12 Las palmas de tipo Pisífera presentan esterilidad femenina; por tanto, las progenies Pisífera F3 se obtienen de cruzamientos segregantes Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera.



Figura 2.6. Establecimiento de la colección de trabajo en el C. I. Palmira.
a. Establecimiento de progenies Ténera × Ténera; b. Establecimiento de progenies Dura F2.
Fotos: Silvio Bastidas Pérez

No se puede garantizar esa misma sanidad a las palmas de las colecciones ubicadas en el C. I. La Libertad, donde la PC y otras enfermedades, como marchitez letal y marchitez sorpresiva, afectan los cultivos comerciales de la palma de aceite.

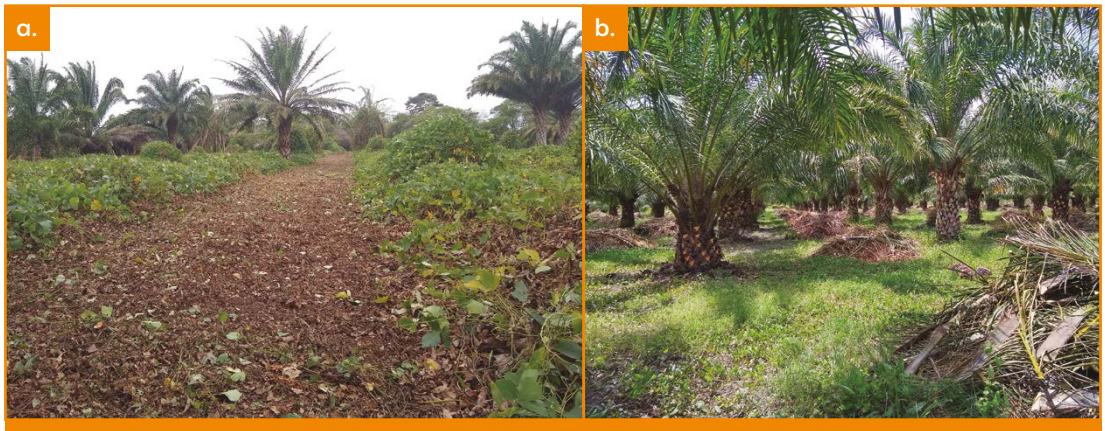


Figura 2.7. Colección de trabajo de la palma *Elaeis guineensis.*
a. Colección de palma *E. guineensis* tipo pisífera en el C. I. La Libertad;
b. Colección de palma *E. guineensis* tipo Dura, C. I. Palmira.
Fotos: Leidy Paola Moreno

La colección de trabajo de la palma americana de aceite (*E. oleifera)* contiene palmas de primera generación de cruzamientos (F1) y de primera autofecundación (S1), con un ciclo completo de adaptación a las condiciones agroclimáticas de Tumaco. Está conformada por 59 progenies de la serie Cereté[13] obtenidas como se indica a continuación:

- Por cruzamiento controlado, 38 progenies (relación de hermanos completos).
- Por polinización abierta, diez progenies (relación de hermanos medios).
- Por autofecundación, once progenies (relación de autohermanos).

La colección de palmas *E. oleifera* fue sembrada en 1977 en la Estación Experimental El Mira, y permanece aún en el centro, porque ha sido resistente a la PC.

La especie *E. oleifera* es fuente de resistencia a enfermedades (Amblard et al., 2004; Chinchilla et al., 2007; Rajanaidu, 1994), pero adolece de baja tasa de extracción de aceite. La palma nolí tipo Cereté presenta desde menos de 5 % hasta cerca de 12 % de aceite por racimo (Bastidas et al., 2013). En la tabla 2.3, se presentan diez individuos que presentaron porcentajes de extracción de aceite superiores a 10,4 %.

13 Se asignó el nombre Cereté a la serie de palmas nolí seleccionadas en el valle del río Sinú, municipio Cereté, departamento Córdoba (código C), para recordar el origen del germoplasma parental de las accesiones de la colección de trabajo.

Tabla 2.1. Características de diez palmas Dura F1 empleadas en la obtención de las progenies Dura F2 de las colecciones de trabajo de *E. guineensis* situadas en el C. I. La Libertad, Villavicencio, departamento del Meta, y en el C. I. Palmira, departamento del Valle del Cauca (promedios de cinco años de producción)

Identificación de la familia (año siembra)	Identificación de la palma F1 seleccionada	Número de racimos (ud./palma)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de RFF (t/ha/año)	Pulpa en fruto (%)	Cuesco en fruto (%)	Almendra en fruto (%)	Aceite en racimo (%)	Producción de aceite (t/ha/año)
PA221D × PA179D (1972)	EM542D	12	17,2	30,3	58,7	30,6	10,7	25,2	7,6
PA221D × PA179D (1972)	EM581D	13	16,8	32,0	63,1	27,1	9,8	24,4	7,8
PA179D × PA542D (1972)	EM779D	15	17,0	35,4	66,4	26,5	7,1	25,2	8,9
PA350D × PA179D (1972)	EM1321D	21	12,6	37,1	57,2	35,2	7,6	24,4	9,1
PA221D × PA179D (1972)	EM1722D	19	13,6	36,2	61,2	31,5	7,3	25,9	9,4
PA208D × PA542D (1972)	EM1968D	15	15,5	33,8	64,1	27,8	8,1	27,1	9,2
PA241D × PA241D (1983)	EM0311D	9	22,9	30,0	54,5	35,2	10,3	23,9	7,2
PE586D × PE687D (1983)	EM420D	13	18,5	34,5	59,8	32,2	8,0	21,2	7,3
PE687D × PA241D (1983)	EM2404D	13	18,4	34,2	54,8	37,8	7,4	25,6	8,8
PA315D × PA464D (1983)	EM4609D	9	21,3	27,4	63,4	30,8	5,8	33,0	9,0
Promedio		**16**	**15,4**	**34,1**	**61,8**	**61,8**	**8,4**	**25,4**	**8,7**

EM: serie El Mira, C. I. El Mira, Tumaco, Nariño; D: Dura; ×: símbolo de cruzamiento.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.2. Características de las familias Ténera × Ténera*, de las cuales se originaron las progenies Ténera/Pisífera F3 de las colecciones de trabajo de *E. guineensis* situadas en el C. I. La Libertad, Villavicencio, departamento del Meta, y en el C. I. Palmira, departamento del Valle del Cauca (promedios de cinco años de producción)

Identificación de la familia Ténera F1 × Ténera F1	Número racimos (ud./palma)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de RFF (t/ha/año)	Pulpa en fruto (%)	Cuesco en fruto (%)	Almendra en fruto (%)	Aceite en racimo (%)	Producción de aceite (t/ha/año)
CL1170T×CL798T	19	8,9	24,2	82,8	8,9	8,3	26,1	6,3
CL821T×CL1089T	23	9,1	26,7	85,2	7,9	6,9	32,7	8,7
CL798T×CL1089T	18	11,2	29,1	85,3	7,3	7,4	30,8	8,9

(Continúa)

(Continuación tabla 2.2.)

Identificación de la familia Ténera F1 × Ténera F1	Número racimos (ud./palma)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de RFF (t/ha/año)	Pulpa en fruto (%)	Cuesco en fruto (%)	Almendra en fruto (%)	Aceite en racimo (%)	Producción de aceite (t/ha/año)
CL821T×CL1170T	23	9,3	28,8	81,6	8,5	6,9	29,4	8,5
CL743T×CL798T	17	8,4	20,6	81,1	10,7	8,2	29,4	6,1
Promedio	**20**	**9,4**	**25,9**	**83,8**	**8,7**	**7,5**	**29,7**	**7,7**

CL: serie Calima, C. I. El Mira, Tumaco, Nariño; T: Ténera; ×: símbolo de cruzamiento; RFF: racimos de fruta fresca.
* Con base en el promedio de las características de las palmas Ténera segregantes en su respectiva familia.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3. Características de racimos y frutos de las diez palmas superiores en cuanto a contenido de aceite en los racimos de la palma americana de aceite (*E. oleifera*), de la colección de trabajo ubicada en el C. I. El Mira, Tumaco

Familia (accesión)	Palma nolí F1	Peso racimo (kg)	Frutos fértiles (%)	Frutos partenocárpicos (%)	Frutosen racimo (%)	Pulpa en fruto (%)	Cuesco en fruto (%)	Almendra en fruto (%)	Aceite en racimo (%)
C429N × C462N	EM5933N	13,50	50,50	14,20	82,96	45,43	41,38	13,18	11,85
C47N × C11N	EM3533N	17,80	53,28	8,03	82,02	47,54	39,61	12,84	11,79
C423N × C428N	EM5901N	11,00	53,07	8,15	80,90	37,84	45,95	16,20	11,64
C17N × C09N	EM3514N	10,00	33,75	21,59	78,00	41,09	47,22	11,68	11,45
C43N × C405N	EM5117N	12,90	42,43	13,05	78,29	45,15	42,66	12,18	10,88
C41N × C412N	EM4310N	16,50	57,48	8,88	86,06	42,83	43,60	13,56	10,84
C492N × C306N	EM5510N	24,20	55,01	16,06	89,66	44,66	41,81	13,58	10,81
C02N × LP	EM313N	11,10	31,11	13,04	77,47	40,78	47,18	12,03	10,74
C17N × C05N	EM3107N	10,70	36,55	23,81	81,30	41,01	43,13	15,84	10,48
C47N x C11N	EM3430N	9,50	27,72	21,14	76,84	43,36	42,76	13,86	10,44

C: serie Cereté; EM: serie El Mira; N: palma nolí (*E. oleifera*); LP: polinización abierta; X: símbolo de cruzamiento.
Fuente: Elaboración propia

El aceite de la palma nolí tipo Cereté sobresale por su alto contenido de ácidos grasos insaturados oleico y linoleico; alto índice de yodo, alto contenido de beta-carotenos, y por su bajo punto de fusión (tabla 2.4).

Tabla 2.4. Características del aceite de 30 progenies F1 de la palma nolí (*Elaeis oleifera* [Kunth] Cortés) de la colección de trabajo, conservadas en el C. I. El Mira, Tumaco

Descriptor	Promedio general	Valor máximo	Valor mínimo
Índice de refracción a 50°C (ud.)	1,4616	1,4650	1,4595
Punto de fusión (°C)	10,10	12,80	8,40
Índice de yodo (cg I_2/g)	85,09	92,60	81,70
Caproico (%)	0,00	0,00	0,00
Caprílico (%)	0,00	0,02	0,00
Cáprico (%)	0,03	0,47	0,00
Láurico (%)	0,19	0,92	0,01
Mirístico (%)	0,30	1,11	0,09
Pentadecanoico (%)	0,14	0,90	0,00
Palmítico (%)	18,01	21,25	11,86
Palmitoleico (%)	1,47	2,22	0,84
Heptadecanoico (%)	0,06	0,51	0,00
Heptadecenoico (%)	0,10	0,18	0,05
Esteárico (%)	1,00	1,23	0,84
Oleico (%)	60,59	70,19	55,79
Linoleico (%)	16,77	20,52	9,67
Linolénico (%)	0,89	1,30	0,08
Araquídico (%)	0,11	0,18	0,07
Gandoleico (%)	0,11	0,22	0,08
Behenico (%)	0,14	0,88	0,01
Lignocérico (%)	0,11	1,09	0,00
Grasa insaturada (%)	79,98	86,32	77,28
Grasa saturada (%)	20,02	22,72	13,68
Beta-caroteno (mg/100 g)	867,95	1.676,00	403,00
Delta-tocoferol	0,66	3,20	0,00
Gama-tocoferol	1,62	8,40	0,04
Alfa-tocoferol	6,12	24,80	0,01

Ácido graso oleico: omega 9; ácido graso linoleico: omega 6; ácido graso linolénico: omega 3 (Cantor, 2009).
Fuente: Elaboración propia

Los ácidos grasos monoinsaturados (oleico) y poliinsaturados (linoleico y linolénico) tienen un punto de fusión más bajo que los ácidos grasos saturados (palmítico y esteárico), y esta es la razón por la cual el aceite de la palma nolí es líquido a temperatura ambiente (Tan et al., 2000, citados por Cantor, 2009).

En Malasia, el nolí de origen colombiano produce aceite con 92,6 cg/g de índice de yodo (Sharma, 1999). En las palmas nolí amazónicas y de otros orígenes, el índice de yodo oscila entre 76,4 y 84,5 cg/g, mientras que en palmas Ténera de la especie *E. guineensis* entre 53,3 y 58,4 cg/g (FAO, 2013).

Son varias las referencias sobre las propiedades medicinales de los beta-carotenos. Entre otras, reducen las probabilidades de ataques cardíacos, son antioxidantes y liposolubles, y refuerzan el sistema inmune (Dadán, 2005; Selvaduray et al., 2005; Sundram & Gapor, 1994).

La colección de trabajo de la palma nolí se incrementó, entre 2013 y 2017, en 61 accesiones, obtenidas mediante cruzamientos recombinantes de palmas nolí F1; en la actualidad, la colección cuenta con 120 progenies, de las cuales 59 son de primera generación de cruzamiento, y las 61 restantes, de la segunda generación de cruzamiento.

El propósito de las 61 progenies nolí F1 × nolí F1 es lograr la introgresión de cuatro características distintivas del nolí tipo Cereté, y generar nuevos genotipos y variabilidad. Las cuatro características son las siguientes:

1. Epidermis de los frutos de color verde-amarillo, en estado inmaduro y maduro, respectivamente.
2. Epidermis de los frutos de color amarillo-rojo naranja, en estado inmaduro y maduro, respectivamente.
3. Prolificidad, entendida como la emisión de dos o más inflorescencias (racimos) en algunas hojas de la palma.
4. Palmas con emisión de inflorescencias expuestas en más de 50 % de su longitud, lo que significa que no tienen fibras de cobertura de las inflorescencias.

Los cruzamientos se llevaron a cabo por pares de características; también se cruzaron palmas con la misma cualidad para tratar de fijarla.

Según lo anterior, la base genética de la especie *E. oleifera* del programa de mejoramiento de la palma de aceite de AGROSAVIA es reducida, ya que los ancestros de estas palmas, conservados en el Banco de Germoplasma y las colecciones de trabajo, fueron recolectados en el valle del río Sinú, Cereté, dentro de una pequeña área del centro de origen Sc1 de la especie.

Cultivares obtenidos

En las colecciones antes descritas, los recursos genéticos conservados se usaron de forma adecuada y eficiente. Mediante la aplicación de un sistema de selección apropiado (capítulos 4, 5 y 6), fue posible obtener cuatro cultivares de palma de aceite (un híbrido intraespecífico y tres interespecíficos), todos inscritos en el registro nacional de cultivares comerciales del ICA:

- Cultivar Ténera Corpoica El Mira de palma de aceite: híbrido intraespecífico entre los tipos Dura y Pisífera de la especie *E. guineensis*, con Registro ICA n.º PLA-04-3 de abril de 2004 (Bastidas et al., 2004; ICA, 2004).
- Híbrido O × G Corpoica Elmira de palma de aceite: híbrido interespecífico obtenido mediante cruzamiento controlado entre palmas de la especie *E. oleifera* con polen de la especie *E. guineensis* (Bastidas et al., 2013), Registro ICA n.º PLA-11-04 de marzo de 2011 (ICA, 2011b).
- Híbrido Pacífico RC1 de palma de aceite: híbrido interespecífico obtenido mediante cruzamientos regresivos de los híbridos O × G hacia la especie *E. guineensis* tipo Pisífera (Bastidas et al., 2005), con Registro ICA n.º PLA-14-27 de marzo de 2014 (ICA, 2014a).
- Híbrido Tumaco RC1 de palma de aceite: híbrido interespecífico obtenido mediante cruzamientos regresivos de los híbridos O×G hacia la especie *E. guineensis* tipo Dura (Bastidas et al., 2005), con Registro ICA n.º PLA-14-26 de marzo de 2014 (ICA, 2014b).

Referencias

Alvarado, A., Escobar, R., & Peralta, F. (2010). El programa de mejoramiento genético de la palma de aceite de ASD Costa Rica y su contribución a la industria. *ASD Oil Palm Papers, 34,* 17-32.

Amblard, P., Billotte, N., Cochard, B., Durand, T., Jacquemard, C. J., Louise, C., Novy, B., & Potier, F. (2004). El mejoramiento de la palma de aceite *E. guineensis* y *E. oleifera* por el CIRAD-CP. *Palmas, 25*(n.º especial, tomo II), 306-310.

Arias, F. J., Figueredo, V. P., Mena, E., Owen, E., & Jiménez, O. (1988). *Origen de los progenitores Dura y Pisífera para producción de semilla de palma africana del* ICA. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Arias, D., González, M., Prada, F., Ayala-Díaz, I., Montoya, C., Daza, E., & Romero, H. M. (2015). Genetic and phenotypic diversity of natural American oil palm (*Elaeis oleifera* [H.B.K.] Cortés] accessions. *Tree Genetics & Genomes, 11,* Article 122. https://doi.org/10.1007/s11295-015-0946-y

Bakoumé, C. (2016). Genetic diversity, erosion, and conservation in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). In M. Ahuja & S. Jain (eds.), *Genetic diversity and erosion in plants* (Vol. 8, pp. 1-33). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25954-3_1

Barba, J., Orellana, F., Vallejo, G., & Manzano, R. (2010a). Evaluación agronómica de híbridos interespecíficos de palma de aceite O×G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) provenientes de diversos orígenes americanos y su tolerancia a la pudrición del cogollo. *Palma* (Ecuador), 11-15.

Barba, J., Orellana, F., Vallejo, G., & Manzano, R. (2010b). Evaluación agronómica de híbridos interespecíficos de palma de aceite O×G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) provenientes de diversos orígenes americanos y su tolerancia a la pudrición del cogollo: segunda parte. *Palma* (Ecuador) (4), 2-5.

Barcelos, E. (1986). *Características genético-ecológicas de populações naturais de caiaué (*Elaeis oleifera *[H.B.K.] Cortés) na Amazônia brasileira* [Dissertação mestrado em Ecologia]. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil.

Barcelos, E. (1998). *Etude de la diversité géaétique du genere Elaeis* (E. oleifera *[Kunth] Cortés et* E. guineensis *Jacq.) par marqueurs moléculaires (RFLP et AFLP)* [Doctoral dissertation thesis]. Université Montpellier.

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2003). Genealogía del germoplasma de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) del proyecto de mejoramiento genético de Corpoica. *Palmas 24*(1), 21-29.

Bastidas, S., Peña, E. A., & Reyes, R. (2005). Metodología de selección para el mejoramiento genético acelerado de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*): prueba de campo. *Revista Fitotecnia Colombiana 5*(1), 46-52.

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2013). *Preguntas sobre palma de aceite* Elaeis guineensis *Jacq., palma nolí* Elaeis oleifera *(Kunth) Cortés y los híbridos interespecíficos nolí × palma de aceite (*E. oleifera × E. guineensis*)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://doi.org/10.21930/978-958-740-161-5

Bastidas, S., Reyes, R., & Peña, E. A. (2004). *Ténera Corpoica El Mira: material de palma de aceite colombiano* [Boletín técnico]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/20560

Berretta, A., & Rivas, M. (2001). *Estrategias en recursos fitogenéticos para los países del cono sur.* Procisur. https://www.procisur.org.uy/adjuntos/plataforma-regional/21.pdf

Cantor, V. J. M. (2009). *Análisis de perfil de ácidos grasos, vitamina E y situación actual de rotulado nutricional en aceites vegetales de mayor comercialización en "pequeñas superficies" de Bogotá, Medellín y Barranquilla* [Trabajo de grado]. Pontificia Universidad Javeriana.

Chinchilla, C., Alvarado, A., Albertazzi, H., & Torres, R. (2007). Tolerancia y resistencia a las pudriciones de cogollo en fuentes de diferente origen de *Elaeis guinnensis*. *Palmas, 28* (número especial), 273-284.

Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (eds.). (2003). *The oil palm.* Oxford Blackwell Science Ltda. https://doi.org/10.1002/9780470750971

Dadán, S. (2005). El aceite de palma: una oportunidad para mejorar la nutrición del pueblo colombiano. *Palmas, 26*(número especial), 29-38.

Escobar, R., Sterling, F., & Peralta, F. (1996). Oil palm planting materials by ASD de Costa Rica. *ASD Oil Palm Papers,* (14), 1-12. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.14-1996-min.pdf

Evans Schultes, R. E. (1991). Notas taxonómicas, etnobotánicas y de nomenclatura sobre la *Elaeis*. *Palmas 12*(3), 17-21. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/290

Ferrand, M. (1960). Le nolí (*Elaeis melanococca* ou *Corozo oleifera*) en Colombie. *Oléagineux, 15*(12), 823-827.

Forster, B. P., Sitepu, B., Setiawati, U., Kelanaputra, E. S., Nur, F., Rusfiandi, H., Rahmah, S., Ciomas, J., Anwar, Y., Bahri, S., & Caligari, P. D. (2017). Oil palm (*Elaeis guineensis*). In *Genetic improvement of tropical crops* (pp. 241-290). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59819-2_8

Franqueville, H. D. (2001). *La pudrición del cogollo de la palma aceitera en América Latina: revisión preliminar de los hechos y logros alcanzados (n.º D-1372)*. CIRAD, Departamento de Cultivos Perennes. http://www.buecke.com.br/public/upload/arquivo/buecke/La%20pudricion%20del%20cogollo%20de%20la%20palma%20aceitera%20en%20America%20Latina-02c2d.pdf

Ghesquière, M., Barcelos, E., Santos, M. M., & Amblard, P. (1987). Polymorphisme enzymatique chez *Elaeis oleifera* H.B.K. (*Elaeis melanococca*): analyse des populations du Bassin amazonien. *Oléagineux, 42*(4), 143-153.

Hardon, J. J. (1969). Interespecific hybrids in the genus *Elaeis* II. vegetative growth and yield of the F1 hybrids of *Elaeis guineensis* × *Elaeis oleifera*. *Euphytica, 18*, 380-388. https://doi.org/10.1007/BF00397785

Hartley, C. W. S. (1969). Oil palm research in Colombia with special reference to selection, breeding seed productionan supply [Informe de la visita realizada a las plantaciones de palma de Colombia entre 23 de mayo y 11 de junio de 1969]. En *Informes técnicos de 1969: programa Oleaginosas Perennes, Regional 5* (Tomo I). Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Hartley, C. W. S. (1974). Oil palm research and development in Colombia [Informe presentado al Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)].

Hartley, C. W. S. (1988). *The oil palm, Elaeis guineensis Jacq.* (3.º ed.). Longman Group U. K.

Hurtado, M. J. R. (1969). *Estudio de la palmera nolí (*Elaeis melanoccoca *Gaert) y preliminares de su fitomejoramiento en Colombia* [Tesis de grado]. Universidad Nacional, Palmira, Colombia.

Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux [IRHO]. (1973). *Híbrido interespecífico* Elaeis melanoccoca × Elaeis guineensis*, intercambio internacional.*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2004). *Resolución 00961. "Por la cual se ordena el registro en el Registro Nacional de cultivares Comerciales del ICA, del híbrido de palma de aceite Ténera Corpoica El Mira, para las subregiones naturales Pacífico colombiano y Orinoquía colombiana, con el número de registro PLA-04-3".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2011a). *Manual de procedimientos técnicos, administrativos y presupuestales para el manejo de los bancos de germoplasma vegetal, animal y de microorganismos* [Documento de trabajo].

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2011b). *Resolución 001446. "Registro de cultivar comercial para producción y comercialización de semillas en Colombia: híbrido O×G Corpoica Elmira".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2014a). *Resolución 000977. "Registro de cultivar comercial para producción y comercialización de semillas en Colombia: híbrido Pacífico RC1".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2014b). *Resolución 000978. "Registro de cultivar comercial para producción y comercialización de semillas en Colombia: híbrido Tumaco RC1".*

International Board for Plant Genetic Resources [IBPGR]. (1991). *Dictionary of plant genetic resources.* Elsevier Science Publishers.

Kushairi, A., Rajanaidu, N., Jalam, B., Mohd Rafii, Y., & Mohd Din, A. (2000). Materiales de siembra de palma de aceite del Porim. *Palmas, 21*(3), 51-63.

Le Guen, V., Amblard, P., Omore, A., Koutou, A., & Meunier, J. (1991). Le programme hybride interspécifique *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensisde* L'IRHO. *Oléagineux, 46*(12), 479-487.

Lobo, M. (2008). Importancia de los recursos genéticos de la agrobiodiversidad en el desarrollo de sistemas de producción sostenibles. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 9*(2), 19-30. https://doi.org/10.21930/rcta.vol9_num2_art:114

Martínez, G., Sarria, G. A., & Varón, F. (2010). *Phytophthora palmivora* es el agente causal de la pudrición del cogollo de la palma de aceite. *Palmas, 31*(número especial, tomo I), 334-344. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1538

Méndez, T. (1974). *Report on plant breeding aspects of the oil palm programme of the Instituto Colombiano Agropecuario* (ICA).

Meunier, J. (1975). Le "palmier à huile" américain *Elaeis melanococca*. *Oléagineux, 30*(2), 51-61.

Meunier, J., & Boutin, D. (1975). L' *Elaeis melanococca* et l' hybrid *Elaeis melanococca* × *Elaeis guineensis*: premières donneés. *Oléagineux, 30*(1), 5-8.

Meunier, J., Vallejo, G., & Boutin, D. (1976). *E. melanococca* x *E. guineensis* hybrid and its improvement. *Oléagineux, 31*(2), 519-528.

Montúfar, R., Louise, C., & Tranbarger, T. J. (2018). *Eleais oleifera* (Kunth) Cortés: una palma abandonada de la Amazonía ecuatoriana. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas, 39*(1), 11-18. https://doi.org/10.26807/remcb.v39i1.584

Morcote-Ríos, G., & Bernal, R. (2001). Remains of palms (Palmae) at archaeological sites in the New World: A review. *The Botanical Review, 67*(3), 309-350. https://doi.org/10.1007/BF02858098

Moretzsohn, M. C., Ferreira, M. A., Amaral, Z. P. S., Coelho, P. J. A., Grattapaglia, D., & Ferreira, M. E. (2002). Genetic diversity of Brazilian oil palm (*Elaeis oleifera* H.B.K.) germplasm collected in the Amazon Forest. *Euphytica, 124*, 35-45. https://doi.org/10.1023/A:1015606304653

Ooi, S. C., Barcelos, E. S., Muller, A. A., & Nacimento, J. C. (1981). Oil palm genetic resources - native *E. oleifera* populations in Brazil offer promising sources. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 16*(3), 385-395.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2013). *Codex Alimentarius: documento de debate sobre la enmienda a la norma para aceites vegetales especificados para la adición del aceite de palma con contenido elevado de ácido oleico (O×G).*

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2014). *Normas para bancos de germoplasma de recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura.* https://www.fao.org/3/i3704s/i3704s.pdf

Patiño, V. M. (1948). Información preliminar sobre la palma de aceite africana (*Elaeis guineensis*) en Colombia: Estación Agroforestal del Pacífico, Calima, Buenaventura. *Serie Botánica Aplicada, 1*(2), 1-77.

Patiño, V. M. (1977). El corozo o nolí [*Elaeis oleifera* (HBK) Cortés Ex Wessels Boer] recurso natural oleaginoso de Colombia. *Cespedesia, 6*(21-22), 6-121.

Rajanaidu, N. (1994). *Porim oil palm genebank: Collection, evaluation, utilization and conservation of oil palm genetic resources*. Palm Oil Research Institute of Malaysia.

Rao, V., & Ahmad, N. (1983). Pattern of variation of fruit set and fruit components in *Elaeis oleifera* (HBK) Cortés bunches. *Porim Bulletin* (7), 1-8.

Rey, L., Gómez, P. L., Ayala, I., Delgado, W., & Rocha, P. (2004). Colecciones genéticas de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq., y *Elaeis oleifera* (H.B.K.) de Cenipalma: características de importancia para el sector palmicultor. *Palmas, 25*(número especial 2), 39-48.

Richardson, D. L. (1995). La historia del mejoramiento genético de la palma aceitera en la compañía Unit Fruit en América. *ASD Oil Palm Papers,* (11), 1-22. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.11-1995-min.pdf

Sambanthamurthi, R., Singh, R., Kadir, A. P. G., Abdullah, M. O., & Kushairi, A. (2009). Opportunities for the oil palm via breeding and biotechnology. In S. M. Jain & P. M. Priyadarshan, *Breeding plantation tree crops: Tropical species* (pp. 377-421). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_11

Sánchez Chia, G. (2012). *Caracterização morfofisiológica e anatômica de folhas de dendezeiro (*Elaeis guineensis *Jacq.), de caiaué (*E. oleifera *(Kunth) Cortés) e híbrido interespecífico (*E. guineensis *×* E. oleifera*) nas condições da Amazônia Central* [Tese doutorado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil]. https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/4676/2/Tese%20-%20Gilson%20S%C3%A1nchez%20Chia.pdf

Sanz, J. (2016). Pudrición del cogollo: enfrentamiento integral contra un enemigo letal, *P. palmivora*. *Palmas, 37*(especial, tomo I), 109-114.

Sarria, G. A., Torres, G. A., Aya, H. A., Ariza, J. G., Rodríguez, J., Vélez, D. C., Varón, F., & Martínez, G. (2008). *Phytophthora* sp. es el responsable de las lesiones iniciales de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite en Colombia. *Palmas, 29*(edición especial), 31-41.

Selvaduray, K. R., Teoh Koon, H., & Nesaretnam, K. (2005). Antioxidantes y cáncer de próstata. *Palmas, 25*(2), 73-83. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1133

Setiawati, U., Sitepu, B., Nur, F., Forster, B. P., & Dery, S. (2018). *Crossing in oil palm: A manual* (Vol. 6). CABI. https://doi.org/10.1079/9781786395917.0000

Sharma, M. (1999). Utilization of nigerian PS1 y PS2 selection in oil palm breeding programmes at UP Bhd. In *Proceedings of the seminar on PS1 and PS2 oil palm planting materials*. Palm Oil Research Institute of Malaysia (Porim).

Smith, N. (2015). *Elaeis oleifera*. In *Palms and people in the Amazon* (pp. 225-234). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05509-1_32

Soh, A. C. (2012). Breeding and genetics of the oil palm. In *Palm oil* (pp. 31-58). AOCS Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-9818936-9-3.50005-8

Sterling, F., & Alvarado, A. (2002). Historia de las colecciones de germoplasma de palma aceitera de ASD de Costa Rica. ASD *Oil Palm Papers,* (24), 17-23. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.24-2002-min.pdf

Sundram, K., & Gapor, A. (1994). La vitamina E del aceite de palma: su extracción y propiedades nutricionales. *Palmas, 15*(1), 77-82. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/427

Tan, Y. A., Ainic, K., Siew, W. L., Mohtar, Y., & Chong, C. L. (2000). Estudio del Porim sobre el aceite de palma crudo 97-98: características de calidad e identidad. *Palmas, 21*(4), 39-56. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/751

Torres, M., Rey, L., Gelves, F., & Santacruz, L. (2004). Evaluación del comportamiento de los híbridos interespecificos *E. oleifera* × *E. guineensis,* en la plantación Guaicaramo S. A. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 350-357.

Tropicos. (s. f.). *Elaeis oleífera*. http://www.tropicos.org/NameSearch.aspx?exact=true&name=Elaeis+oleifera&commonname=

Turner, P. D. (1981). *Oil palm diseases and disorders*. Oxford University Press.

Vallejo, R. G. (1976). *Estudio de poblaciones espontáneas de nolí* (Elaeis oleifera *H.B.K. Cortés) en Colombia* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional; Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Vallejo, R. G. (1978). Mejoramiento genético de la palma africana. En *Palma africana de aceite: manual de asistencia técnica n.º 22* (pp. 97-144).

Vallejo, R. G. (1981). Mejoramiento genético en la palma africana de aceite. *Temas de Orientación Agropecuaria*, (149), 49-70.

Vallejo, R. G., & Cassalett, D. C. (1975). Perspectivas del cultivo de los híbridos interespecíficos de nolí (*Elaeis oleifera*) × palma africana de aceite (*Elaeis guineensis*) en Colombia. *Revista* ICA, *10*(1), 19-35.

Zambrano, J. E. (2004). Los híbridos interespecíficos *Elaeis oleifera* H.B.K. × *Elaeis guineensis* Jacq.: una alternativa de renovación para la zona oriental de Colombia. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 339-349. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1098





Capítulo 3
Procedimiento técnico para el sistema de selección recurrente modificado en palma de aceite

Silvio Bastidas Pérez

Los sistemas de mejoramiento de cultivos perennes, como los de palma de aceite (*E. guineensis*), tienen una visión de largo plazo y se definen a partir de objetivos preestablecidos y del consenso de un equipo de investigadores. Para definir los sistemas de selección se toman como referencia los éxitos logrados en distintos programas de mejoramiento, ya que esas experiencias permiten abreviar, ante todo, el tiempo requerido en el proceso de selección, los objetivos y prioridades, la variabilidad disponible, la base genética, los métodos de mejoramiento y el conocimiento productivo de la especie (Vallejo & Estrada, 2013). Además, los sistemas requieren grandes áreas de terreno debido a la baja densidad de siembra, que es de 143 ejemplares/ha en palma de aceite (Rocha et al., 2010; Rojas, 1981) y de 115 ejemplares/ha en los híbridos interespecíficos *E. oleifera* × *E. guineensis* (híbridos O × G) (Bastidas et al., 2013), y el número de materiales para evaluar en un ciclo de selección depende del área disponible.

El ICA implemento en el programa de mejoramiento de la palma de aceite el sistema de selección recurrente modificado (SSRm) (Vallejo, 1978, 1981), que es un sistema de selección adoptado por algunos programas de mejoramiento de palma de aceite, en Malasia y otros países palmeros (Amblard et al., 2004; Dumortier, 2004; Rey et al., 2004). En 1990, el ICA confirmó esa decisión con la ejecución del plan de cruzamientos interpoblacionales, del cual se obtuvieron las semillas para las pruebas de progenies. A partir de 1994, Corpoica continuó la ejecución del SSRm.

Las pruebas de progenies del SSRm aplicadas en palma de aceite (Sambanthamurthi et al., 2009) se basan en el sistema de selección de progenitores masculinos aplicado en mejoramiento genético del ganado vacuno (Falconer, 1984). La producción de semillas de palma de aceite depende de dos progenitores, una palma femenina y una masculina, de las cuales la masculina no puede ser evaluada por su propio desempeño ya que tiene el carácter de esterilidad femenina y no produce frutos (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1988).

En este capítulo se describen, de forma resumida, las actividades necesarias para establecer un sistema de selección recurrente para mejoramiento de la palma de aceite.

Sistema de selección recurrente (SSR)

Como su nombre lo indica, un SSR incluye actividades repetitivas, con dos propósitos principales: 1) incrementar la frecuencia de alelos favorables, al cambiar la media de la población en la dirección deseada, y 2) mantener la suficiente variabilidad genética como para sostener una selección continua mediante el entrecruzamiento de las progenies en cada ciclo de selección. Esto aumenta la posibilidad de encontrar genotipos superiores en cada ciclo de selección (Hallauer et al., 1988), y por esta característica, el SSR también se denomina “sistema de selección acumulativa”.

El SSR se diseñó para trabajar con dos poblaciones, en lo posible contrastantes pero complementarias; por ejemplo, una de alta producción y otra resistente a enfermedades. Cumplido este requisito, siguen las pruebas de progenies intrapoblacionales e interpoblacionales. El SSR tiene dos ventajas: permite mejorar de manera simultánea dos poblaciones y hace posible la producción de híbridos mejorados (Hallauer et al., 1981).

La diversidad genética es el número total de características en el acervo genético de una especie, mientras que la variabilidad es la tendencia de las características a variar entre plantas de una especie (Bakoumé, 2016). El éxito de un sistema de selección, por tanto, depende de la base genética de las poblaciones seleccionadas y de la variabilidad aprovechable presente en cada una de ellas (Lobo, 2008). Para lograr un mejoramiento continuo

de esas poblaciones, es necesario generar y mantener variabilidad, lo cual se logra con el cruce de plantas seleccionadas, ya que la recombinación conlleva la formación de nuevos alelos y genes (Tiessen, 2012), y con la introducción de nuevos genotipos en las poblaciones (Reyes, 1985).

El SSR consta de varias actividades, pero en esencia son obligatorias cuatro en cada ciclo de selección:

1. Evaluación de progenies.
2. Selección de plantas sobresalientes (S).
3. Introducción de germoplasma (I).
4. Plan de cruzamientos (S × S, S × I, I × S).

Sistema de selección recurrente modificado (SSRm) aplicado al mejoramiento genético de la palma de aceite

El SSRm se aplica en el programa de mejoramiento genético de la palma *Elaeis guineensis* Jacq. —iniciado por ICA y continuado por Corpoica, hoy AGROSAVIA— mediante la siembra de dos poblaciones contrastantes de la especie[1] en la Estación Experimental El Mira (Vallejo, 1978). Una de ellas es la *población Dura*, constituida por germoplasma de origen asiático, fuente de progenitores madre del tipo Dura, y la otra es la *población Ténera/Pisífera*,[2] conformada por germoplasma de origen africano, fuente de progenitores padre del tipo Pisífera (Kushairi et al., 2000). La aplicación total del sistema incluye ocho actividades por ciclo de selección:

1 Los resultados de la investigación indican que los cruzamientos entre palmas de distinto origen (interorígenes) son más productivos y tienen más vigor híbrido que los cruzamientos entre palmas del mismo origen (intraorigen).

2 Con el término *Ténera/Pisífera* se identifica a la población de tipo Pisífera. Las palmas Pisífera se obtienen por segregación en los cruzamientos Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera. Las palmas de tipo Ténera son híbridos entre palmas tipo Dura y polen de palmas tipo Pisífera.

1. Conformar y establecer las poblaciones base del SSRm.
2. Seleccionar palmas de tipo Dura (D) en su respectiva población.
3. Introducir germoplasma de origen asiático a la población Dura.
4. Seleccionar palmas de tipo Ténera (T) en la población Ténera/Pisífera, y preseleccionar en la misma población palmas de tipo Pisífera (P).
5. Introducir germoplasma de origen africano a la población Ténera/Pisífera.
6. Establecer pruebas de progenies interpoblacionales DF1 × PF1 (híbridos Ténera).[3]
7. Establecer pruebas de progenies intrapoblacionales DF1 × DF1 en la población Dura.
8. Establecer pruebas de progenies intrapoblacionales TF1 × TF1 y TF1 × PF1 en la población Ténera/Pisífera.

El SSRm, más que un sistema de selección, es una *estructura operativa* para manejar dos poblaciones de forma independiente e integrarlas en las pruebas de progenies interpoblacionales. Si es del caso, en cada población puede aplicarse un sistema de selección específico y diferente. La secuencia de actividades del SSRm se presenta en la figura 3.1 y cada una de ellas se describe en este capítulo.

3 El tipo Ténera es un híbrido entre los tipos Dura y Pisífera de palma de aceite (Kushairi et al., 2000). En el SSRm del programa de mejoramiento de AGROSAVIA, el Ténera interpoblacional se obtiene por cruzamiento entre el tipo Dura de origen asiático y el tipo Pisífera de origen africano, en otras palabras, es un híbrido interorigen, mientras que el Ténera intrapoblacional se obtiene mediante segregación a partir de cruzamientos Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera de la población africana.

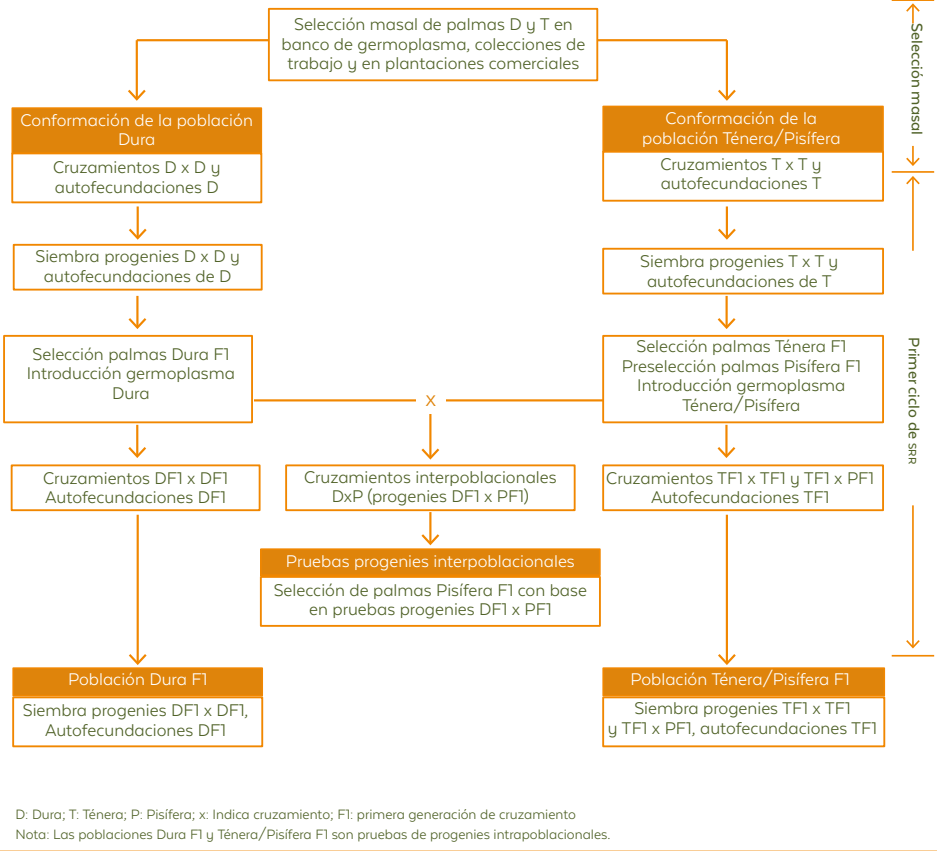


Figura 3.1. Representación esquemática del SSR aplicado a dos poblaciones contrastantes de la palma de aceite *Elais guineensis* del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA.

Fuente: Elaboración propia

Criterios de selección

Antes de la secuencia de actividades, se aplican los criterios y metodologías para seleccionar las palmas progenitoras en los diferentes ciclos del SSRm, tanto en la población de tipo Dura como en la de tipo Ténera/Pisífera, con algunas diferencias.

En cada una de las poblaciones se emplea un determinado sistema de selección. En el SSRm del programa de mejoramiento de la palma de aceite de AGROSAVIA, se aplicó el sistema de selección combinada, que es una variación de los sistemas de selección combinada tradicionales (Molina, 1992) y que consta de tres acciones consecutivas en cada ciclo:

1. Selección de familias.
2. Selección de palmas superiores dentro de cada familia elegida.
3. Selección masal de palmas superiores en familias descartadas[4] con bajo promedio, para corregir "defectos de familia".

La selección masal o fenotípica consiste en elegir las plantas que fenotípicamente tengan la mejor expresión del carácter objeto de selección, para luego hacer una mezcla balanceada de sus semillas y conformar la población de la siguiente generación (Reyes, 1985). La selección aplicada a un carácter produce cambios fenotípicos, positivos o negativos, en otros caracteres correlacionados con el que se escogió (Falconer, 1984). Por ejemplo, en la palma de aceite el número y el peso de los racimos están relacionados de forma negativa (-0,297), mientras que la relación entre el número de racimos y su producción es positiva (0,752) (Bastidas et al., 2013).

Los criterios de selección, después de concluido un ciclo completo de evaluación,[5] son los descritos en la tabla 3.1.

En la etapa juvenil de la palma, las características morfológicas se valoran con una frecuencia semestral, y una vez al año en etapa productiva. Por otra parte, para obtener una estimación confiable de la repetibilidad[6] en la expresión de las características relacionadas con la producción —repetición del comportamiento productivo—, esta se debe registrar durante un periodo de 4 a 5 años continuos (Breure, 1988). En palma de aceite *E. guineensis*, los registros de cosecha se llevan a cabo con una frecuencia de ocho días en picos de alta producción y de quince en picos bajos. En cambio, en los híbridos O × G la frecuencia es de 21 y 25 días, respectivamente, debido a diferencias

4 El descarte de familias se realiza por bajo comportamiento de todas sus palmas. Sin embargo, en estas familias, algunas palmas son significativamente superiores al resto de sus hermanas, y por esta razón merecen seleccionarse para corregir los defectos de familia (bajo promedio).

5 Un ciclo genético completo abarca diez años, un año para cruzamientos controlados y germinación de semillas; uno para la etapa de vivero; 2,5 años en la etapa juvenil de campo; de cuatro a cinco años para registros de producción, análisis cuantitativo de frutos y medidas biométricas, y un año para procesamiento de información, análisis estadísticos y selección de progenitores.

6 La *repetibilidad* se define como la correlación entre mediciones sucesivas de una característica en la misma planta (Molina, 1992; Vencovsky, 1972).

en los criterios de cosecha.[7] Los periodos de madurez óptima —máxima acumulación de aceite en el fruto— son prácticamente iguales, de 175 a 185 días después de la antesis en la palma de aceite (Narváez et al., 1996), y de 170 a 180 días en los híbridos O × G (Millán et al., 2017; Preciado et al., 2011). En la palma de aceite, además del color de la epidermis y del mesocarpio, el criterio de cosecha con el cual se obtiene mayor tasa de extracción es diez frutos desprendidos naturalmente del racimo, mientras que en los híbridos O × G de AGROSAVIA, bajo polinización natural, la tasa de extracción de aceite es de 20,23 %, con más de 25 frutos desprendidos por racimo y más de 5 % de frutos con cuarteamiento (Sinisterra et al., 2019).

Las variables relacionadas con la producción de aceite se resumen en el porcentaje de aceite en racimo, el cual se mide según el propósito de selección de familias o palmas individuales. La selección de familias se basa en el promedio de 60 análisis de los componentes de la producción de aceite por familia, mientras que la selección de palmas individuales se apoya en el promedio de seis análisis por planta (Breure, 1988, 1987a). En la selección de familias son prioritarios los criterios relacionados con la producción de frutos y aceite. En la selección de palmas individuales se emplean los mismos criterios considerados en la selección de familias.

Se consideran enfermedades letales la pudrición del cogollo, mancha anular, marchitez sorpresiva, marchitez letal y anillo rojo. Las palmas enfermas se erradican tan pronto se identifican, y el registro sanitario se hace con una frecuencia mensual.

El objetivo de la selección masal o fenotípica en familias descartadas es rescatar palmas superiores que de otra manera quedarían fuera por pertenecer a una familia con bajo comportamiento promedio en los diferentes criterios de selección (por ejemplo, baja producción de racimos o bajo porcentaje de aceite en racimo).[8] Esta situación se presenta con frecuencia en las progenies

7 Criterios de cosecha en los híbridos O × G: color de la epidermis del fruto, color del mesocarpio del fruto, número de frutos desprendidos y cuarteamiento de los frutos. El color de la epidermis y de la pulpa presentan variabilidad dentro de un cultivar híbrido, y esta variabilidad es mayor entre cultivares híbridos.

8 Las especies alógamas presentan depresión por endogamia, pero los cruzamientos endogámicos también producen algunas plantas superiores.

derivadas de cruzamientos endogámicos (autofecundación y cruzamientos entre parientes). En este caso, los criterios de selección relacionados con las características de producción son más estrictos que en la escogencia de palmas de familias seleccionadas.

Tabla 3.1. Características y criterios de selección combinada en cada una de las poblaciones del sistema de selección recurrente modificado (SSRm)

Característica	Selección de familias	Selección de palmas en familias seleccionadas	Selección masal de palmas en familias descartadas
1. Morfológicas			
Diámetro del estípite	Igual al promedio de las familias	Igual al promedio de la familia seleccionada	Igual al promedio de toda la población
Tasa de crecimiento	Igual al promedio de las familias	Igual al promedio de la familia seleccionada	Igual al promedio de toda la población
Emisión de hojas	Mayor que el promedio de las familias	Mayor que el promedio de la familia seleccionada	Mayor que el promedio de toda la población
Vigor de pecíolo en hojas	Igual al promedio de las familias	Igual al promedio de la familia seleccionada	Igual al promedio de toda la población
Largo y ancho de foliolos	Mayor que el promedio de las familias	Mayor que el promedio de la familia seleccionada	Mayor que el promedio de toda la población
2. Producción			
Número de racimos	Mayor que el promedio de las familias	Mayor que el promedio de la familia seleccionada	Promedio de la población más una o dos desviaciones estándar
Peso por racimo	Mayor que el promedio de las familias	Mayor que el promedio de la familia seleccionada	Promedio de la población más una o dos desviaciones estándar
Producción de racimos	Mayor que el promedio de las familias	Mayor que el promedio de la familia seleccionada	Promedio de la población más una o dos desviaciones estándar
Porcentaje de aceite en racimo*	Mayor que el promedio de las familias	Mayor que el promedio de la familia seleccionada	Promedio de la población más una o dos desviaciones estándar
3. Reacción a enfermedades			
Presencia de enfermedades	Registro de la enfermedad	Sanas, libres de enfermedades	Sanas, libres de enfermedades
Porcentaje de incidencia	Menor de 1 %	0 %	0 %

* Incluye todas las variables relacionadas con la producción de aceite, pero el porcentaje de aceite en racimo prima sobre las demás (Chin, 2004).

Fuente: Elaboración propia

En los criterios de selección, nos apartamos de lo común. En algunos programas de mejoramiento se fijan valores de referencia —línea base— a cada uno de los criterios de selección, por ejemplo, producción de racimos de fruta fresca mayor de 35t/ha; número de racimos más 16 en palma/año, etc. En este documento, con el propósito de que los criterios de selección permanezcan vigentes en cualquier ciclo del SSRm, no se ponen valores de referencia; solo se trabaja con los promedios, y con más o menos desviaciones estándar, entre otras razones porque la selección permite obtener poblaciones de plantas genéticamente superiores a la original (Vallejo & Estrada, 2013). En palma de aceite, durante los primeros ciclos de selección, se espera una ganancia genética de 12 a 16 % por cada ciclo de ocho a diez años, esto es 1,5 % por año, pero en los siguientes ciclos estos valores disminuyen (Chin, 2004). Dado que esta ganancia incrementa los promedios, la línea base de los criterios quedaría por debajo del promedio poblacional, y para cada ciclo se deberían fijar líneas base. La ganancia genética hace que las palmas seleccionadas sean superiores a la generación anterior. El movimiento de la media puede ser insignificante en algunas características, sobre todo en aquellas con baja variabilidad. Cuando el desplazamiento de la media no corresponde a un movimiento positivo, el mejorador tiene que introducir nuevos recursos genéticos en las poblaciones del SSRm y generar variabilidad en las poblaciones mediante cruzamientos recombinantes, para que el sistema de selección siga en operación (Tiessen, 2012).

Al finalizar el primer ciclo de selección, se eligen las palmas con mayor producción de aceite, y esta variable es prioritaria con respecto a las demás (Chin, 2004). En los ciclos de selección posteriores, las características vegetativas, los parámetros de crecimiento y las características de los frutos y los racimos desempeñan un papel importante. Se consideran además otros atributos en esos ciclos, por ejemplo, si las palmas son compactas para altas densidades de siembra (Alvarado et al., 2010; Breure, 2011); si las palmas son eficientes en la partición de asimilados, los cuales darán origen a cultivares con bajo desarrollo de biomasa y alto rendimiento de aceite (Breure, 1987b; Sterling, 1993), y si las palmas son eficientes en el consumo de agua (Asemota & Conaire, 2010; Corley et al., 2017; Murugesan et al., 2017; Reyes et al., 2014).

Conformación y establecimiento de las poblaciones base del sistema

En el programa de mejoramiento de AGROSAVIA se asumió como norma el uso de palmas de origen asiático para la población Dura, como fuente de madres Dura, y de palmas de origen africano para la población Ténera/Pisífera, como fuente de padres Pisífera (Vallejo, 1981). La selección fenotípica de palmas de los tipos Dura y Ténera para conformar el SSRm se realiza en los bancos de germoplasma, en las colecciones de trabajo y en los cultivos comerciales, cuando se tiene la certeza del origen genético de las palmas. En cada una de estas fuentes de germoplasma se sigue una alta presión en la selección, de manera que solo se seleccionan entre cinco y quince palmas superiores de cada tipo, según los siguientes criterios:

- Número de racimos: promedio más una desviación estándar.
- Peso del racimo: promedio más una desviación estándar.
- Producción de racimos de fruta fresca: promedio más una desviación estándar.
- Porcentaje de aceite en racimo: promedio más una desviación estándar.

Las palmas seleccionadas, de cinco a quince, permiten crear un número de progenies igual al número de cruzamientos y autofecundaciones que se pueden llevar a cabo con ellas. Por ejemplo, con cinco palmas elegidas es posible producir hasta 20 cruzamientos, incluidos los recíprocos, y hasta cinco autofecundaciones, para un total de 25 progenies. El número de cruzamientos que se pueden realizar, incluidos los recíprocos, es igual a P(P-1), donde P es el número de palmas seleccionadas, y sin los recíprocos es igual a (P(P-1))/2 (Vallejo & Estrada, 2013). La palmicultura mundial se desarrolló a partir de cuatro palmas de aceite ornamentales sembradas en el Jardín Botánico de Bogor, Java, Indonesia (Setiawati et al., 2018; Soh, 2012).

Conformación de la población de tipo Dura

Una vez realizada la selección de palmas tipo Dura, se espera hasta que algunas de ellas pasen a ciclo de floración masculina. Cumplido este requisito, se procede a aislar inflorescencias masculinas para evitar contaminación con polen de otras palmas y para garantizar su genealogía. Cuando las flores

liberan polen (antesis), se cortan por el pedúnculo para obtener y procesar el polen, el cual se conserva en frascos con tapa de cierre hermético e identificación, dentro de un refrigerador a menos de 5 °C (Forster et al., 2017).

Los cruzamientos se llevan a cabo con base en el Carolina Norte I (DCN1), uno de los diseños genéticos ideados por Comstock et al. (1949) y Comstock & Robinson (1952), para aprovechar la habilidad combinatoria general y específica de los progenitores (Márquez, 1985). En el DCN1, una planta masculina se cruza con dos a cuatro plantas en ciclo femenino para generar grupos de familias de hermanos completos en forma jerárquica o anidada. Los diseños de apareamiento permiten hacer estimaciones sobre algunos parámetros genéticos, como varianza aditiva y varianza de dominancia (Vallejo et al., 2005). El DCN1 es uno de los más apropiados para *E. guineensis*, porque las palmas de esta especie son alógamas, y aunque tienen la característica de cambiar de ciclo de floración, por lo general unas están en ciclo femenino y otras en masculino. En la tabla 3.2 se presenta el ejemplo de un plan de cruzamientos, en el cual se generan 35 progenies Dura × Dura para selección de palmas Dura F1. Las autofecundaciones se realizan para disminuir la variabilidad genética y para fijar algunos loci de una característica; en teoría, en una generación de autofecundación la proporción de heterocigotos disminuye en 50 % (Reyes, 1985). Se da por entendido que, en una especie alógama como la palma de aceite, no se debe avanzar más allá de la primera generación de autogamia, para prevenir la depresión en varias de las características de interés. El principal obstáculo para lograr una autofecundación es la permanencia prolongada de una palma en uno de los dos sexos, en algunos casos durante más de tres años.

Tabla 3.2. Plan de cruzamientos entre palmas tipo Dura con base en un diseño de apareamientos Carolina Norte 1

		Progenitores masculinos						
		Dura 3	Dura 5	Dura 6	Dura 7	Dura 10	Dura 12	Dura 14
Progenitores femeninos	Dura 1	×						
	Dura 2	×	×					
	Dura 4	×	×	×				
	Dura 7	×	×	×	Ø			
	Dura 8	×	×	×	×	×		
	Dura 9		×	×	×	×	×	
	Dura 10			×	×	Ø	×	×
	Dura 11				×	×	×	×
	Dura 13					×	×	×
	Dura 14						×	Ø
	Dura 15							×

×: cruzamientos; Ø: autofecundaciones.
Fuente: Elaboración propia

En el plan de cruzamientos de las Dura × Dura (tabla 3.2), una palma Dura "masculina" es probada por cinco palmas Dura "femeninas". Las progenies de este plan se establecen en campo con un diseño experimental tradicional, como bloques completos dispuestos al azar, con cuatro a cinco repeticiones por progenie y con ocho a 16 palmas por repetición o unidad experimental (Breure & Verdooren, 1995; Forster et al., 2017). Después de la siembra de las progenies, queda conformada la población Dura de origen asiático del SSRm.

Se lleva control genealógico para evitar una endogamia no planificada en el siguiente ciclo. En caso de obtener un mayor número de progenies, por ejemplo 64, se emplea un diseño en látice con las repeticiones apropiadas y mínimo doce palmas por parcela.

Conformación de la población de tipo Ténera/Pisífera

El objetivo primario de esta población es proveer progenitores tipo Pisífera, para producir semillas tipo Ténera, mediante cruzamientos Dura × Pisífera de

origen asiático y africano, respectivamente. Los cruzamientos segregantes Ténera × Ténera y las autofecundaciones Ténera son la fuente de las palmas progenitoras tipo Pisífera. En teoría, los cruzamientos Ténera × Ténera segregan 25 % de palmas Dura, 50 % de palmas Ténera y 25 % de palmas Pisífera, y los cruzamientos Ténera × Pisífera, 50 % de palmas Ténera y 50 % de palmas Pisífera (Hartley, 1988). En la población T × T, el bajo porcentaje de palmas segregantes tipo Pisífera en cada progenie obliga a aumentar el tamaño de la parcela experimental, y como consecuencia de lo anterior, es más reducido el número de progenies por evaluar. El tamaño mínimo de la unidad experimental en estas progenies debe ser de 28 a 36 palmas (Breure & Verdooren, 1995), de las cuales teóricamente se esperan de siete a nueve palmas Pisífera.

Se elabora un plan de cruzamientos similar al descrito para la población Dura y con la misma metodología, con cinco a quince palmas Ténera seleccionadas. Un ejemplo de plan de cruzamientos se presenta en la tabla 3.3; en él una palma Ténera en ciclo de floración masculina se cruza con tres Ténera en ciclo de floración femenina, con lo cual se generan progenies Ténera × Ténera. En este plan una palma Ténera "masculina" es probada por tres Ténera "femeninas".

Tabla 3.3. Plan de cruzamientos entre palmas tipo Ténera con base en un diseño de apareamientos Carolina Norte 1

		Progenitores masculinos						
		Ténera 1	Ténera 2	Ténera 5	Ténera 6	Ténera 8	Ténera 9	Ténera 11
Progenitores femeninos	Ténera 1	Ø						
	Ténera 2	×	Ø					
	Ténera 4	×	×	×				
	Ténera 7		×	×	×			
	Ténera 10			×	×	×		
	Ténera 12				×	×	×	
	Ténera 13					×	×	×
	Ténera 14						×	×
	Ténera 15							×

×: cruzamientos; Ø: autofecundaciones.
Fuente: Elaboración propia

Otros objetivos del plan de cruzamientos son generar variabilidad, complementar características de los dos progenitores y fijar características mediante autofecundación para explotar el vigor híbrido en los cruzamientos interpoblacionales (Reyes, 1985).

Las progenies que resultan del plan se siembran en un diseño experimental estándar como bloques completos al azar, con cuatro a cinco repeticiones por progenie y 36 palmas por repetición, con mínimo 27 palmas, como lo proponen Breure y Verdooren (1995). Hecho esto, queda conformada la población Ténera/Pisífera de origen africano para el SSRm, y se lleva control genealógico para evitar endogamias no planificadas.

Selección de palmas Dura F1 en la población Dura

En el capítulo 2 se describió la forma como se introdujo el germoplasma de palma de aceite en Colombia; de igual forma se indicó que el germoplasma de tipo Dura de origen asiático proviene de semillas de polinización abierta obtenidas en la Estación Experimental Lancetilla, en Honduras (Richardsond, 1995). En esta estación también se tenían colecciones de origen africano, y esto, sumado al origen primario de *Elaeis guineensis*, que es africano, y al carácter alógamo de la especie, permite encontrar en la población introducida a Colombia algunos segregantes tipo Dura de origen africano (Hartley, 1974, 1969), que es necesario identificar y eliminar, de acuerdo con las siguientes características:

- Las palmas Dura de origen asiático producen pocos racimos, grandes y pesados; los frutos también son grandes y ovoides, y los raquídeos del racimo terminan en una espina corta y roma. El corte transversal de los frutos revela bajo contenido de pulpa y un cuesco grueso de forma circular, de 2 a 4 mm de espesor (Corley & Tinker, 2003).
- Las palmas Dura de origen africano producen muchos racimos, de peso y tamaño medianos; los frutos son grandes, de forma irregular, y los raquídeos del racimo terminan en una espina larga, delgada y puntiaguda. El corte transversal de los frutos revela mediano contenido de pulpa y un cuesco grueso de forma irregular, de 2 a 4 mm de espesor. Estas palmas son eliminadas del programa de mejoramiento (Kushairi et al., 2000).

Cuando las palmas de tipo Dura con características de origen africano tienen una frecuencia mayor de 2 % en una familia o progenie, toda la familia debe ser descartada del proyecto de mejoramiento. Sin embargo, estas palmas no se erradican pues con ellas se conserva una competencia completa para las demás palmas en evaluación. Después de completar cinco años de registros de producción, se erradican todas las palmas Dura con características del origen africano.

Concluido un *ciclo completo de evaluación*, se llevan a cabo las acciones propias del sistema de selección combinada: selección de familias Dura × Dura, selección de palmas Dura F1 en las familias seleccionadas y selección masal de palmas Dura F1 en las familias descartadas, con los criterios de selección descritos en la tabla 3.1.

Selección de familias Dura × Dura

Esta selección se lleva a cabo de acuerdo con el comportamiento promedio de las familias Dura × Dura. La evaluación se hace con los criterios para selección de familias descritos en la tabla 3.1.

Selección de palmas Dura F1 en familias seleccionadas

Para la selección de palmas Dura F1, se valora su comportamiento individual, únicamente dentro de las familias seleccionadas. Se usan las variables y criterios de elección de palmas superiores en familias seleccionadas descritos en la tabla 3.1. Según el número de palmas superiores, se aplica una presión de selección de 5 a 10 %, la cual proporciona suficiente número de palmas progenitoras para producir las progenies Dura F1 × Dura F1 del siguiente ciclo.

Selección masal de palmas Dura F1 en familias descartadas

La selección de palmas Dura F1 superiores en familias descartadas también se lleva a cabo por comportamiento, con base en los criterios descritos en la tabla 3.1. En este caso, la presión de selección es más estricta, entre 2 y 5 %.

Una vez hecha la selección, se recolecta el polen de las palmas que se encuentren en ciclo masculino y con él se hacen cruzamientos (y una que otra autofecundación) con palmas Dura F1 seleccionadas de ciclo femenino, a fin de recombinar genes, generar variabilidad y hacer pruebas de progenies intrapoblacionales. Las progenies así obtenidas se llevan a siembra, lo que indica el inicio del segundo ciclo del SSRm en la población Dura de origen asiático.

Todas las palmas Dura F1 seleccionadas —en "Selección de palmas Dura F1 en familias seleccionadas" y "Selección masal de palmas Dura F1 en familias descartadas"— se clasifican según los siguientes tres grados, de acuerdo con la cantidad de características positivas que tengan:

- **Grado 1.** Agrupa palmas con cuatro criterios de selección positivos:
  - Producción de racimos (kg/palma/año)
  - Porcentaje de aceite/racimo
  - Número de racimos/palma/año
  - Peso promedio/racimo (kg)

La producción total de racimos (kg/palma/año) en el grado 1 se debe tanto al peso como al número de racimos (Bastidas, 1991).

- **Grado 2.** Incluye palmas con tres criterios de selección positivos:
  - Producción de racimos (kg/palma/año)
  - Porcentaje de aceite/racimo
  - Número de racimos/palma/año

En este caso, la producción (kg/palma/año) se sustenta más en el número de racimos que en su peso. Las palmas de grado 2 producen cosechas estables, con poca variación durante el año, y sus picos de cosecha no son tan pronunciados (Bastidas, 1991).

- **Grado 3.** Incluye palmas con tres criterios de selección positivos:
  - Producción de racimos (kg/palma/año)
  - Porcentaje de aceite/racimo
  - Peso promedio/racimo (kg)

En las palmas de grado 3, la producción (kg/palma/año) se sostiene más en el peso de los racimos que en el número de estos. Estas palmas tienden a producir picos de cosecha pronunciados, con alta variación durante el año (Bastidas, 1991).

Cada palma Dura F1 seleccionada como madre tiene un potencial de producción de 5.400 semillas germinadas/año. Esta cifra supone solo seis inflorescencias femeninas polinizadas/año, y cada una de ellas producirá 900 semillas germinadas diferenciadas del cultivar Ténera (híbrido Dura × Pisífera) (Bastidas et al., 2013; Figueredo, 1981; Peña et al., 2003).

Selección de palmas Ténera F1 y preselección de palmas Pisífera F1 en la población Ténera/Pisífera

Como se mencionó antes, el propósito principal de la población Ténera/Pisífera es proporcionar progenitores de tipo Pisífera para producir semillas Ténera mediante cruzamientos interpoblacionales con palmas tipo Dura. Otro propósito es seleccionar palmas superiores Ténera de origen africano, para avanzar al siguiente ciclo de selección.

Las palmas Pisífera se obtienen solo por segregación a partir de dos tipos de cruzamiento, Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera, en las proporciones indicadas en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Proporciones teóricas de segregación en dos diferentes tipos de cruzamiento entre *Elaeis guineensis* para obtener palmas Pisífera

Tipos de cruzamiento	
Representación fenotípica	Representación genotípica
Ténera × Ténera ↓ 25 % Dura 50 % Ténera 25 % Pisífera	$Sh^+Sh^- \times Sh^+Sh^-$ ↓ 25 % Sh^+Sh^+ 50 % Sh^+sh^- 25 % sh^-sh^-
Ténera × Pisífera ↓ 50 % Ténera 50 % Pisífera	$Sh^+Sh^- \times sh^-sh^-$ ↓ 50 % Sh^+Sh^- 50 % sh^-sh^-

Nota:

Genotipo para fruto de tipo Dura con cuesco: Sh^+Sh^+.

Genotipo para fruto de tipo Ténera con cuesco: Sh^+sh^-

Genotipo para fruto de tipo Pisífera sin cuesco: sh^-sh^-

Sh: abreviatura del inglés *shell*, "cáscara" o "cuesco" en la palma de aceite, sugerida por Beirnaert en 1940 para el gen que determina la presencia de cuesco en el fruto (Ngando-Ebongue et al., 2011; Setiawati et al., 2018; Vieira da Cunha et al., 2010).

Fuente: Elaboración propia

La segregación en este tipo de cruzamientos impide establecer lotes experimentales con palmas 100 % tipo Pisífera o 100 % tipo Ténera. En el proceso de selección de palmas Ténera y de preselección de palmas Pisífera, lo primero que se hace es clasificar todas las palmas de la población Ténera/Pisífera según su tipo.

Identificación del tipo de palma

Los tipos de palma se clasifican según la estructura interna de su fruto. De cada palma en producción se corta un racimo, de este último se toman varios frutos y cada uno de ellos se corta transversalmente para observar su estructura interna. Luego se aplican los siguientes criterios:

- Palma Dura: fibras dispersas en la pulpa, y cuesco grueso, con espesor de 2 a 4 mm (figura 3.2b) (Müller & De Andrade, 2010).

- Palma Pisífera: fruto sin cuesco (característica común), pero con fibras agrupadas en el centro de la pulpa; en ocasiones presenta una almendra pequeña (endospermo) rodeada por un anillo de fibras (Müller & De Andrade, 2010).
- Palma Ténera: en el fruto, un anillo de fibras alrededor de un cuesco delgado, con menos de 2 mm de espesor (figura 3.2a), aunque algunas palmas producen frutos de cuesco más grueso. El tipo Ténera proviene de la hibridación intraespecífica de palmas Dura y Pisífera (Müller & De Andrade, 2010).

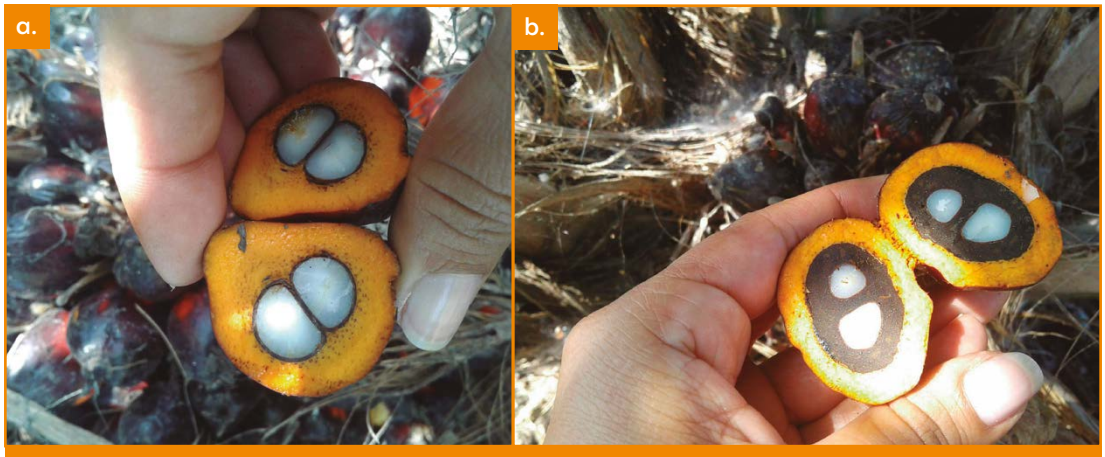


Figura 3.2. Identificación del tipo de palma según grosor de endocarpio. a. Ténera; b. Dura.
Fotos: Leidy Paola Moreno Caicedo

Cumplido este requisito, se siguen las acciones propias del sistema de selección combinada, como se hizo con la población Dura: selección de familias, selección de palmas superiores dentro de cada familia seleccionada y selección de palmas superiores en las familias descartadas. En la población Ténera/Pisífera se lleva a cabo una actividad adicional, la preselección de palmas Pisífera F1 en las familias seleccionadas.

Selección de familias Ténera x Ténera

Se lleva a cabo de acuerdo con el comportamiento de las palmas Dura y Ténera segregadas en cada familia. Ambos tipos se evalúan conforme a los criterios de la tabla 3.1, con la siguiente variación:

1. Se seleccionan familias Ténera × Ténera con base en el comportamiento de las palmas segregadas de tipo Dura.
2. Se seleccionan familias Ténera × Ténera con base en el comportamiento de las palmas segregadas de tipo Ténera.

Selección de palmas Ténera F1 en familias seleccionadas

Esta elección se lleva a cabo según el comportamiento individual de las palmas y solo dentro de las familias seleccionadas. Se emplean los mismos criterios y variables descritos en la tabla 3.1.

Una vez seleccionadas las palmas Ténera F1, se recolecta el polen de las que se encuentren en ciclo masculino, y con él se hacen cruzamientos con palmas Ténera F1 seleccionadas en ciclo femenino, con el fin de recombinar genes, generar variabilidad y hacer pruebas de progenie intrapoblacionales. Las progenies así obtenidas se llevan a siembra, lo que indica el inicio del segundo ciclo del SSRm en la población Ténera/Pisífera. Las palmas Ténera F1 solo se necesitan para producir progenies intrapoblacionales y avanzar al siguiente ciclo de selección; por lo tanto, su calidad es más importante que su cantidad. A estas palmas se les aplica alta presión de selección, entre 2 % y 5 %, lo cual proporciona suficiente número de individuos para producir las progenies Ténera F1 × Ténera F1 y Ténera F1 × Pisífera.

Selección masal de palmas Ténera F1 en familias descartadas

Esta elección también se realiza según comportamiento individual, con una presión más estricta que en las familias seleccionadas, de 2 a 3 %, y con los criterios descritos en la tabla 3.1.

Preselección de palmas Pisífera en familias seleccionadas

El proceso de selección de progenitores Pisífera es diferente al de selección de progenitores Dura en la población de tipo Dura. Las palmas Pisífera presentan

alta esterilidad femenina (Forster et al., 2017; Setiawati et al., 2018); algunas de ellas producen frutos, que en su mayoría son partenocárpicos, y por tal razón estas palmas solo se emplean como progenitores masculinos, donadores de polen.

Las palmas de tipo Pisífera son preseleccionadas por su fenotipo dentro de las familias seleccionadas Ténera x Ténera; en cuanto a características determinantes de la producción, la preselección de las Pisífera se realiza con base en el desempeño de sus hermanas Dura y Ténera, segregadas en cruzamientos T × T. El procedimiento es el siguiente:

- En las familias seleccionadas Ténera × Ténera se escogen todas las palmas Pisífera de mejor fenotipo, de acuerdo con características morfológicas relacionadas con la acumulación de biomasa.
- Las palmas elegidas son calificadas según su grado de fertilidad femenina, con los criterios indicados en la tabla 3.5.
- Se preseleccionan todas las palmas Pisífera medianamente fértiles. Este tipo de palmas, cruzadas con las Dura, producen descendencias Ténera con frutos de cuesco delgado (Figueredo, 1981; Hartley, 1988).
- Se lleva a cabo un plan de cruzamientos con polen de palmas Pisífera F1 preseleccionadas y palmas de tipo Dura F1 seleccionadas en la población Dura, para establecer pruebas de progenies interpoblacionales DF1 × PF1.

Los criterios más importantes son el porcentaje de frutos normales, el tamaño de la almendra y el porcentaje de racimos malogrados.

Las palmas de tipo Pisífera empleadas como padres tienen un potencial de producción de semillas (descendientes) mayor que los ejemplares tipo Dura. Con el polen de una palma Pisífera adulta se pueden producir unas 3.240.000 semillas/año (Bastidas et al., 2013), e incluso algunos consideran un potencial de producción de varios millones más de semillas/año (Dumortier & Konimor, 1999). Por esto, la preselección de palmas Pisífera debe ser más estricta que la de palmas Dura, con una presión de selección de máximo 2 % de ejemplares Pisífera preseleccionados.

Tabla 3.5. Criterios para clasificar palmas de tipo Pisífera por su grado de fertilidad

Criterio	Fértiles	Medianamente fértiles	Estériles
Número de racimos/palma/año	Más de 12	Menos de 12	Inflorescencias malogradas*
Racimos malogrados (%)	20 a 40	Más de 40	90 a 100
Peso de racimo promedio (kg)	Más de 6	Menos de 6	0
Tamaño de la almendra	Mediana a grande	Pequeña	Sin almendra
Frutos normales por racimo (%)	Más de 50	Menos de 50	0
Tamaño del fruto	Mediano a grande	Mediano a pequeño	Pequeño

* Una inflorescencia malograda se produce cuando las flores femeninas no son fecundadas, y como consecuencia la inflorescencia muere. El aborto de una inflorescencia es diferente, ocurre en las hojas del meristemo, tiempo antes de la emergencia de la hoja portadora de la inflorescencia (Bastidas et al., 2013).
Fuente: Elaboración propia

Pruebas de progenies Ténera F1

La selección definitiva de palmas Pisífera —confirmación de las preseleccionadas— se realiza mediante pruebas de progenies interpoblacionales Ténera F1, producidas por cruzamiento de palmas Dura F1 de la población Dura con polen de palmas Pisífera F1 preseleccionadas en la población Ténera/Pisífera.

Una prueba de progenies es una metodología que permite seleccionar progenitores, estimar el valor genético y la capacidad hereditaria de un progenitor masculino, según el desempeño de su descendencia en varios ambientes. Las pruebas de progenies en *E. guineensis* tienen varios propósitos, entre ellos confirmar el potencial productivo de los progenitores Pisífera usados como padres, los cuales son estériles en su parte femenina (Kushairi et al., 2000); valorar el potencial productivo de las progenies Ténera, y obtener estimaciones confiables de la habilidad combinatoria general y específica de los progenitores (Sambanthamurthi et al., 2009; Forster et al., 2017).

Una prueba de progenies Ténera F1 empieza con el plan de cruzamientos Dura F1 x Pisífera F1, y en él se debe emplear el mayor número posible de palmas Pisífera preseleccionadas. Este plan se lleva a cabo con base en el diseño genético Carolina Norte I, porque las palmas Pisífera solo pueden usarse como progenitores masculinos, es decir, por su polen. A fin de valorar

el potencial productivo de las Pisífera, cada una de ellas se debe cruzar con tres o cuatro palmas tipo Dura (Sambanthamurthi et al., 2009), ya que estas, por su comportamiento productivo conocido, cumplen la función de probadoras (tabla 3.6).

Tabla 3.6. Ejemplo de un diseño de cruzamientos Carolina Norte 1, donde *N* familias Ténera se emplean en prueba de progenies, y *n* palmas Pisífera son valoradas, cada una de acuerdo con cinco palmas Dura seleccionadas por su buen desempeño productivo

		Progenitores masculinos					
		Pisífera 1	Pisífera 2	Pisífera 3	Pisífera 4	Pisífera 5	Pisífera *n*
Progenitores femeninos	Dura 1	×					
	Dura 2	×	×				
	Dura 3	×	×	×			
	Dura 4	×	×	×	×		
	Dura 5		×	×	×	×	
	Dura 6			×	×	×	
	Dura 7				×	×	
	Dura 8					×	
	Dura *n*						×

×: cruzamiento
Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó antes, la baja densidad de siembra de la palma de aceite —143 palmas/ha— impide evaluar un número alto de progenies. Por tal razón, es apropiado establecer algunas pruebas de progenies en plantaciones particulares, hasta evaluar todos los progenitores Pisífera. El diseño experimental para la siembra de las pruebas depende de la cantidad de progenies Ténera F1, tal como se indica a continuación:

- Con más de 35 progenies, se emplea un diseño látice con repeticiones necesarias, cada una con doce palmas (unidad experimental mínima).
- Con menos de 35 progenies, se usa un diseño de bloques completos dispuestos al azar con tres a cuatro repeticiones; en este caso, la unidad experimental tendrá de doce a 16 palmas.

Criterios para evaluar las progenies Ténera F1

Los criterios aplicados en las pruebas de progenies son los mismos usados para selección de palmas en las familias seleccionadas (tabla 3.1). Una vez concluidas estas pruebas, termina el *primer ciclo de selección recurrente*.

Pruebas de progenies intrapoblacionales Dura F1 × Dura F1

Con un plan de cruzamientos entre palmas Dura F1 seleccionadas en la población Dura, similar al ejemplo presentado en la tabla 3.2, se inicia del *segundo ciclo del SSRm* para esta población. Las progenies F2 resultantes del plan constituyen la prueba de progenies intrapoblacionales Dura F1 × Dura F1. Estas pruebas se llevan a cabo de forma simultánea con las pruebas de progenies interpoblacionales Ténera F1 y con las de progenies intrapoblacionales Ténera F1.

En este segundo ciclo del SSRm es necesario introducir nuevo germoplasma en el plan de cruzamientos, conservando el origen genético de la población Dura. Para lograrlo, el germoplasma introducido debe haberse originado en el continente asiático. El objetivo primario de estas pruebas es seleccionar la mayor cantidad de palmas Dura F2, para utilizarlas como progenitoras y avanzar al siguiente ciclo de selección. El diseño experimental de siembra es de bloques completos al azar, similar al de las pruebas de progenies Dura × Dura.

Pruebas de progenies intrapoblacionales Ténera F1 × Ténera F1

Con un plan de cruzamientos entre palmas Ténera F1 seleccionadas en la población Ténera/Pisífera, similar al del ejemplo presentado en la tabla 3.3, se inicia el *segundo ciclo del SSRm* para esta población. Las progenies resultantes del plan constituyen la prueba de progenies intrapoblacionales Ténera F1 × Ténera F1. Estas pruebas se llevan a cabo al mismo tiempo que las pruebas de progenies interpoblacionales Ténera F1 y que las de progenies intrapoblacionales Dura F1.

En este segundo ciclo del SSRm es necesario introducir nuevo germoplasma en el plan de cruzamientos, conservando el origen genético de la población

Ténera/Pisífera. En este caso, el germoplasma introducido debe haberse originado en el continente africano. El objetivo primario de estas pruebas es seleccionar palmas Ténera F2 y preseleccionar palmas Pisífera F2 a fin de utilizarlas como progenitoras y avanzar al siguiente ciclo de selección. El diseño experimental de siembra es de bloques completos al azar, similar al usado en la conformación de la población Ténera/Pisífera.

Referencias

Alvarado, A., Escobar, R., & Peralta, F. (2010). El programa de mejoramiento genético de la palma de aceite de ASD Costa Rica y su contribución a la industria. *ASD Oil Palm Papers,* (34), 17-32. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.34-2009-min.pdf

Amblard, P., Billotte, N., Cochard, B., Durand, T., Jacquemard, C. J., Louise, C., Novy, B., & Potier, F. (2004). El mejoramiento de la palma de aceite *E. guineensis* y *E. oleifera* por el CIRAD-CP. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 306-310.

Asemota, O., & Conaire, B. (2010). Identification of moisture stress tolerant oil palm genotypes. *African Journal of Agricultural Research, 5*(22), 3116-3121. https://academicjournals.org/article/article1381319388_Asemota%20and%20Conaire.pdf

Bakoumé, C. (2016). Genetic diversity, erosion, and conservation in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). In *Genetic diversity and erosion in plants* (pp. 1-33). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25954-3_1

Bastidas, P. S. (1991). *Sistema de mejoramiento en palma africana en El Mira-Tumaco, Colombia* [Documento]. 11.º Curso Corto: Metodología para la Producción de Semilla Comercial de Palma Aceitera Africana, ago.-sept. 1989, Nariño, Colombia (n.º PROCIAND-IICA F03 159). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA].

Bastidas, P. S., Peña, R. E., & Reyes, C. R. (2013). *Preguntas sobre palma de aceite* Elaeis guineensis *Jacq., palma nolí* Elaeis oleifera *(Kunth) Cortés y los híbridos interespecíficos nolí x palma de aceite (*E. oleifera × E. guineensis*).* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://doi.org/10.21930/978-958-740-161-5

Breure, C. J. (1987a). Selección de progenitores de la palma de aceite con base en el índice de racimos y productividad en Nueva Bretaña Occidental. *Palmas, 8*(2), 39-40.

Breure, C. J. (1987b). *Factors associated with the allocation of carbohydrates to bunch dry matter production in oil palm (*Elaeis guineensis *Jacq.).* Harrisons Fleming Advisory Services Limited.

Breure, C. J. (1988). *Metodología para el análisis fisicoquímico de racimos: reporte sobre visita a Colombia palma de aceite y palma de coco: consultoría para* ICA. Harrisons Fleming Advisore Services Limited.

Breure, C. J. (2011). Tasa de expansión foliar: un criterio para identificar materiales de siembra de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) que pueden sembrarse a altas densidades. *Revista Oil Palm Papers, 36*, 1-13.

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), 32-50.

Chin, S. (2004). Selecting the ideal oil palm: What you see is not necessarily what you get! *Journal of Oil Palm Research, 16*(2), 121-128. http://jopr.mpob.gov.my/wp-content/uploads/2013/09/joprv16dec2004-soh.pdf

Comstock, R. E., & Robinson, H. F. (1952). Estimation of average dominance of genes. In J. W. Gowen (ed.), *Heterosis: A record of researches directed toward explaining and utilizing the vigor of hybrids* (pp. 494 - 516). Iowa State University Press. https://www.iastatedigitalpress.com/plugins/books/35/chapter/285

Comstock, R. E., Robinson, H. F., & Harvey, P. H. (1949). A breeding procedure designed to make maximum use of both general and specific combining ability. *Agronomy Journal, 41*(8), 360-367. https://doi.org/10.2134/agronj1949.00021962004100080006x

Corley, R. H. V., Rao, V., Palat, T., & Praiwan, T. (2017). Breeding for drought tolerance in oil palm. *Journal of Oil Palm Research, 30,* 26-35. https://doi.org/10.21894/jopr.2017.0011

Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2003). *The oil palm.* Oxford Blackwell Science Ltda.; Blackwell Publishing Company. https://doi.org/10.1002/9780470750971

Dumortier, F. (2004). Mejoramiento de progenies de altos rendimientos en Dami OPRS. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 276-282.

Dumortier, F., & Konimor, J. (1999). Selection and breeding progress in planting material at Dami OPRS, Papua New Guinea. In *Seminar on sourcing of oil palm planting materials for local and overseas joint-ventures* (pp. 142-170). Palm Oil Research Institute.

Falconer, D. S. (1984). *Introducción a la genética cuantitativa* (14.ª *ed.).* Compañía Editorial Continental S. A.

Figueredo, V. P. (1981). Técnicas sobre producción de semilla mejorada y el establecimiento de viveros en la palma africana de aceite. *Temas de Orientación Agropecuaria,* (149), 71-81.

Forster, B. P., Sitepu, B., Setiawati, U., Kelanaputra, E. S., Nur, F., Rusfiandi, H., Rahmah, S., Ciomas, J., Anwar, Y., Bahri, S., & Caligari, P. D. (2017). Oil palm (*Elaeis guineensis*). In *Genetic improvement of tropical crops* (pp. 241-290). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59819-2_8

Hallauer, A. R., Carena, J. M., & Miranda, J. B. (1981). Quantitative genetics in maize breeding. In *Handbook of plant breeding* (pp. 205-265). Iowa State University Press.

Hallauer, A. R., Russell, W. A., & Lamkey, K. R. (1988). Corn breeding. In G. F. Sprague & J. W. Dudley (eds), *Corn and corn improvement* (Vol. 18, 3.rd ed., pp. 463-564). American Society of Agronomy. https://doi.org/10.2134/agronmonogr18.3ed.c8

Hartley, C. W. S. (1969). Oil palm research in Colombia with special reference to selection, breeding seed production and supply [Informe de la visita realizada a las plantaciones de palma de Colombia entre 23 de mayo y 11 de junio de 1969]. En *Informes técnicos de 1969* (Tomo 1, Programa Oleaginosas Perennes, Regional 5). Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Hartley, C. W. S. (1974). *Oil palm research and development in Colombia* [Informe presentado al Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)].

Hartley, C. W. S. (1988). *The oil palm,* Elaeis guineensis *Jacq.* (3rd ed.). Longman Group U.K.

Kushairi, A., Rajanaidu, N., Jalam, B. S., Mohd Rafii, Y., & Mohd Din, A. (2000). Materiales de siembra de palma de aceite del Porim. *Palmas, 21*(3), 51-63.

Lobo, M. (2008). Importancia de los recursos genéticos de la agrobiodiversidad en el desarrollo de sistemas de producción sostenibles. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria,* 9(2), 19-30. https://doi.org/10.21930/rcta.vol9_num2_art:114

Márquez, S. F. (1985). *Genotecnia vegetal: métodos, teoría, resultados* (Tomo I). AGT Editor S. A.

Millán, E., Ruiz, R., & Romero, H. (2017). *Criterios de cosecha en cultivares híbridos: características que evalúan el punto óptimo de cosecha en palma de aceite* [Guía de bolsillo]. http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107649

Molina, G. J. D. (1992). *Introducción a la genética de poblaciones y cuantitativa (Algunas implicaciones en genotecnia)* (1ª ed.). AGT Editor S. A.

Müller, A. A., & De Andrade, E. B. (2010). Aspectos gerais sobre a fenologia da cultura da palma de óleo. Em A. R. Filho & P. E. Ferreira da Motta, *Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia* (pp. 83-92). Embrapa Solos. http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2015/01/ABRAPALMA-Tudo-Sobre-Palma.pdf

Murugesan, P., Aswathy, G. M., Kumar, K. S., Masilamani, P., Kumar, V., & Ravi, V. (2017). Oil palm (*Elaeis guineensis*) genetic resources for abiotic stress tolerance: A review. *Indian Journal of Agricultural Sciences, 87(5),* 571-579. https://doi.org/10.56093/ijas.v87i5.70087

Narváez, J., Chilito, L., & Bastidas, P. S. (1996). Determinación de la madurez óptima de cosecha para la palma de aceite en la región de Tumaco, Nariño. *Palmas, 17*(4), 15-22.

Ngando-Ebongue, G. F., Ajambang, W. N., Koona, P., Lalu Firman, B., & Arondel, V. (2011). Oil palm. In *Technological innovations in major world oil crops* (Vol. 1, pp. 165-200). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0356-2_7

Peña, R. E., Bastidas, P. S., Reyes, C. R., & Rankin, C. J. (2003). *Procedimiento técnico para la producción de semilla de palma de aceite (*Elaeis guineensis *Jacq.) de material mejorado obtenido por Corpoica en el C.I. El Mira*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Preciado, C. A., Bastidas, S., Betancourth, C., Peña, E., & Reyes, R. (2011). Predicción y control de la cosecha en el híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* en la zona palmera occidental I. I. Determinación del periodo de madurez para obtener racimos con alto contenido de aceite. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 12*(1), 5-12. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num1_art:210

Rey, B. L., Ayala, D. I. M., Ruiz, R. R., Gómez, C. P. L., Reyes, R. A., & Martínez, M. D. (2004). Evaluación y selección de materiales Dura en plantaciones comerciales de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 330-338.

Reyes, C. P. (1985). *Fitogenotécnia* básica y aplicada (1.ª ed.). AGT Editor, S. A.

Reyes, R., Riaño, N. M., Chinchilla, C., & Ibarra, L. N. (2014). Physiological response of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) to soil water availability under field conditions in Tumaco, Colombia. *Revista Oil Palm Papers 42*, 11-20. https://agriperfiles.agri-d.net/display/AS-pub-B65F43EBDE0DE67A96B3D22D47839DB4

Richardson, D. L. (1995). La historia del mejoramiento genético de la palma aceitera en la compañía Unit Fruit en América. ASD *Oil Palm Papers* (11), 1-22.

Rocha, C. R. N., Rodrigues, L. M. R., Teixeira, P. C., Lopes, R., Da Cunha, V. R. N., De Macedo, V. J. L., De Morais, R. R., & De Lima, A. W. A. (2010). Manejo sustentável para a cultura da palma de óleo: cobertura do solo e cultivos intercalares. Em A. R. Filho & P. E. Ferreira da Motta, *Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia* (pp. 127-135). Embrapa Solos. http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2015/01/ABRAPALMA-Tudo-Sobre-Palma.pdf

Rojas, C. L. A. (1981). Labores de establecimiento y mantenimiento del cultivo. *Temas de Orientación Agropecuaria,* (149), 82-92.

Sambanthamurthi, R., Singh, R., Kadir, A. P. G., Abdullah, M. O., & Kushairi, A. (2009). Opportunities for the oil palm via breeding and biotechnology. In S. M. Jain & P. M. Priyadarshan (eds.), *Breeding plantation tree crops: Tropical species* (pp. 377-421). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_11

Setiawati, U., Sitepu, B., Nur, F., Forster, B. P., & Dery, S. (2018). *Crossing in oil palm: A manual* (Vol. 6). CABI. https://doi.org/10.1079/9781786395917.0000

Sinisterra, K., Caicedo, A., Castilla, C., Ceballos, D., Palacio, M., Cortés, Í, Camperos Reyes, J. E., Ayala, I., & Mosquera-Montoya, M. (2019). Validación del punto óptimo de cosecha en el cultivar híbrido interespecífico O×G Corpoica (Cereté×Deli y Cereté×Yangambi). *Ceniavances,* (189).

Soh, A. C. (2012). Breeding and genetics of the oil palm. In *Palm oil* (pp. 31-58). AOCS Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-9818936-9-3.50005-8

Sterling, F. (1993). Modelo de selección y mejoramiento de PIPA/ASD: objetivos y necesidades del palmicultor del futuro. *Palmas, 14*(número especial), 26-39.

Tiessen, A. (2012). *Fundamentos de mejoramiento genético vegetal: conceptos básicos de genética, biología molecular, bioquímica y fisiología vegetal.* Editorial Académica Española.

Vallejo, R. G. (1978). Mejoramiento genético de la palma africana. Palma africana de aceite. *Manual de Asistencia Técnica* (22), 97-144.

Vallejo, R. G. (1981). Mejoramiento genético. *Temas de Orientación Agropecuaria,* (149), 49-70.

Vallejo, F. A., Espitia, M. M., Checa, C. O., Lagos, T. C., Salazar, V. F., & Restrepo, S. E. (2005). *Análisis estadístico para los diseños genéticos en fitomejoramiento.* Universidad Nacional de Colombia.

Vallejo, F. A., & Estrada, E. I. (2013). *Mejoramiento genético de plantas* (2.ª ed.). Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52016

Vencovsky, R. (1972). *Princípios de genética quantitativa.* Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; Universidade de São Paulo (ESALQ-USP).

Vieira da Cunha, R. N., Lopes, R., Gomes Júnior, R. A., Lobato Rodrigues, M. R., Teixeira, P. C., Carvalho da Rocha, R. N., & Alves de Lima, W. A. (2010). Material genético utilizado para a produção sustentável da cultura da palma de óleo na Amazônia. Em A. R. Filho & P. E. Ferreira da Motta*, Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia* (pp. 93-100). Embrapa Solos. http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2015/01/ABRAPALMA-Tudo-Sobre-Palma.pdf





Capítulo 4

Resultados del primer ciclo de selección recurrente aplicado al mejoramiento genético de la palma de aceite en AGROSAVIA

Silvio Bastidas Pérez, Eduardo Peña Rojas, Rafael Reyes Cuesta

En Colombia, las investigaciones relacionadas con el mejoramiento genético de la palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq., desde 1960 hasta 1968, estuvieron a cargo del IFA; desde 1969 hasta 1993 la responsabilidad corrió por cuenta del ICA, y desde 1994 hasta el presente, recayó en AGROSAVIA (Corpoica hasta mayo de 2018). Además, desde 1991 Cenipalma también ha venido adelantando trabajos en mejoramiento genético, y manejo sanitario y del cultivo.

El SSRm adoptado por AGROSAVIA para el mejoramiento genético de la palma se aplicó a fin de aumentar la producción de aceite con base en la generación de cultivares de alta producción, tolerantes a enfermedades y adaptados a las condiciones agroclimáticas de la zonas palmeras occidental y oriental del país. El éxito del sistema de selección se midió por el comportamiento de las progenies con respecto a las características objetivo.

El mejoramiento genético de una especie cultivada inicia con la introducción de germoplasma del taxón y de otras relacionadas (Márquez, 1985; Reyes, 1985), así como a partir de su transformación genética. La palma de aceite tuvo dos momentos clave de ingreso de germoplasma al país, uno de genotipos de origen africano en 1933,[1] y otro de origen asiático en 1958, los cuales pasaron a conformar las poblaciones Ténera/Pisífera[2] y Dura,

1 El año indicado corresponde a la fecha de siembra del germoplasma en campo, no a la fecha de introducción de semillas, ya que algunas de estas no llegaron a campo.

2 Ténera/Pisífera: las palmas Pisífera, por su esterilidad femenina, solo se pueden obtener a partir de cruzamientos segregantes Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera. En teoría, el primer

respectivamente. El primer ciclo de SSRm se llevó a cabo en el C. I. El Mira, localizado en Tumaco, Nariño (Bastidas et al., 2003).

Conformación de la población Ténera/Pisífera

Sobre una población de 206 palmas de aceite sembradas en 1933 en la Estación Experimental Palmira[3] con propósitos ornamentales (Patiño, 1948), se aplicó un sistema de selección masal, en el cual el ambiente ejercía alta influencia sobre el fenotipo, que no era apropiado para características de baja heredabilidad (Molina, 1992; Tiessen, 2012). La selección se realizó con base en la producción y el número de racimos, en el peso promedio por racimo, en la conformación porcentual del fruto (pulpa, cuesco y almendra), y en los porcentajes de frutos en racimo y de aceite en pulpa fresca. Después de tres años de evaluación, resultaron seleccionadas seis palmas con 63 %, 56,8 %, 51,5 %, 47,9 %, 39,9 % y 30,5 % de aceite en pulpa (Patiño, 1948). Las palmas elegidas se usaron en la propagación de la especie en Colombia, como se describe enseguida.

La selección masal o fenotípica consiste en elegir las plantas con mejor expresión del carácter objeto de selección; luego, si es posible, con una mezcla balanceada de las semillas de estas plantas se conforma la población de la siguiente generación, tal como se trabaja en maíz (Márquez, 1985; Reyes, 1985).

Con las seis palmas seleccionadas en Palmira se llevaron a cabo cruzamientos controlados para producir progenies de primera generación de cruzamiento (F1). Estas progenies fueron sembradas en la Estación Experimental del Bajo Calima (Arias et al., 1988; Vallejo, 1978), con lo cual se dio inicio a la dispersión de la especie en el occidente colombiano.

En la Estación Experimental del Bajo Calima de nuevo se aplicó una selección fenotípica, pero con mayor rigurosidad en cuanto al registro de las características usadas como criterios de selección. Resultaron escogidas cinco palmas tipo Ténera, identificadas con los siguientes códigos: CL743T,

tipo de cruzamiento segrega 25 % de palmas Dura, 50 % de palmas Ténera y 25 % de palmas Pisífera; el segundo, 50 % de palmas Ténera y 50 % de Pisífera.

3 En la actualidad, Centro de Investigación (C. I.) Palmira.

CL798T, CL821T CL1089T y CL1170T, las cuales pasaron a conformar la serie Calima (CL). Mediante cruzamientos controlados entre las cinco palmas elegidas se produjo la segunda generación de cruzamiento (F2), compuesta por 16 progenies Ténera × Ténera, las cuales fueron establecidas en 1970, en el C. I. El Mira, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con 16 tratamientos y cinco repeticiones de 36 palmas cada una[4]. Estas progenies conformaron la población Ténera/Pisífera de origen africano, fuente de padres Pisífera (Bastidas et al., 2003). A continuación, se presenta el listado de progenies Ténera F2, con las cuales se conformó la población Ténera/Pisífera de origen africano:

1. CL743T × CL798T
2. CL743T × CL1170T
3. CL798T × CL821T
4. CL798T × CL1089T
5. CL798T × CL1170T
6. CL821T × CL743T
7. CL821T × CL798T
8. CL821T × CL1089T
9. CL821T × CL1170T
10. CL1089T × CL743T
11. CL1089T × CL821T
12. CL1089T × CL1170T
13. CL1170T × CL743T
14. CL1170T × CL798T
15. CL1170T × CL821T
16. CL1170T × CL1089T

Las palmas tipo Ténera[5] son híbridos de los tipos Dura y Pisífera (ICA, 2004), por lo tanto, en las progenies de los 16 cruzamientos Ténera × Ténera se espera teóricamente una segregación de los tres tipos en los siguientes porcentajes: 25 % Dura, 50 % Ténera y 25 % Pisífera (Corley & Tinker, 2003; Hartley,1974; Setiawati et al., 2018). De acuerdo con esta característica, la unidad experimental mínima fue de 36 palmas. Como se mencionó antes, el objetivo de esta población es proporcionar palmas Pisífera, las cuales tienen la posibilidad de aparecer en proporción de una por cada cuatro palmas de la parcela experimental.

4 El tamaño mínimo de la unidad experimental en las progenies Ténera × Ténera debe estar entre 27 y 36 palmas (Breure & Verdooren, 1995).

5 En la especie *E. guineensis* no existen razones botánicas o morfológicas para diferenciar variedades. Sin embargo, las características del fruto permiten establecer dos formas o tipos perfectamente diferenciables, los tipos Dura y Pisífera, y un híbrido entre las dos, el tipo Ténera (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1988; Kushairi et al., 2000).

En 1977, la población Ténera/Pisífera se incrementó con las progenies de cinco autofecundaciones de Ténera, cuatro cruzamientos Ténera × Pisífera y un cruzamiento Ténera x Ténera, realizados por el IRHO en las estaciones experimentales La Mé (L) en Costa de Marfil, y Pobé (Po) en Benín (Bastidas et al., 1993). Estas progenies fueron sembradas en bloques al azar con once tratamientos y diferente número de palmas por tratamiento.

A continuación, se presenta el listado de progenies introducidas en 1977 a la población Ténera/Pisífera de origen africano:

1. L7T × L7T
2. L8T × L8T
3. L238T × L238T
4. L426T × L426T
5. Po850T × Po850T
6. L5T × L312P
7. L7T × L312P
8. L426T × L319P
9. L431T × L319P
10. L5T × L2T

Conformación de la población Dura

Como se indicó en el capítulo 2, en Colombia el proceso de selección de las palmas de aceite de origen asiático tipo Dura se inició en 1949 con la siembra de 172 ha en la hacienda Patuca, ubicada en el municipio de Sevilla (ahora municipio de Zona Bananera), Magdalena (Bastidas et al., 1993; Hartley, 1974, 1988). En este caso también se utilizó un sistema de selección masal, y como resultado se seleccionaron siete palmas, identificadas con los siguientes códigos: PA179D, PA208D, PA221D, PA269D, PA350D, PA464D y PA542D, las cuales pasaron a conformar la serie Patuca (PA).

Tiempo después, mediante cruzamientos controlados entre las siete palmas elegidas, se produjeron 28 progenies Dura F1 y tres progenies Dura de primera generación de autofecundación (Corpoica, 1994; ICA, 1972). Las 31 progenies fueron sembradas en 1972 en la Estación Experimental El Mira, con un diseño experimental de bloques completos al azar, con 31 tratamientos y cinco repeticiones de 16 palmas cada una como unidad experimental (Breure & Verdooren, 1995; Forster et al., 2017). Estas progenies conformaron

la población Dura de origen asiático, fuente de madres Dura (Bastidas et al., 1993). A continuación, se presenta el listado de progenies D × D, con las cuales se conformó la población Dura de origen asiático:

1. PA542D × PA269D
2. PA542D × PA208D
3. PA542D × PA464D
4. PA542D × PA179D
5. PA269D × PA464D
6. PA269D × PA179D
7. PA269D × PA269D
8. PA464D × PA269D
9. PA464D × PA542D
10. PA464D × PA350D
11. PA464D × PA464D
12. PA350D × PA208D
13. PA208D × PA464D
14. PA350D × PA179D
15. PA179D × PA208D
16. PA179D × PA464D
17. PA208D × PA542D
18. PA208D × PA221D
19. PA208D × PA179D
20. PA208D × PA208D
21. PA221D × PA464D
22. PA221D × PA542D
23. PA221D × PA269D
24. PA221D × PA179D
25. PA221D × PA208D
26. PA350D × PA269D
27. PA208D × PA350D
28. PA269D × PA350D
29. PA179D × PA350D
30. PA208D × PA269D
31. PA179D × PA542D

Esta población se incrementó con las progenies de diez cruzamientos entre palmas Dura de Patuca y Dura de La Pepilla (PE) y con tres autofecundaciones Dura de Patuca. Estos cruzamientos y autofecundaciones se realizaron en la Estación Experimental La Pepilla del ICA, ubicada en el municipio de Aracataca, Magdalena, y en la hacienda Patuca, municipio de Sevilla, Magdalena. Las trece progenies fueron sembradas en la Estación Experimental El Mira en 1983, en bloques completos al azar con trece tratamientos y cuatro repeticiones de 16 palmas cada una (Bastidas et al., 2003). A continuación, se muestra el listado de progenies D × D introducidas a la población Dura de origen asiático:

1. PA315D × PA464D
2. PA241D × PE687D
3. PE586D × PA241D
4. PE586D × PA464D
5. PE625D × PA464D
6. PE630D × PA315D
7. PE665D × PA464D
8. PE687D × PA241D
9. PE586D × PE687D
10. PE625D × PE586D
11. PA241D × PA241D
12. PA315D × PA315D
13. PA464D × PA464D

En síntesis, con la siembra de 16 progenies Ténera × Ténera y 31 Dura × Dura en la Estación Experimental El Mira, en 1970 y 1972 respectivamente, se inició el SSRm como esquema para el mejoramiento genético de la palma de aceite en Colombia (Vallejo, 1978, 1981). En 1992 se concretó el sistema con la siembra de las pruebas de progenies interpoblacionales Ténera, resultado de cruzamientos Dura × Pisífera. La población Ténera/Pisífera del sistema de selección lleva una generación de ventaja con respecto a la población Dura; sin embargo, para evitar confusiones, en este texto se tratarán como generaciones paralelas (figura 4.1).

En palma de aceite, el SSRm difiere del SSR tradicional empleado en cultivos como el de maíz, en cuanto a obtención y selección de los progenitores masculinos, ya que se basó en tres aspectos: 1) obtención de progenitores tipo Pisífera a partir de cruzamientos segregantes Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera; 2) las palmas tipo Pisífera presentan esterilidad femenina (Myint, 2010; Reyes et al., 2015), y por lo tanto no pueden valorarse por su propio comportamiento, sino con base en el comportamiento de las palmas hermanas de segregación, Dura y Ténera, y 3) la selección definitiva de los progenitores Pisífera se realiza por pruebas de progenies. Una característica del SSRm es el manejo independiente de las dos poblaciones contrastantes; además, permite el mejoramiento simultáneo de estas poblaciones.

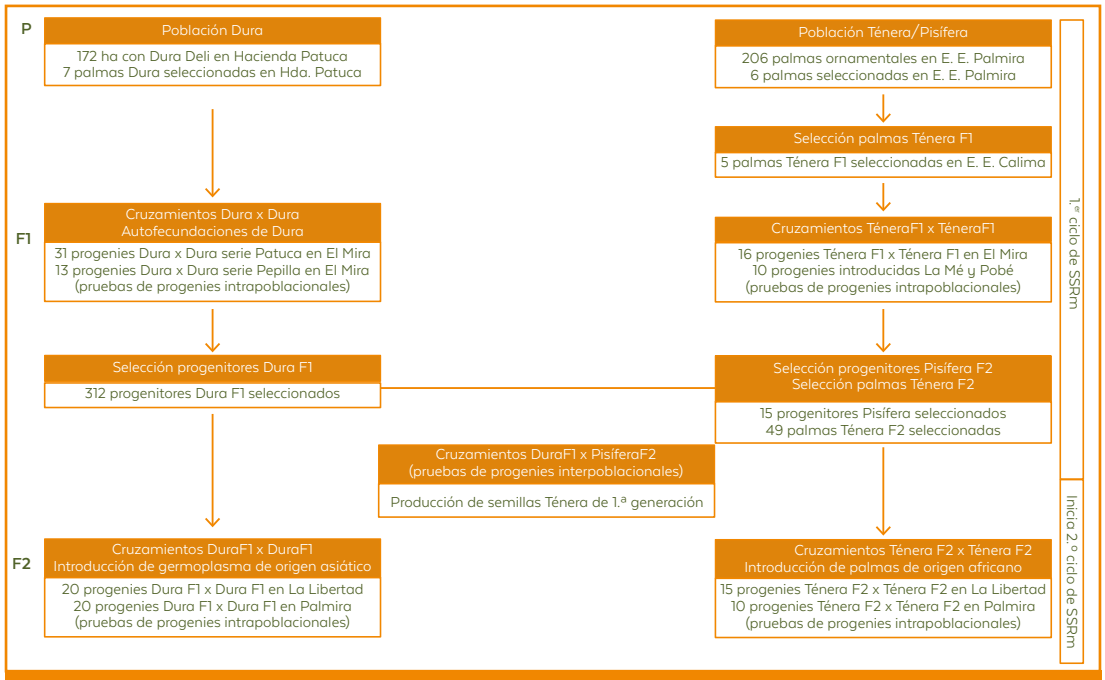


Figura 4.1. Detalles del sistema de selección recurrente modificado, aplicado al mejoramiento genético de la palma de aceite en AGROSAVIA.

Fuente: Elaboración propia

Selección de palmas Dura F1 en la población Dura

La fertilidad de las palmas Dura hace posible el establecimiento de lotes genealógicos con 100 % de estas palmas; como consecuencia, es posible valorar un mayor número de progenies en áreas de terreno menores que las requeridas en la selección de las palmas Pisífera.[6]

Identificación del tipo de palma Dura Deli

Las semillas tipo Dura de origen asiático introducidas al país desde Honduras fueron obtenidas por polinización abierta, por lo tanto, pudieron proceder de cruzamientos naturales con polen de palmas tipo Dura de origen africano (Hartley, 1969, 1974). Por esto, primero fue necesario certificar el origen asiático de las tipo Dura; según los criterios indicados en el capítulo 3, se debe constatar

6 Unidad experimental mínima (UEM) para selección de palmas Dura: 16 palmas/parcela. La UEM para selección de Pisífera es de 36 palmas/parcela, y la UEM para pruebas de progenies, de doce a 16 palmas/parcela.

que las palmas correspondan al tipo Dura Deli y descartar las de tipo africano. Menos del 1% de las palmas de la población Dura resultó del tipo africano, las cuales fueron descartadas del SSRm.

Selección de familias Dura × Dura

Como se mencionó antes, en la población Dura de origen asiático se aplicó un sistema de selección combinado, en el cual se realizan tres actividades básicas: 1) selección de familias, 2) selección de palmas superiores en las familias seleccionadas,[7] y 3) selección masal de palmas superiores en las familias descartadas.

Una vez concluido un ciclo de evaluación,[8] se seleccionaron las mejores familias Dura con base en los criterios descritos en la tabla 4.1, y se eligieron trece familias en la siembra de 1972 y siete en la siembra de 1983. Las 20 familias presentaron la siguiente variación en producción de aceite: desde 39,74 hasta 68,95 kg de aceite/palma/año, equivalente a un potencial de producción de aceite de 5,68 a 9,86 t /ha/año, respectivamente (tabla 4.1).

Las familias de la siembra de 1983 presentaron mayor vigor híbrido en la producción de aceite que las familias de 1972, por corresponder a cruzamientos Patuca × Pepilla (es decir, entre palmas de diferente procedencia y origen primario), mientras que en la siembra de 1972 todas las progenies correspondieron a cruzamientos Patuca × Patuca (Martínez et al., 1999). Además, aunque las dos siembras correspondieron a palmas de origen asiático, la siembra de 1972 llegó a Colombia desde la Estación Experimental de Lancetilla, Honduras, en 1949 (Alvarado et al., 2010; Richardson, 1995; Sterling & Alvarado, 2002), en tanto que la siembra de 1983 llegó al país a través de Surinam, en 1953 (Bastidas et al., 2003).

7 La selección de familias se realiza con un promedio de 60 análisis de racimos por familia, mientras que la selección de palmas individuales se apoya en un promedio de seis análisis por palma (Breure, 1987, 1988; Breure & Verdooren, 1995).

8 Un ciclo genético completo abarca diez años: un año entre cruzamientos controlados y germinación de las semillas; uno en etapa de vivero; dos años en etapa juvenil de campo y registro de medidas biométricas; cinco años de registros de producción, análisis cuantitativos de frutos y registro de medidas biométricas, y un año en el procesamiento de información, análisis estadísticos y selección de progenitores.

Tabla 4.1. Características cuantitativas de las familias Dura × Dura seleccionadas en el C. I. El Mira como fuentes de progenitores madre Dura F1, con base en los promedios de las palmas seleccionadas por familia (promedios de cinco años de producción)

Año de siembra	Identificación del cruzamiento	Número racimos por palma (uds.)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de racimos por palma (kg/año)	Producción de racimos por ha (t/año)	Cuesco en fruto (%)	Almendra en fruto (%)	Aceite en racimo (%)	Producción de aceite (kg/palma)	Producción de aceite (t/ha)
1972	PA179D × PA350D	18	11,81	212,61	24,31	30,50	8,75	23,97	55,38	7,92
1972	PA221D × PA179D	14	15,46	216,42	24,76	29,26	9,20	25,07	54,33	7,77
1972	PA350D × PA179D	17	12,69	215,74	30,85	28,99	8,72	25,17	54,13	7,74
1972	PA208D × PA542D	15	13,39	200,78	28,71	28,29	7,51	26,17	52,54	7,51
1972	PA542D × PA208D	14	14,54	203,53	29,10	29,07	7,85	25,67	51,86	7,42
1972	PA179D × PA542D	17	12,29	208,91	29,87	50,11	8,27	24,43	51,13	7,31
1972	PA542D × PA464D	13	17,69	230,00	32,89	29,04	9,02	22,26	50,85	7,27
1972	PA350D × PA208D	17	11,66	198,24	28,35	28,78	8,40	24,33	47,99	6,86
1972	PA269D × PA350D	17	12,50	212,49	30,39	29,92	8,81	22,71	47,93	6,85
1972	PA350D × PA269D	16	9,88	158,09	22,61	31,79	9,22	23,81	46,68	6,68
1972	PA208D × PA350D	17	11,61	197,31	24,69	29,92	8,83	23,49	46,35	6,63
1972	PA464D × PA350D	12	14,05	168,57	24,11	28,83	7,62	24,17	40,31	5,76
1972	PA542D × PA179D	16	12,52	200,27	28,69	30,82	8,52	19,72	39,74	5,68
1983	PE625D × PE586D	13	19,46	253,03	36,18	38,23	8,48	27,38	68,95	9,86
1983	PE665D × PA464D	10	19,69	196,93	28,16	30,58	6,45	32,59	63,73	9,11
1983	PA241D × PE687D	9	21,47	193,26	27,64	28,81	6,61	32,22	61,75	8,83
1983	PE586D × PA464D	9	22,52	202,72	28,99	31,89	7,69	27,50	55,55	7,94
1983	PE586D × PA241D	10	19,02	190,21	27,20	30,51	7,52	28,50	54,17	7,75
1983	PE687D × PA241D	10	19,01	190,07	26,21	35,15	8,35	27,40	52,30	7,48
1983	PE630D × PA315D	12	15,78	189,32	27,07	30,36	8,00	27,62	51,61	7,38

PA: serie Patuca, hacienda Patuca, Sevilla, Magdalena, lugar de ingreso de germoplasma de origen asiático a Colombia; PE: serie Pepilla, Estación Experimental La Pepilla, ICA, Aracataca, Magdalena, segunda fuente de ingreso de germoplasma asiático a Colombia; D: Dura; ×: símbolo de cruzamiento.

Fuente: Elaboración propia

Elección de palmas Dura F1 en familias seleccionadas

La elección de palmas superiores en familias seleccionadas se llevó a cabo con base en los criterios descritos en la tabla 4.1. Se seleccionaron en total 285 palmas Dura tipo Deli, de las cuales 110 correspondieron a la siembra de 1972 y 175 a la siembra de 1983. En cuanto al potencial de producción de aceite, las 285 palmas presentaron el siguiente rango de variación: desde 35,10 hasta 84,48 kg de aceite/palma/año, equivalente a un potencial de producción de aceite de 5,02 a 12,08 t/ha/año, respectivamente.

El potencial productivo de las diez mejores palmas Dura Deli seleccionadas está entre 10,70 y 12,08 t de aceite/ha/año. Solo la palma EM782D de la siembra de 1972 está entre las diez palmas superiores y las nueve restantes son de la siembra de 1983 (tabla 4.2). Este comportamiento demuestra el vigor híbrido de cruzamientos entre palmas de diferente origen (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1988). Algunas de estas palmas se usaron para producir la población Dura F2, con la cual se inició el segundo ciclo de SSRm.

Tabla 4.2. Características determinantes de la producción de aceite de diez palmas Dura F1 superiores dentro de familias seleccionadas Ténera × Ténera (promedios de cinco años de producción)

Año de siembra	Identificación de la palma seleccionada	Número racimos por palma (uds.)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de racimos por palma (kg/año)	Producción de racimos por ha (t/año)	Cuesco en fruto (%)	Almendra en fruto (%)	Aceite en racimo (%)	Producción de aceite (kg/palma)	Producción de aceite (t/ha)
1983	EM3316D	15	18,99	284,88	40,74	28,05	7,92	29,66	84,48	12,08
1983	EM3209D	10	23,03	230,27	32,93	31,04	5,70	36,32	83,64	11,96
1983	EM4214D	14	18,73	262,16	37,49	34,49	7,98	31,31	82,09	11,74
1983	EM1911D	8	25,83	206,65	29,55	26,29	4,26	39,34	81,29	11,62
1983	EM4106D	12	22,69	272,33	38,94	31,22	6,78	29,76	81,04	11,59
1983	EM4608D	10	23,05	230,52	32,96	26,42	3,82	42,18	79,24	11,33
1972	EM782D	17	15,69	266,76	38,15	31,21	10,22	28,86	76,98	11,01
1983	EM910D	9	22,35	201,19	28,77	28,96	5,49	37,91	76,27	10,91
1983	EM1007D	9	25,28	227,48	32,53	28,58	5,69	33,27	75,67	10,82
1983	EM4607D	11	20,31	223,43	31,95	28,96	4,56	33,49	74,82	10,70

EM: serie El Mira, C. I. El Mira, Tumaco, Nariño; D: Dura.
Fuente: Elaboración propia

Selección de palmas Dura F1 en familias descartadas

Por bajo promedio en algunas características usadas como criterios de selección, se descartaron 18 familias de la siembra de 1972 y seis familias de 1983. Sin embargo, algunas palmas de estas familias demostraron superioridad durante todo el proceso de selección.

La selección de palmas Dura en las familias descartadas se realizó con base en los criterios descritos en la tabla 3.1, y como resultado se seleccionaron en total 27 palmas (cinco de la siembra de 1972 y 22 de 1983). Las diez mejores palmas Dura seleccionadas en las familias descartadas presentaron una variación en la producción de aceite de 51,60 a 81,29 kg/palma/año, con un potencial de producción de aceite de 7,38 a 11,62 t/ha/año (tabla 4.3).

Tabla 4.3. Características determinantes de la producción de aceite de las diez mejores palmas Dura F1 seleccionadas dentro de las familias descartadas (promedios de cinco años de producción)

Identificación de la palma	Identificación de la familia descartada	Número racimos por palma (uds.)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de racimos por palma (kg/año)	Producción de racimos por ha (t/año)	Cuesco en fruto (%)	Almendra en fruto (%)	Aceite en racimo (%)	Producción de aceite (kg/palma)	Producción de aceite (t/ha)
EM1911D	PE315D × PA464D	8,24	25,08	206,65	29,55	26,29	4,26	39,34	81,29	11,62
EM0910D	PE315D × PA464D	9,16	21,96	201,19	28,77	28,96	5,49	37,91	76,27	10,91
EM3604D	PE315D × PA464D	9,28	22,47	208,56	29,82	30,05	7,28	32,77	68,34	9,77
EM1708D	PE625D × PA464D	8,32	21,39	177,99	25,45	26,90	5,45	38,03	67,69	9,68
EM1303D	PE241D × PE241D	10,12	17,84	180,52	25,81	27,59	8,37	34,63	62,52	8,94
EM3401D	PE315D × PA464D	8,84	23,43	207,13	29,62	28,89	7,30	30,05	62,25	8,90
EM2723D	PE241D × PE241D	12,12	16,98	205,75	29,42	36,65	5,23	29,67	61,05	8,73
EM2710D	PE315D × PA464D	9,08	23,17	210,35	30,08	29,81	1,68	28,49	59,93	8,57
EM2121D	PE586D × PE687D	8,92	22,36	199,43	28,52	27,40	7,40	26,27	52,40	7,49
EM0208D	PA208D × 221D	15,00	13,35	200,25	28,64	28,95	8,04	25,77	51,60	7,38

PA: serie Patuca, hacienda Patuca, Sevilla, Magdalena, lugar de ingreso de germoplasma de origen asiático a Colombia; PE: serie Pepilla, Estación Experimental La Pepilla, ICA, Aracataca, Magdalena, segunda fuente de ingreso de germoplasma asiático a Colombia; EM: serie El Mira, C. I. El Mira, Tumaco, Nariño; D: Dura; ×: símbolo de cruzamiento.
Fuente: Elaboración propia

La selección de palmas en las familias descartadas se efectuó para corregir defectos de familia y para evitar el descarte de palmas superiores debido al pobre comportamiento de toda la familia. La presión de selección en la población Dura fue de 9,42 %, es decir, de 3.312 palmas de las siembras entre 1972 y 1983, se seleccionaron 312 palmas. En las 312 palmas se incluyeron las últimas 27 seleccionadas en las familias descartadas.

El primer ciclo de selección en la población Dura finalizó con la elección de 312 palmas superiores Dura F1, las cuales fueron clasificadas en tres grados, según el número de características positivas (tabla 4.4). En el grado 1 se agruparon las palmas élite. La producción de RFF estuvo más correlacionada con el número de racimos que con el peso, dado que este último es influenciado por el ambiente (Bastidas et al., 2013; Dumortier, 2004).

Las palmas del grado 2 sustentan la producción de RFF en el número de racimos, por lo cual producen cosechas estables durante el año. En las palmas de grado 3, la producción de racimos de fruta fresca (RFF) se sostiene en el peso de los racimos. Estas palmas tienden a producir picos pronunciados de cosecha, con alta variación durante el año (Bastidas, 1991).

Tabla 4.4. Criterios para agrupar las palmas Dura seleccionadas

Característica	Grado 1	Grado 2	Grado 3
Producción (kg/palma/año)	+	+	+
Aceite en racimo (%)	+	+	+
Número de racimos (palma/año)	+	+	
Peso promedio por racimo (kg)	+		+

Fuente: Elaboración propia

Selección de palmas Ténera F1 y preselección de palmas Pisífera F1 en la población Ténera/Pisífera

El proceso de selección de progenitores Pisífera fue diferente del que se llevó a cabo con progenitores Dura. Como se mencionó antes, las palmas Pisífera se obtienen por segregación a partir de cruzamientos Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera (capítulo 3). Además, la preselección de palmas Pisífera F1 se hace por el comportamiento de sus hermanas de segregación, Dura y Ténera, pero la selección definitiva es por pruebas de progenies (Sambanthamurthi et al., 2009).

La selección de progenitores Pisífera es un proceso más riguroso, porque tienen mayor potencial de producción de descendencias —semillas— que los progenitores Dura, según se indicó en el capítulo 3.

Identificación de palmas Dura, Ténera y Pisífera en la población Ténera/Pisífera

Tomando en cuenta la característica segregacional de la población Ténera/Pisífera, la primera actividad consistió en identificar los tipos de palma —Dura, Ténera y Pisífera— existentes en esta población, según los criterios descritos en el capítulo 3.

Selección de familias Ténera × Ténera

El proceso de selección de familias Ténera × Ténera se realizó según el comportamiento promedio de las palmas Dura y Ténera de cada familia, con los criterios descritos en la tabla 3.1. En la población Ténera/Pisífera resultaron elegidas siete familias de la siembra de 1970 (CL798T × CL1089T, CL821T × CL1170T, CL821T × CL1089T, CL1170T × CL821T, CL1170T × CL798T, CL798T × CL798T y CL743T × CL798T) (Martínez et al., 1999), y tres familias de la siembra de 1977 (L426T × L319P, L431T × L319P y Po850T × Po850T) (Bastidas et al., 1993), estas últimas seleccionadas para introducir variabilidad en la población de origen africano. Las diez familias elegidas Ténera × Ténera presentan el potencial productivo por tipo de palma segregada, Dura y Ténera (tabla 4.5).

Tabla 4.5. Características expresadas por las palmas Dura y Ténera segregadas por diez familias Ténera × Ténera seleccionadas en la población de origen africano

Identificación del cruzamiento	Tipo de palma	Número racimos por palma (uds.)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de racimos por palma (kg/año)	Pulpa en fruto (%)	Cuesco en fruto (%)	Almendra en fruto (%)	Aceite en racimo (%)	Producción de aceite (kg/palma)	Producción de aceite (t/ha)
CL1170T × CL821T	T	28	8,36	236,83	81,71	11,27	7,02	27,84	65,93	9,43
CL798T x CL1089T	T	18	11,18	203,47	85,31	7,27	7,42	30,08	62,66	8,96
CL821T × CL1089T	T	23	9,08	207,66	85,19	7,88	6,93	32,68	61,75	8,83
CL821T × CL1170T	T	23	8,63	201,44	84,60	8,47	6,93	29,42	59,26	8,47
CL1170T × CL798T	T	19	8,87	169,32	82,78	8,93	8,29	26,37	44,66	6,39
CL743T × CL798T	T	17	8,42	140,86	77,61	13,60	8,79	27,42	39,8	5,69
CL798T × CL798T	T	27	6,66	179,9	87,37	5,98	6,65	29,07	50,18	7,18
L426T × L319P	T	19	6,54	125,63	88,78	6,22	5,00	29,06	36,5	5,22
L431T × 319P	T	17	6,23	104,48	84,76	8,24	7,00	33,89	35,4	5,06
Po850T × Po850T	T	13	4,63	59,03	85,23	8,40	6,37	30,79	18,17	2,61
CL798T × CL1089T	D	25	9,46	234,04	59,07	32,23	8,70	22,08	54,01	7,72
CL821T × CL1170T	D	21	11,66	245,79	54,39	35,12	10,49	20,41	50,16	7,17
CL821T × CL1089T	D	17	9,82	167,87	58,86	32,38	8,76	21,78	39,21	6,61
CL1170T × CL821T	D	19	9,32	174,65	74,81	16,78	8,41	25,18	43,62	6,24
CL1170T × CL798T	D	18	11,08	195,00	59,05	32,54	8,41	20,12	39,23	5,61
CL798T × CL798T	D	19	10,26	194,93	61,72	29,17	9,11	19,71	39,12	5,59
CL743T × CL798T	D	15	9,00	134,1	60,81	31,07	8,12	22,27	28,17	4,03
L426T × L319P	D	20	5,84	113,88	55,77	38,49	5,74	21,4	24,37	3,48
L431T × 319P	D	14	5,95	80,62	54,51	37,14	8,35	23,13	18,65	2,67
Po850T × Po850T	D	13	4,63	61,57	57,92	35,91	6,17	23,39	14,4	2,06

CL: serie Calima, Buenaventura, Valle del Cauca; L: serie La Mé, Costa de Marfil; Po: Pobé, Benín; T: Ténera; P: Pisífera; D: Dura; ×: símbolo de cruzamiento.

Fuente: Elaboración propia

La presencia de cuesco (*shell*) y fibras en los frutos determina dos tipos de palma, Dura (Sh^+Sh^+) y Pisífera (sh^-sh^-), y un híbrido entre los dos, el tipo Ténera (Sh^+sh^-), que segrega los tres tipos cuando se cruza con otro Ténera (Cunha et al., 2010; Forster et al., 2017; Ngando-Ebongue et al., 2012; Setiawati et al., 2018).

Selección de palmas Ténera F1 superiores en familias seleccionadas

Desde el punto de vista técnico, en la selección de palmas superiores Ténera se presenta la primera variación con respecto al procedimiento seguido en la población Dura. En las familias Ténera × Ténera es necesario hacer dos tipos de selección de palmas individuales: 1) seleccionar palmas Ténera F1 a fin de avanzar al segundo ciclo de selección para mejoramiento genético de la población, y 2) seleccionar palmas progenitoras Pisífera para producir semillas Ténera mejoradas. El procedimiento se indica a continuación.

Selección de palmas Ténera F1 en familias seleccionadas

Esta selección se llevó a cabo con los criterios descritos en la tabla 3.1. Se eligieron un total de 37 palmas Ténera F1 en el lote sembrado en 1970 y doce en el lote de 1977. El rango de variación en la producción de las diez palmas Ténera F1 superiores estuvo entre 60,31 y 78,04 kg de aceite/palma/año, equivalente a un potencial de 8,62 y 11,16 toneladas de aceite/ha/año, respectivamente (tabla 4.6).

Las palmas de la siembra de 1970 fueron más productivas que las de 1977; no obstante, el objetivo de estas últimas fue introducir variabilidad en la población Ténera/Pisífera. La presión de selección de palmas Ténera en la población Ténera/Pisífera fue de 1,4 %, dado que fueron seleccionadas 49 entre 3.405 palmas de 1970 y 1977.

Tabla 4.6. Características determinantes de la producción de aceite de las diez mejores palmas Ténera F1 seleccionadas en las familias (promedios de cinco años de producción)

Identificación de la familia	Identificación de la palma seleccionada	Número racimos por palma (uds.)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de racimos por palma (kg/año)	Pulpa en fruto (%)	Cuesco en fruto (%)	Almendra en fruto (%)	Aceite en racimo (%)	Producción de aceite (kg/palma)	Producción de aceite (t/ha)
CL1170T × CL821T	EM4993T	28	9,47	268,00	82,98	10,17	6,85	29,12	78,04	11,16
CL821T × CL1089T	EM4870T	29	10,14	290,90	85,98	7,90	6,12	26,24	76,33	10,92
L431T × L319P	EM424T	14	14,26	199,66	87,37	5,91	6,72	33,66	67,22	9,61
CL798T × CL1089T	EM6608T	17	13,04	221,68	88,30	5,46	6,24	30,28	67,12	9,60
CL821T × CL1089T	EM5487T	24	8,69	205,84	78,14	12,28	9,58	31,98	65,82	9,41
CL743T × CL798T	EM5529T	21	9,50	196,60	86,48	7,62	5,90	33,54	65,76	9,40
CL798T × CL1089T	EM5611T	20	9,78	195,60	85,66	7,21	7,13	33,47	65,46	9,36
CL1170T × CL821T	EM4232T	32	6,58	208,01	86,52	7,46	6,02	29,95	62,29	8,91
CL798T × CL1089T	EM5665T	17	12,68	215,56	82,86	8,37	8,77	28,43	61,28	8,76
CL821T × CL1089T	EM4773T	23	8,99	206,77	81,75	8,09	10,16	29,17	60,31	8,62

CL: serie Calima, Buenaventura, Valle del Cauca; L: serie La Mé, Costa de Marfil; EM: serie El Mira, C. I. El Mira, Tumaco, Nariño; T: Ténera; P: Pisífera; ×: símbolo de cruzamiento.
Fuente: Elaboración propia

Preselección de progenitores Pisífera en familias seleccionadas

En las diez familias Ténera × Ténera seleccionadas en la población africana, las palmas Pisífera fueron clasificadas en tres categorías según su fertilidad (fértil, medianamente fértil y estéril), de acuerdo con los criterios descritos en la tabla 3.5. Después de esta clasificación fueron preseleccionadas 28 palmas Pisífera medianamente fértiles,[9] de las cuales quince Pisífera tipo Yangambi

9 Las palmas Pisífera presentan alta esterilidad femenina, rara vez producen frutos, y cuando lo hacen, la mayoría son partenocárpicos, por lo cual solo se emplean como progenitores masculinos (Forster et al., 2017; Setiawati et al., 2018).

corresponden a la siembra de 1970 y trece Pisífera a la siembra de 1977 (de estas últimas, nueve fueron del tipo La Mé y cuatro del tipo Pobé) (tabla 4.7).

La presión de selección de palmas Pisífera en la población Ténera/Pisífera fue de 0,8 %, dado que 28 palmas se preseleccionaron entre 3.405 palmas Dura, Ténera y Pisífera de las siembras de 1970 y 1977.

Tabla 4.7. Palmas Pisífera medianamente fértiles, preseleccionadas como progenitores padres en progenies Ténera × Ténera y Ténera × Pisífera

Siembra de 1970		Siembra de 1977	
Familias seleccionadas	Palmas Pisífera de la serie Yangambi	Familias seleccionadas	Palmas Pisífera de las series La Mé y Pobé
CL1170T × CL798T	EM3736P	L426T × L319P	EM63P
CL1170T × CL821T	EM6403P		EM68P
CL743T × CL798T	EM5521P	L431T × L319P	EM401P
CL798T × CL1089T	EM3713P		EM406P
	EM3715P		EM412P
CL798T × CL798T	EM208P		EM420P
	EM209P		EM422P
	EM221P		EM444P
CL821T × CL1089T	EM5508P		EM450P
	EM5541P	Po850T × Po850T	EM254P
CL821T × CL1170T	EM4306P		EM259P
	EM5320P		EM265P
	EM4357P		EM297P
	EM4402P		
	EM6777P		

CL: serie Calima; EM: serie El Mira; L: serie La Mé; Po: serie Pobé; T: Ténera; P: Pisífera.
Fuente: Elaboración propia

Pruebas de progenies interpoblacionales Ténera F1

Las palmas Pisífera preseleccionadas en la población Ténera/Pisífera africana se usaron como padres, en cruzamiento con palmas madre Dura elegidas entre la población asiática, para producir progenies Ténera F1, con las cuales se establecieron pruebas de progenies interpoblacionales. En este caso, las palmas Dura se usaron como probadoras de los padres Pisífera, debido a la naturaleza estéril de estas últimas (Kushairi et al., 2000; Myint, 2010).

Confirmación de las selecciones Pisífera con base en pruebas de progenies Ténera

Las pruebas de progenies Ténera se establecieron en 1992 en el Centro Regional de Investigación El Mira, y las pruebas comerciales en plantaciones particulares de la zona palmera occidental (Astorga y finca Pital, Tumaco, Nariño) y de la zona palmera oriental (plantación Guaicaramo, Barranca de Upía, Meta). Los objetivos específicos de estas pruebas fueron: 1) confirmar la selección de los padres Pisífera, y 2) valorar el potencial productivo de los híbridos Ténera. Las variables de respuesta y los criterios de evaluación fueron los descritos en la tabla 3.1. El comportamiento de las progenies Ténera confirmó la selección definitiva de los progenitores Pisífera.

La presión de selección de las palmas Pisífera fue de 0,8 % sobre el total de palmas Dura, Ténera y Pisífera de la población Ténera/Pisífera, más estricta porque las palmas Pisífera tienen mayor potencial de producción de semillas que las palmas Dura (Dumortier & Konimor, 1999).

Inicialmente se valoraron doce palmas Pisífera por el comportamiento de 38 progenies Dura × Pisífera, en las cuales cada palma Pisífera (padre) fue cruzada con dos o más palmas Dura (madres) seleccionadas por la alta productividad de su aceite. Las 38 progenies D × P ocuparon 18 ha en tres pruebas de evaluación. La siembra se hizo en triángulo con 9 m de distancia entre palmas, para una densidad de siembra de 143 palmas/ha. Se utilizó un diseño experimental en bloques completos dispuestos al azar, con seis, doce y 20 tratamientos y tres repeticiones de 16 palmas cada una (Rocha et al., 2010; Rojas, 1981).

Las progenies pasaron por una etapa de vivero de doce meses, y posteriormente se trasplantaron en sitio definitivo. Iniciaron floración productiva después de 16 meses de sembradas en campo, y las primeras cosechas se obtuvieron 22 meses después de esta siembra (Bastidas et al., 2004). La valoración se hizo con base en cinco años de registros de cosecha[10] (tabla 4.8) y por análisis de los componentes de la producción de aceite (Breure, 1988).

Tabla 4.8. Potencial de producción de aceite de 38 progenies D × P en el C. I. El Mira, Tumaco, estimaciones en laboratorio

Pruebas de progenies		Producción de RFF (t/ha)	Aceite en racimo* (%)	Aceite por palma (kg)	Producción de aceite (t/ha)
Prueba uno	Mejor familia	28,3	29,9	55,3	7,9
	Promedio 6 familias	24,3	27,9	50,9	7,3
Prueba dos	Mejor familia	38,7	26,7	70,8	10,1
	Promedio 12 familias	33,3	26,2	62,3	8,9
Prueba tres	Mejor familia	39,0	29,0	79,2	11,3
	Promedio 20 familias	33,6	27,1	63,7	9,1
Promedio tres pruebas		**30,4**	**27,1**	**59,0**	**8,5**

RFF: racimos de fruta fresca.
* Estimado en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia

Según estas pruebas, las progenies Ténera inician con una producción de 5,3 t de RFF/ha durante el primer año de cosecha, con incrementos sostenidos hasta alcanzar 30,4 t/ha al quinto año de cosecha (Bastidas et al., 2004). En plantaciones particulares, la densidad de siembra también fue de 143 palmas/ha (Rocha et al., 2010; Rojas, 1981). Las progenies D × P presentaron comportamiento similar al registrado en pruebas de progenies (tabla 4.9).

10 La producción de RFF se registra durante cuatro a cinco años continuos, para tener un estimativo confiable de repetibilidad, entendida esta como la correlación entre mediciones sucesivas de una característica en la misma planta (Falconer, 1984; Molina, 1992; Vencoysky, 1972).

Tabla 4.9. Comportamiento productivo de las progenies Ténera F1 en pruebas comerciales en las zonas palmeras occidental y oriental del país (tonelada de fruto/ha)

Periodos de cosecha	C. I. El Mira, Tumaco, Nariño (área 9,3 ha)	Plantación Pital, Tumaco, Nariño* (área 7 ha)	Plantación Guaicaramo, Barranca de Upía* (área 4,5 ha 1988)
1.er año	3,06	–	6,35
2.° año	8,48	14,47	9,27
3.° año	17,26	22,10	19,06
4.° año	22,76	30,40	–
5.° año	24,48	27,97	–

* Datos obtenidos por cortesía de las plantaciones Pital, Tumaco, Nariño, y Guaicaramo, Barranca de Upía, Meta.
Fuente: Elaboración propia

Las progenies Ténera, además de su alto potencial de producción de fruto y aceite, también demostraron buena conformación de los racimos, calidad de su aceite y buen desarrollo morfológico (tabla 4.10). Por lo tanto, se deduce buena habilidad combinatoria general en los progenitores Dura y Pisífera.

Los resultados anteriores permitieron confirmar la selección de las palmas Pisífera como progenitores para producir semillas del híbrido Ténera mediante cruzamientos con palmas madre Dura.

Desde el punto de vista técnico, con las pruebas de progenies finalizó el primer ciclo de SSRm del programa de mejoramiento genético de la palma de aceite de AGROSAVIA. Los resultados de estas pruebas facilitaron la obtención del registro ICA n.º PLA-04-3 como nuevo cultivar en el registro nacional de cultivares del ICA, con el nombre comercial Ténera Corpoica Elmira de palma de aceite (ICA, 2004), que ha sido reconocido por su alto potencial para soportar periodos secos, y por lo tanto, puede recomendarse para regiones con periodos secos prolongados o para lugares donde la aplicación de riego es difícil (Bayona-Rodríguez & Romero, 2019).

Tabla 4.10. Comportamiento de las progenies Ténera en cuanto a composición de frutos, calidad de aceite y desarrollo morfológico en el C. I. El Mira, Tumaco

Descriptor valorado		Promedio
Composición de los frutos	Peso promedio del fruto (g)	11,8
	Relación fruto-racimo (%)	75,7
	Pulpa en fruto (%)	78,9
	Cuesco en fruto (%)	10,2
	Almendra en fruto (%)	10,8
	Aceite en pulpa seca (%)	77,6
	Aceite en pulpa fresca (%)	45,7
	Aceite en racimo (%)	27,1
	Carotenos totales (mg/kg)	1.355,7
Indicadores de calidad del aceite	Tocoferoles (ppm)	1.551,7
	Índice de yodo	53,3
	Ácidos grasos insaturados (%)	51,6
	Índice de refracción (40 °C)	1,46
	Punto de fisión (°C)	32,2
Indicadores de desarrollo morfológico	Tasa de crecimiento del tallo (cm/año)	46,4
	Diámetro del tallo (cm)	71,7
	Área de la sección del pecíolo (cm^2)	27,9
	Tasa de emisión foliar (unidad)	17,4
	Peso seco de la hoja 25 (kg)	3,1
	Longitud del pecíolo de la hoja 25 (m)	1,2
	Longitud del raquis de la hoja 25 (m)	5,7
	Área de la hoja 25 (m^2)	6,5
	Área foliar por palma (m^2)	268,0
	Materia seca vegetativa (kg/palma/año)	96,7
	Índice de área foliar	3,8
	Relación de área foliar (m^2/kg)	2,9

Fuente: Elaboración propia

Segundo ciclo del sistema de selección recurrente modificado

El segundo ciclo del SSRm inicia con el plan de cruzamientos entre palmas seleccionadas dentro de cada una de las poblaciones del sistema, a fin de establecer las correspondientes pruebas de progenies intrapoblacionales Dura y Ténera/Pisífera. Después de la selección de las palmas Dura F2, se procede a recolectar polen de cada una de las que están en ciclo masculino, con el propósito de realizar cruzamientos con palmas Dura F2 en ciclo femenino.

El plan de cruzamientos para producir las progenies o familias Dura F2 × Dura F2 se inició en agosto de 2017. Como resultado, las palmas de 40 progenies DF2 × DF2 se valoraron en etapa de vivero, y se sembrarán en campo con el propósito de seleccionar palmas Dura de tercera generación de cruzamiento (DF3). En la tabla 4.11 se indica parte del plan de cruzamientos con la genealogía de las palmas Dura F2, y allí no se observa ningún grado de consanguinidad entre los progenitores de cada uno de los cruzamientos, con el fin de evitar cruzamientos consanguíneos no planificados. Sin embargo, es conveniente incluir dos o tres autofecundaciones planeadas dentro del plan de cruzamientos.[11]

11 Estas autofecundaciones son para disminuir la variabilidad genética y fijar algunos loci de una característica; en una generación de autofecundación la proporción de heterocigotos disminuye en 50 % (Tiessen, 2012).

Tabla 4.11. Plan de cruzamientos Dura F2 × Dura F2 con el fin de generar variabilidad y evitar endogamia no planificada en la colección de trabajo de la palma de aceite de AGROSAVIA

Plan de cruzamientos Dura F2 × Dura F2				Progenitores F1 de la palma Dura F2								
				EM420D × EM1186D	EM420D × EM1186D	EM2404D × EM2322D	EM2404D × EM2322D	EM3421D × EM4009D	EM3421D × EM4009D	EM3421D × EM4009D	EM1321D × EM1968D	EM1321D × EM8838D
Genealogía del progenitor femenino Dura F2			Palma Dura F2 (progenitor femenino)	Palma Dura F2 (progenitor masculino)								
Progenitores de la madre Dura F1 **Madre Po × padre Po**	**Progenitores Po del padre Dura F1** **Madre Po × padre Po**	**Progenitores F1 de la palma Dura F2** **Madre F1 × padre F1**		PLR1328D	PLR314D	PLR306D	PLR307D	PLR617D	PLR1423D	PLR1424D	PLR525D	PLR922D
PA221D × PA179D	PE625D × PA464D	EM1722D × EM4609D	PLR629D	×	×							
PA350D × PA179D	PA542D × PA208D	EM1321D × EM838D	PLR922D			×	×	×	×	×		
PA350D × PA179D	PA542D × PA208D	EM1321D × EM838D	PLR1021D			×	×	×	×	×		
PA350D × PA179D	PA542D × PA208D	EM1321D × EM838D	PLR1121D			×	×	×	×	×		
PA350D × PA179D	PA542D × PA208D	EM1321D × EM838D	PLR1904D			×	×	×	×	×		
PA350D × PA179D	PA208D × PA542D	EM1321D × EM1968D	PLR525D			×	×	×	×	×		
PE586D × PA241D	PE625D × PA464D	EM3421D × EM4009D	PLR317D								×	×
PE586D × PA241D	PE625D × PA464D	EM3421D × EM4009D	PLR418D								×	×
PE586D × PA241D	PE625D × PA464D	EM3421D × EM4009D	PLR617D								×	×
PE586D × PA241D	PE625D × PA464D	EM3421D × EM4009D	PLR1423D								×	×
PE586D × PA241D	PE625D × PA464D	EM3421D × EM4009D	PLR1424D								×	×

PA: serie Patuca; PE: serie Pepilla; EM: serie El Mira; PLR: serie Palmira; D: palma tipo Dura; ×: indica cruzamiento.
Fuente: Elaboración propia

La figura 4.2 muestra un ejemplo sobre la forma de interpretar la genealogía, en la que se parte de una reducida base genética desde su origen primario, cuatro palmas ornamentales, como lo han manifestado varios investigadores (Rajanaidu, 2000, 2016; Setiawati et al., 2018; Soh, 2012). Se toman como ejemplo las palmas PLR317D y PLR525D, las cuales forman parte del cruzamiento planeado como progenitor femenino y progenitor masculino, respectivamente.

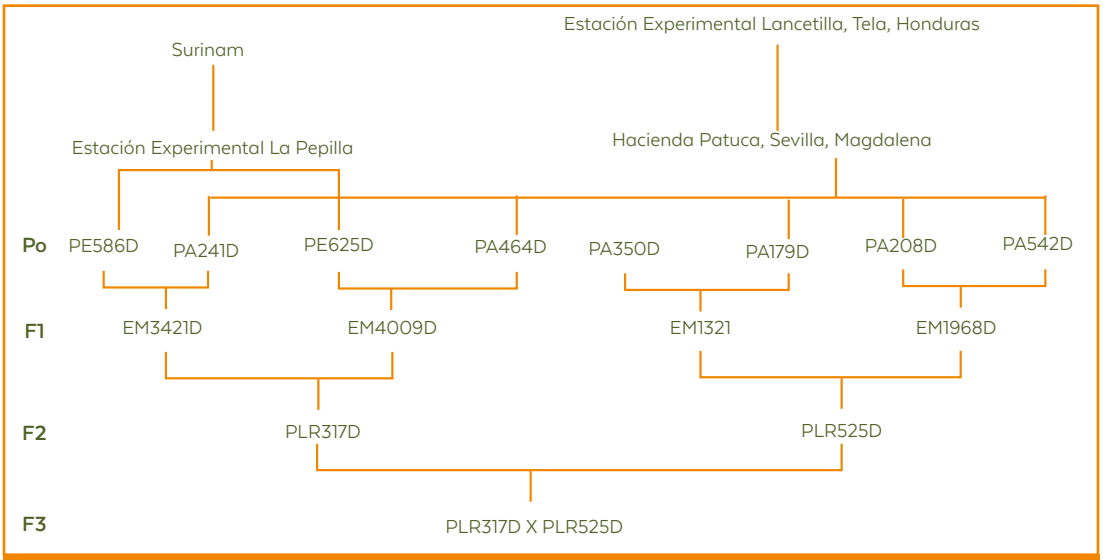


Figura 4.2. Procedencia de germoplasma *E. guineensis* tipo Dura de AGROSAVIA.
Fuente: Elaboración propia

La primera fuente de germoplasma tipo Dura Deli con origen previo en Sumatra, Indonesia, llegó a Colombia procedente de la Estación Experimental Lancetilla, Tela, Honduras (figura 4.2) (Alvarado et al., 2010; Richardson, 1995; Sterling & Alvarado, 2002). Este germoplasma consistió en semillas Dura de libre polinización, y se estableció en 1949, en la hacienda Patuca, Sevilla, departamento del Magdalena (Bastidas et al., 1993).

La segunda fuente de germoplasma tipo Dura de origen asiático llegó a Colombia vía Surinam, también con origen previo en Sumatra, Indonesia (Bastidas et al., 1993). Las palmas de esta segunda introducción se establecieron en 1953 en la Estación Experimental La Pepilla, municipio de Aracataca, Magdalena (Bastidas et al., 2003).

Referencias

Alvarado, A., Escobar, R., & Peralta F. (2010). El programa de mejoramiento genético de la palma de aceite de ASD Costa Rica y su contribución a la industria. *ASD Oil Palm Papers,* (34), 17-32. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.34-2009-min.pdf

Arias, F. J., Figueredo, V. P., Mena, E., Owen, E., & Jiménez, O. (1988). *Origen de los progenitores Dura y Pisífera para producción de semilla de palma africana del* ICA. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Bastidas, S. (1991). Sistema de mejoramiento en palma africana en El Mira-Tumaco, Colombia [Documento]. En *XI curso corto: metodología para la producción de semilla comercial de palma aceitera africana* (pp. 19-48). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA); Banco Interamericano de Desarrollo (BID); Programa Cooperativo de Investigación Agrícola para la Subregión Andina (Prociandino). https://repositorio.iica.int/handle/11324/20342

Bastidas, S., Figueredo, P., & Reyes, R. (1993). Obtención de materiales de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) adaptados al trópico latinoamericano. *Palmas* (número especial), 49-56. https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:GFIUEBjfOWsJ:https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/399/399&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2003). Genealogía del germoplasma de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) del proyecto de mejoramiento genético de Corpoica. *Palmas, 24*(1), 21-29.

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2013). Preguntas sobre palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq., palma nolí *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés y los híbridos interespecíficos nolí × palma de aceite (*E. oleifera* × *E. guineensis*). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12614/66171_64853.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bastidas, S., Reyes, R., & Peña, E. (2004). *Ténera Corpoica El Mira, material de palma de aceite colombiano.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/20560/41277_27366.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bayona-Rodríguez, C. J., & Romero, H. M. (2019). Physiolgical and agronomic behavior of commercial cultivars of oil palm (*Elaeis guineensis*) and O×G hybrids (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) at rainy and dry seasons. *Australian Journal of Crop Science* AJCS, *13*(03), 424-432. https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.03.p1354

Breure, C. J. (1987). Selección de progenitores de la palma de aceite con base en el índice de racimos y la productividad en Nueva Bretaña Occidental. *Palmas, 8*(2), 39-40.

Breure, C. J. (1988). *Metodología para el análisis fisicoquímico de racimos: reporte sobre visita a Colombia palma de aceite y palma de coco: consultoría para* ICA. Harrisons Fleming Advisore Services Limited.

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), 1-68.

Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2003). *The oil palm*. Oxford Blackwell Science Ltda. https://doi.org/10.1002/9780470750971

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica]. (1994). *Mejoramiento genético de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en Colombia fase II: proyecto de investigación 1994-2004, por vigencias anuales*.

Cunha, R. N. V. D., Lopes, R., Gomes Júnior, R. A., Lobato Rodrigues, M. R., Teixeira, P. C., Carvalho Da Rocha, R. N., & Alves de Lima, W. A. (2010). Material genético utilizado para a produção sustentável da cultura da palma de óleo na Amazônia. In P. L. De Freitas & P. E. Ferreira da Motta, *Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia* (pp. 93-100). Embrapa Solos. http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2015/01/ABRAPALMA-Tudo-Sobre-Palma.pdf

Dumortier, F. (2004). Mejoramiento de progenies de altos rendimientos en Dami OPRS. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 276-282.

Dumortier, F., & Konimor, J. (1999). Selection and breeding progress in planting material at Dami OPRS, Papua New Guinea. In *Seminar on sourcing of oil palm planting materials for local and overseas joint-ventures* (pp. 142-170). Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).

Falconer, D. S. (1984). *Introducción a la genética cuantitativa* (14.ª ed.). Compañía Editorial Continental S. A.

Forster, B. P., Sitepu, B., Setiawati, U., Kelanaputra, E. S., Nur, F., Rusfiandi, H., Rahmah, S., Ciomas, J., Anwar, Y., Bahri, S., & Caligari, P. D. S. (2017). Oil palm (*Elaeis guineensis*). In *Genetic improvement of tropical crops* (pp. 241-290). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59819-2_8

Hartley, C. W. S. (1969). Oil palm research in Colombia with special reference to selection, breeding seed production and supply [Informe de la visita realizada a las plantaciones de palma de Colombia entre el 23 de mayo y el 11 de junio de 1969]. En *Informes técnicos de 1969* (Tomo I). Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Hartley, C. W. S. (1974). *Oil palm research and development in Colombia* [Informe presentado al Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)].

Hartley, C. W. S. (1988). *The oil palm,* Elaeis guineensis *Jacq.* (3.ª ed.). Longman Group U. K.

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (1972). *Mejoramiento genético de la palma de aceite* (Elaeis guineensis*) en Colombia fase I: proyecto de investigación 1973-1993, por vigencias anuales.*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2004). *Resolución 00961. "Por la cual se ordena el registro en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA, del híbrido de palma de aceite Ténera CORPOICA EL MIRA, para las subregiones naturales Pacífico colombiano y Orinoquía colombiana, con el número de registro PLA-04-3".*

Kushairi, A., Rajanaidu, N., Jalam, B. S., Mohd Rafii, Y., & Mohd Din, A. (2000). Materiales de siembra de palma de aceite del PORIM. *Palmas, 21*(3), 51-63. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/744

Márquez, S. F. (1985). *Genotecnia vegetal: métodos, teoría, resultados* (tomo I). AGT Editor S. A.

Martínez, R., Ochoa, I., & Bastidas, S. (1999). El mejoramiento de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en Colombia: metodología estadística. *Palmas, 20*(2), 9-21. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/696

Molina, G. J. D. (1992). *Introducción a la genética de poblaciones y cuantitativa (algunas implicaciones en genotecnia)* (1.ª Ed.). AGT Editor S. A.

Myint, K. A. (2010). *Viability and vigor of Dura, Pisifera and Ténera oil palm (*Elaeis guineensis *Jacq.) pollen* [Doctoral dissertation, University Putra, Malaysia]. http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/19520/

Ngando-Ebongue, G. F., Ajambang, W. N., Koona, P., Firman, B. L., & Arondel, V. (2012). Oil palm. In S. Gupta, *Technological innovations in major world oil crops* (Vol. 1, pp. 165-200). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0356-2_7

Patiño, V. M. (1948). Información preliminar sobre la palma de aceite africana (*Elaeis guineensis*) en Colombia: Estación Agroforestal del Pacífico, Calima-Buenaventura. *Serie Botánica Aplicada, 1*(2), 1-77.

Rajanaidu, N. (2000). Materiales futuros de siembra para la industria de la palma de aceite. *Palmas, 21*(número especial, tomo II), 291-299. https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:-yRBhakdynwJ:https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/842/842&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co&client=safari

Rajanaidu, N. (2016). Una mirada al mejoramiento genético de la palma de aceite en los últimos cincuenta años: una aventura personal. *Palmas, 37*(número especial, tomo I), 190-202. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11903

Reyes, C. P. (1985). *Fitogenotecnia básica y aplicada* (1.ª ed.). AGT Editor, S. A.

Reyes, P. A., Ochoa, J. C., Montoya, C., Daza, E., Ayala, I. M., & Romero, H. M. (2015). Development and validation of a bi-directional allele-specific PCR tool for differentiation in nurseries of dura, Ténera and Pisifera oil palms. *Agronomía Colombiana, 33*(1), 5-10. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n1.47988

Richardson, D. L. (1995). La historia del mejoramiento genético de la palma aceitera en la compañía United Fruit en América. *ASD Oil Palm Papers,* (11), 1-22. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.11-1995-min.pdf

Rocha, C. R. N. D., Rodrigues, L. M. R., Teixeira, P. C., Lopes, R., Cunha, V. R. N. D., Macedo, V. J. L. D., Morais, R. R. D., & Lima, A. W. A. D. (2010). Manejo sustentável para a cultura da palma de óleo: cobertura do solo e cultivos intercalares. In P. L. De Freitas & P. E. Ferreira da Motta, *Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia* (pp. 127-135). Embrapa Solos. http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2015/01/ABRAPALMA-Tudo-Sobre-Palma.pdf

Rojas, L. A. (1981). Labores de establecimiento y mantenimiento del cultivo. En *La palma africana de aceite* [Temas de orientación agropecuaria n.º 149] (pp. 82-92).

Sambanthamurthi, R., Singh, R., Kadir, A. P. G., Abdullah, M. O., & Kushairi, A. (2009). Opportunities for the oil palm via breeding and biotechnology. In *Breeding plantation tree crops: Tropical species* (pp. 377-421). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_11

Setiawati, U., Sitepu, B., Nur, F., Forster, B. P., & Dery, S. (2018). *Crossing in oil palm: A manual* (Vol. 6). CABI. https://doi.org/10.1079/9781786395917.0000

Soh, A. C. (2012). Breeding and genetics of the oil palm. In *Palm oil* (pp. 31-58). AOCS Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-9818936-9-3.50005-8

Sterling, F., & Alvarado, A. (2002). Historia de las colecciones de germoplasma de palma aceitera de ASD de Costa Rica. ASD *Oil Palm Papers*, (24), 17-23.

Tiessen, A. (2012). *Fundamentos de mejoramiento genético vegetal: conceptos básicos de genética, biología molecular, bioquímica y fisiología vegetal.* Editorial Académica Española.

Vallejo, R. G. (1978). Mejoramiento genético de la palma africana En *Palma africana de aceite* [Manual de Asistencia Técnica n.º 22] (pp. 97-144).

Vallejo, R. G. (1981). Mejoramiento genético. En *La palma africana de aceite* [Temas de orientación agropecuaria n.º 149] (pp. 49-70).



Capítulo 5

Resultados del primer ciclo de hibridación entre palmas de las especies *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés y *Elaeis guineensis* Jacq.

Silvio Bastidas P., Rafael Reyes C., Yesith Montero C.,
Leidy Paola Moreno C., William Tolosa M., Isueh Arenas R., Iván Gutiérrez B.

En este capítulo se describe el SSRm usado en el programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA para las especies *Elaeis guineensis* (G)[1] y *Elaeis oleifera* (O)[2], con énfasis en hibridación interespecífica al final de cada uno de los ciclos. El mejoramiento de la palma americana de aceite *E. oleifera,* también llamada palma nolí (N), y la consecuente producción de híbridos interespecíficos O × G, con su congénere *E. guineensis*, también se lleva a cabo mediante el sistema de selección recurrente[3] modificado (SSRm) (Vallejo 1978, 1981), con el propósito de lograr la introgresión de genes de la especie *E. oleifera* a la especie *E. guineensis* y lograr cultivares con baja tasa de crecimiento, resistentes a enfermedades, entre ellas la pudrición del cogollo (PC), y un aceite rico en ácidos grasos insaturados (Adjé, 2004; Moretzsohn et al., 2002; Smith, 2015).) La colección de trabajo de la especie *E. oleifera,* de primera generación de cruzamiento (F1) (capítulo 2), constituye

1 En este capítulo se utiliza la palabra *guineensis* para referirse a la población de la palma africana de aceite de la especie *Elaeis guineensis* Jacq., igual que el símbolo G.

2 En este capítulo se utiliza la palabra *oleifera* para referirse a la población de la palma americana de aceite (palma nolí) de la especie *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés, igual que el símbolo O.

3 De acuerdo con Meunier y Gascon (1972, citados por Amblard et al., 2000), el sistema de selección recurrente (SSR) fue adoptado por el CIRAD y sus socios, porque explota la complementariedad de los componentes de la producción. El programa de mejoramiento de la palma de aceite *E. guineensis* de Dami, Papua, Nueva Guinea, se basa en el SSR, para aprovechar la habilidad combinatoria general (Dumortier, 2004). De hecho, la mayoría de programas de mejoramiento adoptaron el SSR modificado propuesto por Hardon & Thomas (1968), para el mejoramiento genético de la palma de aceite (Rey, Ayala et al., 2004).

la población *oleifera* del SSRm, mientras que las poblaciones mejoradas Dura y Ténera/Pisífera de la especie *E. guineensis* (capítulo 4) constituyen la población *guineensis*. En este caso, un ciclo de SSRm se cumple con las siguientes actividades: 1) conformación de la población parental *oleifera*; 2) conformación de la población parental *guineensis*; 3) selección de palmas nolí en la población *oleifera*; 4) selección de palmas de los tipos Dura y Pisífera en la población *guineensis*; 5) pruebas de progenies interpoblacionales O × G; 6) pruebas de progenies intrapoblacionales O × O, y 7) pruebas de progenies intrapoblacionales G × G.

Conformación de la población parental *oleifera*

La prospección de 54 palmas nolí de la especie *E. oleifera*, realizada por el IRHO y el ICA, con participación de las empresas palmeras Coldesa (Turbo, Antioquia) e Indupalma (San Alberto, Cesar), inicia un programa de hibridación interespecífica entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis* (IRHO, 1973), como alternativa de respuesta a la PC de la palma africana de aceite, la cual incidió de forma severa, por primera vez en Colombia, en la plantación La Arenosa de Coldesa, en la década del sesenta del siglo pasado (Franqueville, 2001). Esta enfermedad acabó con cerca de 2.800 ha de esta plantación (Rojas, 1972), y en consecuencia, los cultivos de palma africana de aceite dejaron de ser una alternativa agrícola viable en la región del Urabá antioqueño y Chocó. Se puede afirmar que la PC hizo que se desarrollara la generación de los primeros híbridos interespecíficos en el país.

El programa de hibridación interespecífica, ejecutado entre 1973 y 1976, también incluyó una serie de autofecundaciones y cruzamientos intraespecíficos entre algunas palmas nolí seleccionadas en el valle del río Sinú (Cereté, Córdoba), con el propósito de reproducir las mejores combinaciones híbridas del programa de hibridación antes mencionado (IRHO, 1973). Las 54 palmas nolí utilizadas en el plan de cruzamientos intraespecíficos se identificaron con los siguientes códigos:

1. C01N
2. C02N
3. C03N
4. C05N
5. C07N
6. C09N
7. C10N
8. C11N
9. C12N
10. C13N
11. C15N
12. C17N
13. C19N
14. C23N
15. C24N
16. C25N
17. C28N
18. C29N
19. C31N
20. C32N
21. C33N
22. C38N
23. C39N
24. C40N
25. C41N
26. C43N
27. C45N
28. C46N
29. C47N
30. C53N
31. C57N
32. C210N
33. C243N
34. C305N
35. C306N
36. C308N
37. C327N
38. C403N
39. C405N
40. C407N
41. C412N
42. C423N
43. C428N
44. C429N
45. C433N
46. C434N
47. C447N
48. C450N
49. C462N
50. C463N
51. C465N
52. C475N
53. C492N
54. C535N

La selección de las 54 palmas nolí constituye el inicio del proceso de selección en la población *oleifera* del programa de mejoramiento de AGROSAVIA. El plan de cruzamientos intraespecíficos entre algunas palmas, realizado en fincas de agricultores del municipio de Cereté, Córdoba, dejó como resultado un total de 59 progenies nolí × nolí, de las cuales 38 fueron obtenidas por cruzamiento controlado, diez mediante polinización abierta y once por autofecundación (Bastidas et al., 2013).

- Progenies obtenidas mediante cruzamiento controlado:

1. C02N × C40N
2. C03N × C07N
3. C03N × C12N
4. C05N × C23N
5. C09N × C465N
6. C10N × C09N
7. C17N × C05N
8. C17N × C09N
9. C17N × C19N
10. C24N × C19N
11. C28N × C29N
12. C31N × C11N
13. C32N × C412
14. C36N × C13N
15. C39N × C32N
16. C40N × C07N
17. C41N × C23N
18. C41N × C412N
19. C41N × C475N
20. C43N × C405N
21. C45N × C535N
22. C46N × C01N
23. C47N × C11N
24. C53N × C25N
25. C210N × C32N
26. C210N × C46N
27. C243N × C403N
28. C407N × C465N
29. C423N × C305N
30. C423N × C428N
31. C429N × C306N
32. C429N × C462N
33. C433N × C308N
34. C434N × C53N
35. C447N × C40N
36. C450N × C13N
37. C463N × C53N
38. C492N × C306N

- Progenies de libre polinización o polinización abierta:

1. C02N
2. C12N
3. C13N
4. C15N
5. C17N
6. C28N
7. C31N
8. C32N
9. C36N
10. C40N

- Progenies obtenidas por autofecundación:

1. C01N × C01N
2. C09N × C09N
3. C25N × C25N
4. C32N × C32N
5. C33N × C33N
6. C38N × C38N
7. C39N × C39N
8. C40N × C40N
9. C45N × C45N
10. C57N × C57N
11. C403N × C403N

Con la siembra en 1977 de las 59 progenies F1 de nolí en el C. I. El Mira, quedó configurado el SSRm (figura 5.1), el cual, además de propender al mejoramiento genético de las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*, tiene como objetivo primario la producción de híbridos interespecíficos O × G. Las 59 progenies de la población parental *oleifera* de origen americano constituyen la tercera fuente de recursos genéticos del programa de mejoramiento de la palma de aceite[4] de AGROSAVIA.



Figura 5.1. Detalles del sistema de selección recurrente modificado, aplicado al mejoramiento genético de las especies *E. oleifera, E. guineensis* y la producción de híbridos entre palmas de las dos especies en AGROSAVIA.
Fuente: Elaboración propia

4 *Palma de aceite* es uno de los nombres de la palma africana de aceite; también se usa para referirse indistintamente a las especies *E. oleifera* y *E. guineensis* y sus híbridos.

Selección de palmas nolí F1 en la población *oleifera*

En el proceso de selección de palmas de la población *oleifera*, se tuvieron en cuenta variables cuantitativas y cualitativas de caracteres morfo-agronómicos vegetativos y productivos, como: peso promedio/racimo, porcentaje de mesocarpio/fruto, entre otros; registros de producción, de crecimiento y caracterización morfológica.

Tipos de palmas nolí

En la palma nolí de Cereté (Nolí Cereté) se distinguen dos tipos según la pigmentación de la epidermis de los frutos:

1. **Nolí tipo amarillo**: se caracteriza por presentar frutos de color verde en estado inmaduro, los cuales se tornan de color amarillo intenso en plena madurez; en los palmerales naturales del norte de Colombia este tipo de nolí aparece con una frecuencia de 1,4 a 10 % (Hurtado & Ramos; 1970; Vallejo,1976). La selección natural va en contra del tipo amarillo. En la palma nolí de la Amazonía, el tipo amarillo también se presenta en proporción cercana al 2 % (Barcelos, 1986; Moreno & Romero, 2015).
2. **Nolí tipo rojo**: presenta frutos de color amarillo claro antes de la maduración y rojo anaranjado en la madurez; bajo condiciones naturales se encuentra en una proporción de 90 a 98,6 % (Hurtado & Ramos, 1970; Vallejo, 1976). La selección natural ha favorecido la propagación del tipo rojo. En la palma nolí de la Amazonía, el tipo rojo anaranjado se presenta en el 98 % de las palmas (Barcelos, 1986; Moreno & Romero, 2015).

En las palmas Nolí Cereté se presentó una variante alélica que determina inflorescencias múltiples en algunos primordios florales de cierto número de palmas, denominadas “prolíficas” (figura 5.2):

3. **Nolí tipo normal**: por lo general, las palmas nolí consideradas normales en cuanto a emisión de inflorescencias emiten una masculina o femenina por cada hoja de la palma. Si una hoja no emite una inflorescencia, es porque ocurrió un aborto; además, la tasa de emisión de hojas determina el límite superior del número de racimos que una palma puede producir

(Breure, 1996). En una palma normal, el número de inflorescencias siempre será menor que el número de hojas (Bastidas & Hurtado, 1992, 1993).

4. **Nolí tipo prolífico**: las palmas prolíficas emiten dos o más inflorescencias en algunas hojas de la palma. La prolificidad[5] incrementa el número de racimos por palma y en consecuencia la producción. Esta característica se encontró en 24,4 % de las palmas obtenidas por autofecundación, en 11,9 % de las de polinización abierta, y en 2,5 % de las palmas de híbrido interespecífico O × G, lo cual indica grados variables de control genético, según el sistema de polinización y la heredabilidad en palmas nolí. En la especie *E. guineensis* no se reporta esta característica. En las prolíficas, el número de inflorescencias puede ser mayor que el número de hojas (Bastidas & Hurtado, 1992, 1993).



Figura 5.2. Tipo de palma *E. oleifera*. a. Normal; b. Prolífica.
Fotos: Silvio Bastidas Pérez

5 *Prolificidad* es un término usado en fitomejoramiento para designar plantas de maíz con más de dos mazorcas por tallo (Márquez, 1985). En el programa de mejoramiento de la palma de aceite de AGROSAVIA, se adoptó el calificativo *prolífica* para designar toda palma con emisión de dos o más inflorescencias en algunas hojas (Bastidas & Hurtado, 1992).

Criterios de selección de palmas nolí

Una de las ventajas del SSRm es la independencia de los sistemas de selección en cuanto a manejo de cada una de las poblaciones. En la población *oleifera* se aplicó un sistema de selección masal (Márquez, 1985; Reyes, 1985), con base en los siguientes criterios:

Características de selección relacionadas con la acumulación de biomasa

- Diámetro del estípite: del promedio de la progenie.
- Tasa de crecimiento: del promedio de la progenie.
- Emisión de hojas por palma: mayor que el promedio de la progenie.
- Vigor de las bases peciolares y pecíolos: del promedio de la progenie.
- Largo y ancho de los foliolos: mayores que el promedio de la progenie.
- Espacio entre foliolos: menor que el ancho de los foliolos de la progenie.

Características de producción

- Producción de racimos: promedio más una desviación estándar.
- Porcentaje de aceite en racimo: promedio más una desviación estándar.
- Número de racimos: promedio más una desviación estándar.
- Peso promedio por racimo: promedio más una desviación estándar.
- Inflorescencias expuestas: exposición mayor de 50 %.

En este primer ciclo de selección, los criterios con mayor peso fueron los siguientes: producción de racimos (t/ha), tasa de extracción de aceite en racimo (%) y grado de exposición de la inflorescencia (%), además de la resistencia a enfermedades.

Reacción a enfermedades: resistentes a pudrición del cogollo (PC)

Con estos criterios resultaron seleccionadas 150 palmas Nolí Cereté F1, equivalentes a una presión de selección de 6,7 %. El rango del porcentaje de aceite en racimo fue de 6,03 % a 11,85 %; posteriormente se adicionaron 50 palmas a la selección inicial (tabla 5.1).

Tabla 5.1. Características relacionadas con la producción de aceite de quince palmas Nolí Cereté, seleccionadas para generar progenies nolí F1 × nolí F1

Progenie	Nolí F1	PR	FFR	FPR	FTR	PF	CF	AF	AcR
		(kg)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
C429N × C462N	EM5933N	13,5	50,5	14,2	83,0	45,4	41,4	13,2	11,85
C47N × C11N	EM3533N	17,8	53,3	8,0	82,0	47,5	39,6	12,8	11,79
C423N × C428N	EM5901N	11,0	53,1	8,2	80,9	37,8	46,0	16,2	11,64
C17N × C09N	EM3514N	10,0	33,8	21,6	78,0	41,1	47,2	11,7	11,45
C43N × C405N	EM5117N	12,9	42,4	13,1	78,3	45,2	42,7	12,2	10,88
C41N × C412N	EM4310N	16,5	57,5	8,9	86,1	42,8	43,6	13,6	10,84
C492N × C306N	EM5510N	24,2	55,0	16,1	89,7	44,7	41,8	13,6	10,81
C02N (LP)	EM313N	11,1	31,1	13,0	77,5	40,8	47,2	12,0	10,74
C17N × C05N	EM3107N	10,7	36,6	23,8	81,3	41,0	43,1	15,8	10,48
C407N × C468N	EM3430N	9,5	27,7	21,1	76,8	43,4	42,8	13,9	10,44
C492N × C306N	EM5415N	20,1	38,5	21,8	85,1	41,4	44,7	13,9	10,39
C403N × C403N	EM222N	15,5	50,2	9,4	80,6	44,3	44,3	11,5	10,36
C407N × C468N	EM3417N	8,6	47,7	15,9	83,7	39,2	46,3	14,5	10,36
C447N × C403N	EM5432N	13,5	58,6	6,3	82,2	39,4	48,1	12,5	10,27
C39N × C39N	EM1411N	17,2	43,0	19,2	82,0	40,5	48,6	10,9	10,16

PR: peso promedio por racimo; FFR: fruto fértil en racimo; FPR: fruto partenocárpico en racimo; FTR: relación fruto en racimo; PF: pulpa en fruto; CF: cuesco en fruto; AF: almendra en fruto; AcR: aceite en racimo; C: serie Cereté; EM: serie El Mira; N: palma nolí *E. oleifera*; LP: progenie de polinización abierta.

Fuente: Elaboración propia

Pruebas de progenies interpoblacionales *E. oleifera* × *E. guineensis*

En general, los híbridos O×G de diferentes productores, incluidos los de AGROSAVIA, presentan características intermedias de los parentales *E. oleifera* y *E. guineensis*, como tasa de extracción y calidad del aceite en términos de ácidos grasos insaturados y carotenos (Choo et al., 1998; Ramírez, 2004), y vigor híbrido para algunas características, como diámetro del tallo, largo de las hojas o tasa de crecimiento (Escobar et al., 2000; Rey, Gómez et al., 2004). Heredan de la especie *E. oleifera* la resistencia a enfermedades, entre ellas la PC, aunque esta tolerancia no es completa.[6] En campo se presentan niveles variables de incidencia (Alvarado & Henry, 2015), sobre todo dependiendo del progenitor femenino *E. oleifera* (Barba et al., 2010). Otra característica de interés y heredable es la partenocarpia, la cualidad de producir frutos sin fecundación y por lo tanto sin semilla (Hartley, 1988; Miranda et al., 2001). Los híbridos producen aceite altamente insaturado, con ácidos grasos oleico, linoleico y linolénico, y alto porcentaje de almendra en el racimo, de 10 a 12 % (Alvarado & Escobar, 2017), aunque también se presentan algunas características negativas, como baja tasa de extracción de aceite en relación con el cultivar Ténera de *E. guineensis* (Cunha et al., 1999; Rajanaidu, 2016; Tan, 1978).

Como se mencionó antes, la baja densidad de siembra de los híbridos interespecíficos O×G[7] (115 palmas/ha) es un factor limitante para evaluar varias progenies a la vez (Bastidas et al., 2013), por lo que es necesario establecer pruebas en campo de manera permanente con la participación indirecta de palmicultores.

6 En la empresa Palmar del Río, Ecuador, después de once años de evaluación de híbridos O×G provenientes de Embrapa y CIRAD, y cinco años de evaluación de los híbridos Indupalma y Palmar del Río, se determinó que no todos tienen la misma tolerancia a la PC, cuya incidencia acumulada varió de 0 a 81 % (Barba et al., 2010).

7 Es válido referirse al híbrido O×G Corpoica Elmira tanto en singular como en plural; técnicamente es un solo cultivar, un "híbrido compuesto" por semillas (palmas) de diferentes cruzamientos. Las semillas comercializadas y entregadas a palmicultores son una mezcla aleatoria de semillas germinadas de varios cruzamientos, tomadas de entre cientos de posibilidades de 200 madres *E. oleifera* con diez padres E. *guineensis*. La mezcla depende del flujo de semillas germinadas y de las cantidades.

El primer ciclo de SSRm terminó con las pruebas de progenies interpoblacionales *E. oleifera* × *E. guineensis*. El producto tangible de este primer ciclo fue la obtención y el registro del cultivar híbrido O × G Corpoica Elmira, nombre con el cual fue inscrito en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA (2011).

Comportamiento del híbrido interespecífico O × G Corpoica Elmira frente a la enfermedad de la pudrición del cogollo (PC)

Las pruebas de progenies realizadas en el C. I. El Mira y en plantaciones particulares de Tumaco son testimonio de la resistencia del híbrido O × G Corpoica Elmira a la PC. Entre los años 2007 y 2009, cuando la PC alcanzó niveles de incidencia exponenciales en la zona palmera occidental (Hurtado & Rincón, 2009), el híbrido O × G Corpoica Elmira presentó porcentajes de incidencia de 2,5 %. Sin embargo, a partir de 2009 los niveles de incidencia disminuyeron, y algunas palmas enfermas se recuperaron sin tratamiento. En enero de 2007, la incidencia promedio de PC en tres subzonas con cultivos de palma de aceite *E. guineensis* (Mira, Centro y Caunapí), fue de 6,95 %; en febrero de 2008 se presentó un crecimiento exponencial de la incidencia de la enfermedad, con un promedio en las tres subzonas de 55,05 %, lo que superó el umbral de daño económico de las plantaciones.

A nivel comercial, en 130 ha con palmas de 10 y 36 meses de sembradas, el híbrido O × G Corpoica Elmira presentó menos de 1% de incidencia, en palmas con síntomas similares de PC en etapa crítica. La experiencia de las plantaciones de Tumaco con todos los híbridos O × G, incluido el Corpoica Elmira, indica que el periodo de mayor virulencia de la enfermedad (etapa crítica) corresponde a los cuatro o cinco primeros años después de la siembra en campo (Bastidas, 2013), lo cual podría deberse a una selección natural en contra de las palmas híbridas susceptibles a la PC, afines a la especie *E. guineensis*. En trabajos adelantados sobre palinología de híbridos O × G y G × O fue posible constatar segregación a nivel gamético. Se encontró que los gametos masculinos (polen) de los híbridos F1[8] segregan, en su forma,

8 La expresión *híbridos F1* es otra forma de referirse a los híbridos O × G, puesto que constituyen la primera generación de cruzamiento, en este caso, de hibridación interespecífica.

a los dos padres en diferentes proporciones según la dirección del cruzamiento, del siguiente modo: el polen de una palma O × G (madre *oleifera*, padre *guineensis*) presentó 63 % de los granos de forma ovalada, similar a los de la especie *E. oleifera*, y 37 % de forma tetraédrica o piramidal, similar a los de *E. guineensis*; por su parte, el polen de una palma G × O (madre *guineensis*, padre *oleifera*) solo presentó 16 % de los granos de forma ovalada de *E. oleifera*, y 84 % de forma tetraédrica, propia de la especie susceptible *E. guineensis*. Es razonable esperar segregación en los gametos femeninos (óvulos) (Bastidas et al., 2009, 2010). En la empresa Palmar del Río, Ecuador, los híbridos Taisha × Avros y Taisha × La Mé presentaron mayor porcentaje de granos de polen semejantes a los de *E. oleifera*, mientras que en los híbridos Coarí × La Mé, la mayoría fueron semejantes a los de *E. guineensis* (Matilla, 2015). Las formas ovoides y piramidales de los granos de polen de *E. oleifera* y *E. guineensis*, respectivamente, han sido reportadas por varios investigadores (Chávez et al., 2014; Martins et al., 2002).

En evaluaciones en campo sobre la respuesta a la PC de los híbridos G × O, se presentó incidencia de 10,42 %, mayor que en los híbridos O × G, cuyo promedio fue de 2,1 % (Bastidas et al., 2009, 2010).

Los híbridos F1 en las plantas alógamas presentan variación intrafamiliar. Se comportan como una generación segregante para algunas características, notoria en los híbridos O × G. Mediante caracterización molecular por microsatélites (SSR) de 577 palmas de aceite (capítulo 10), de las cuales 20 fueron de *E. guineensis*, 43 de *E. oleifera*, y el resto del híbrido O × G Corpoica Elmira, fue posible observar un nivel de subdivisión considerable en las muestras de este último y conformar seis grupos (Gallego et al., 2012), lo cual permitió formular la siguiente hipótesis, actualmente en proceso de prueba en campo: *los genotipos de algunas palmas del híbrido O × G son más afines a la especie* E. oleifera*, otras a la especie* E. guineensis*, mientras que la mayoría son intermedios de las dos, con afinidad compartida*. Desde 2014 se viene trabajando con esta hipótesis, cuando se establecieron en campo las progenies de ocho cruzamientos del híbrido O × G, discriminadas en etapa de vivero por marcadores moleculares tipo SNP (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, 2018).

En este estudio se analizaron los genotipos de 471 palmas de aceite (62 de *E. oleifera*, 31 de *E. guineensis* y 378 del híbrido O × G Corpoica Elmira). Se detectaron un total de 3.776 polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) en los 16 pares de cromosomas, mediante la técnica de genotipado por secuenciación (GBS). Los análisis de estructura genética agruparon las palmas en dos grupos de acuerdo con su relación parental. Se realizó un análisis de asociación de genoma (GWAS) con la población híbrida O × G, y el resultado fueron doce SNP significativamente asociados con diez rasgos morfológicos y de producción (Osorio-Guarín et al., 2019). Desde 2014 hasta octubre de 2019, la incidencia de PC se redujo de manera considerable, pues solo cinco palmas de 378 en evaluación presentaron síntomas similares a la enfermedad, lo que equivale a una incidencia de 1,3 % (AGROSAVIA, 2018). Por ahora, el reducido número de palmas enfermas impide asociar la PC a un determinado genotipo del híbrido.

Comportamiento agronómico del híbrido O × G Corpoica Elmira en pruebas de evaluación agronómica

El cultivar híbrido O × G Corpoica Elmira es un "híbrido compuesto", algo similar a una variedad compuesta,[9] como las variedades de café Colombia (Castillo & Moreno, 1988) y Castillo (Alvarado et al., 2005). El O × G Corpoica Elmira está conformado por semillas de diferentes progenies o cruzamientos entre palmas seleccionadas de las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*. En este sentido, las semillas comerciales del híbrido Corpoica Elmira son una mezcla aleatoria de semillas germinadas de varios cruzamientos, tomadas entre cientos de posibilidades de 200 madres *E. oleifera* tipo Cereté y diez padres *E. guineensis* de los tipos Deli y Yangambi. La mezcla depende del flujo de semillas germinadas y de las cantidades de cada uno de los cruzamientos aportantes y no llega a constituir una mezcla balanceada. Por esta razón, en cada prueba de evaluación agronómica (PEA) es necesario confirmar la homogeneidad de los cruzamientos en cuanto a características de producción. Dicho de otra forma, se debe certificar que las semillas entregadas a los palmicultores sean homogéneas en cuanto a producción.

9 El concepto de *variedad compuesta* en el cultivo de café significa que es una variedad constituida por diferentes progenies, y por eso tiene diversos mecanismos de resistencia frente a la roya del cafeto (Flórez et al., 2016).

Prueba de homogeneidad de los diferentes cruzamientos del híbrido O × G Corpoica Elmira

En las PEA, en seis localidades, se evaluaron 48 cruzamientos del híbrido O × G Corpoica Elmira, ocho cruzamientos por localidad, con una aclaración importante, solo se reclamará registro o la ampliación de este en la localidad, región o zona palmera donde el híbrido demuestre buen comportamiento agronómico y productivo, con especial énfasis en su comportamiento frente a enfermedades como la PC.

En 2019, de las seis PEA, solo en la del C. I. Caribia, zona palmera norte, subregión Caribe seco, se realizó la solicitud anticipada de ampliación de registro. Las siguientes son las razones para la ampliación del registro en la zona palmera norte: alta incidencia de la PC en los cultivos de *E. guineensis*, con tendencia a volverse de tipo exponencial. El híbrido O × G Corpoica Elmira presentó resistencia a la enfermedad en esta zona y alto rendimiento en cuanto a RFF y aceite/ha/año; además, fue precoz en producción.

A continuación, se exponen los avances de la PEA en el C. I. Caribia, con referencia a la PEA en el C. I. El Mira, zona palmera occidental[10], para la cual se cuenta con Registro ICA PLA-11-04, según Resolución 1446 de 2011 y ampliación del registro como cultivar para el Caribe seco, Resolución ICA 00015591 de octubre de 2019 (ICA, 2011, 2019).

El C. I. Caribia está situado en el municipio de Zona Bananera, Magdalena, a una altitud de 30 m s. n. m., con una temperatura media de 27 °C, precipitación de 1.300 mm/año, y 83 % de humedad relativa. La PEA se estableció en un lote con predominio de suelos franco-arenosos. Por su parte, el C. I. El Mira se ubica en el municipio de Tumaco, Nariño, a una altitud de 16 m s. n. m., con una temperatura media de 26 °C; precipitación de 3.000 mm/año, y 88 % de humedad relativa. La PEA se estableció en un lote con predominio de suelos franco-arcillosos.

El material vegetal utilizado en la PEA corresponde al cultivar híbrido O × G Corpoica Elmira, del cual se utilizan ocho cruzamientos *E. oleifera* × *E. guineensis* (O × G) en cada centro de investigación. En el C. I. El Mira fueron sembradas

10 La PEA del C. I. El Mira oficia como testigo para el resto de las PEA.

el 26 de junio de 2014 y en el C. I. Caribia el 20 de agosto de 2014, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones de 16 palmas cada una. La siembra en campo se realizó en triángulo a 10 m de distancia entre palmas, para una densidad de 115 palmas/ha.

Las ocho progenies del híbrido O × G Corpoica Elmira pasaron por una etapa de vivero de doce meses, al cabo de los cuales se trasplantaron en sitio definitivo. Iniciaron floración precoz a partir de los 15 a 18 meses después de su siembra en campo, pero la productiva se presentó entre los 28 y 30 meses, y las primeras cosechas se obtuvieron entre los 34 y 36 meses después de la siembra en campo. La valoración se está realizando con base en cinco años de registros de cosecha y por análisis de los componentes de producción de aceite (Breure, 1988). Los cinco años de registro garantizan un estimado preciso de repetibilidad de la producción,[11] entendida como la correlación entre mediciones sucesivas de la producción en la misma planta (Falconer, 1984; Molina, 1992; Vencovsky, 1972). A continuación, se expone un avance del comportamiento productivo en PEA, con base en dos años de producción.

En el C. I. Caribia, los ocho cruzamientos del híbrido O × G Corpoica Elmira iniciaron con una producción de 9,81 toneladas de RFF/ha/año; durante el segundo año de producción, presentaron un promedio de 24,60 toneladas de RFF/ha/año; la variación entre cruzamientos fue de 22,2 a 27,3 toneladas de RFF/ha/año (tabla 5.2). El incremento en el patrón de producción con respecto al primer año fue de 150,8 %, lo que superó ampliamente la producción esperada.

11 El coeficiente de repetibilidad es utilizado en mejoramiento genético como límite superior de la heredabilidad y como criterio para evaluar la eficacia del proceso selectivo (Ortega Cedillo et al., 2008).

Tabla 5.2. Potencial de producción de racimos de fruta fresca (RFF) de ocho cruzamientos del híbrido O × G Corpoica Elmira en PEA, C. I. Caribia, Zona Bananera, Magdalena

Cruzamientos O × G del híbrido Corpoica Elmira	Primer año de producción			Segundo año de producción		
	Número de racimos (palma/año)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de RFF (t/ha)	Número de racimos (palma/año)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de RFF (t/ha)
1	13	6,57	9,07	22	9,97	25,34
2	10	6,71	7,81	20	8,99	22,22
3	11	7,53	10,00	20	10,63	25,44
4	14	7,32	11,68	23	9,97	27,29
5	13	6,53	9,76	22	9,01	24,55
6	13	6,55	10,06	21	9,30	22,81
7	12	6,77	9,07	22	10,24	25,16
8	13	6,79	11,08	22	9,34	24,00
Promedio	**12**	**6,85**	**9,81**	**22**	**9,68**	**24,60**

Fuente: Elaboración propia

En el C. I. El Mira, ocho cruzamientos en evaluación presentaron una producción de 7,42 toneladas de RFF/ha/año durante el primer año; durante el segundo, tuvieron un promedio de 21,26 toneladas de RFF/ha/año, con una variación de 19,47 a 22,61 toneladas (tabla 5.3). En la PEA del C. I. El Mira, el incremento en la producción de RFF entre el primer y segundo año de producción fue de 186,5 %.

Tabla 5.3. Potencial de producción de racimos de fruta fresca (RFF) de ocho cruzamientos del híbrido O × G Corpoica Elmira en PEA, C. I. El Mira, Tumaco, Nariño

Cruzamientos O × G del híbrido Corpoica Elmira	Primer año de producción			Segundo año de producción		
	Número de racimos (palma/año)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de RFF (t/ha)	Número de racimos (palma/año)	Peso promedio por racimo (kg)	Producción de RFF (t/ha)
1	11	5,96	7,55	21	8,04	19,47
2	10	6,39	7,06	23	8,45	22,47
3	11	5,91	7,28	21	8,64	21,43
4	11	5,78	7,20	22	8,37	21,17
5	11	5,85	7,53	21	8,51	20,77
6	12	6,19	8,55	23	8,22	21,79
7	13	5,47	8,34	23	8,35	22,61
8	9	5,84	5,81	22	7,93	20,34
Promedio	**11**	**5,92**	**7,42**	**22**	**8,32**	**21,26**

Fuente: Elaboración propia

En los dos centros de investigación, Caribia y El Mira (figura 5.3), los ocho cruzamientos O × G se comportaron, con validez estadística, de manera similar en cuanto a producción de RFF, lo que demuestra que el híbrido O × G Corpoica Elmira está conformado por cruzamientos similares, homogéneos, en cuanto a producción; es un cultivar "compuesto" por palmas de diferentes cruzamientos con igual comportamiento productivo.

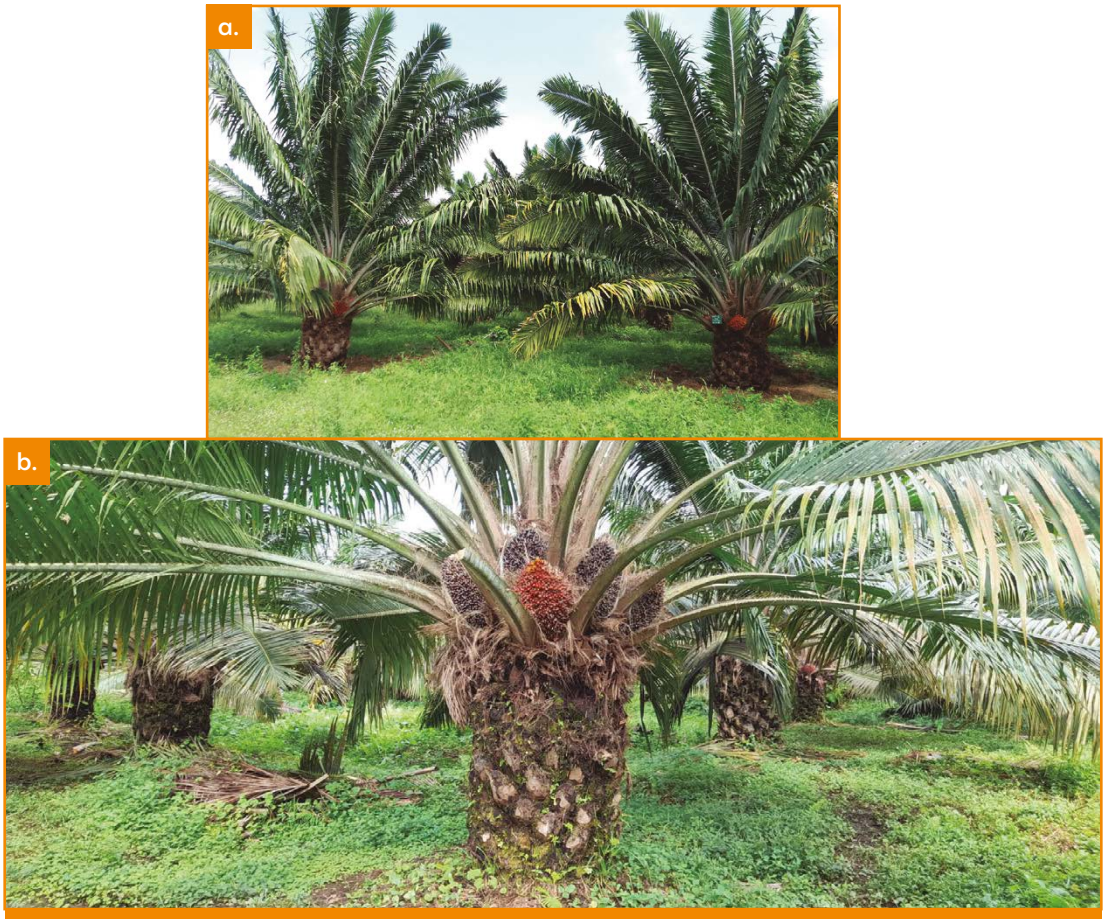


Figura 5.3. Parcela de híbrido O × G Corpoica Elmira. a. C. I. Caribia, Zona Bananera; b. C. I. El Mira, Tumaco.
Fotos: Yesith Montero, William Tolosa

El potencial de producción de aceite del híbrido O × G Corpoica Elmira es promisorio, pero se deben considerar las particularidades de cada zona palmera (tabla 5.4). Está demostrado que en la zona norte hay alta productividad de RFF y aceite, sin el uso de polinización asistida, porque en el ambiente aún existe polen de los cultivos de la especie *E. guineensis*, mientras que en la zona palmera occidental, el híbrido O × G Corpoica Elmira responde positivamente a polinización asistida, y a la aplicación del regulador de crecimiento ácido naftalenacético (ANA) y de la escala del punto óptimo de cosecha (Bastidas et al., 2011; Caicedo et al., 2018; Hormaza et al., 2012; Millán et al., 2017; Rincón et al., 2013; Sinisterra et al., 2019).

Tabla 5.4. Potencial de producción de aceite del híbrido O × G Corpoica Elmira en los C. I. El Mira, Tumaco (Nariño), y Caribia, Zona Bananera (Magdalena)

Lote o parcela experimental	Producción de RFF (t/ha)	Aceite en racimo (%)	Producción de aceite (t/ha)	Observación
PEA C. I. Caribia (5 años DS)	24,60	19,82	4,88	Sin polinización asistida, con polen en ambiente (cultivos de *E. guineensis*).
PEA C. I. El Mira (5 años DS)	21,3	23,9[a]	5,09	Sin polinización asistida y sin polen de *E. guineensis* en ambiente, cosecha 180 días después de antesis, ciclos de 21 días[b].
Lote comercial C. I. El Mira (9-10 años DS)	27,75	17,28[c]	4,80	Con polinización asistida, criterio de cosecha de diez frutos despendidos y de ciclos de 21 días[c], y aplicación de buenas prácticas agrícolas.
Lote comercial C. I. El Mira (9-10 años DS)	27,51	20,23[b]	5,57	Con polinización asistida, cosecha con más de 25 frutos desprendidos y ciclos de 21 días; estadio de madurez de 807 a 809 según escala fenológica de punto óptimo de cosecha[c] y aplicación de buenas prácticas agrícolas.
Lote comercial C. I. El Mira (9-10 años DS)	25,08	26,24	6,60	Con aplicación de ANA, cosecha con más de 25 frutos desprendidos, estadio de madurez de 807 a 809 según escala fenológica de punto óptimo de cosecha[c] y aplicación de buenas prácticas agrícolas.

DS: después de siembra.
Fuente: Elaborado por autor adaptado de [a] Preciado et al., (2011); Bastidas et al., 2011; [b] Sinisterra et al. (2019); [c] Hormaza & Romero (2012), Rincón et al. (2013), Millán et al. (2017)

En la zona norte, el híbrido O × G Corpoica Elmira presentó un rendimiento estimado de aceite de 4,88 t/ha/año, gracias a su elevada producción de RFF con alto porcentaje de frutos partenocárpicos, y a la existencia de polen de palma de aceite en el medio ambiente. En la zona palmera occidental, sin polinización asistida, los resultados de investigación son promisorios: en laboratorio se obtuvo una tasa de extracción de 23,9 %, para una producción potencial de aceite de 5,09 t/ha/año. Contrario a la zona norte, en el área palmera de Tumaco no existe polen de la especie *E. guineensis* en el ambiente, por lo tanto, la producción de aceite se sustenta en su alta producción de RFF (tabla 5.4) con alto porcentaje de frutos partenocárpicos, frutos sin semilla, pero mayor porcentaje de mesocarpio con aceite.

El potencial de extracción de aceite en laboratorio es mayor que la tasa de extracción de aceite industrial (TEA) en planta extractora, debido a dificultades de prensado, retención de aceite por las fibras del mesocarpio, y pérdidas en los diferentes pasos del proceso de extracción, por lo cual se espera en planta extractora una TEA de 17 a 20 %.

En la zona palmera occidental, el rendimiento promedio durante 2018 de los híbridos O × G de diferentes productores, entre ellos AGROSAVIA, con base en 17.279 ha en producción, fue de 2,21 toneladas de aceite/ha/año, mientras que el rendimiento promedio nacional de *E. guineensis* con base en 464.666 ha en producción (incluidos los híbridos de la zona occidental) fue de 3,51 toneladas de aceite/ha/año (Fedepalma, 2019). Estas cifras demuestran la precocidad de la producción y la productividad del híbrido O × G Corpoica Elmira en las zonas palmeras norte y occidental del país.

En el C. I. El Mira, a nivel comercial, el híbrido OxG Corpoica Elmira presenta buen comportamiento productivo; entre el sexto y séptimo año de producción (noveno y décimo después de siembra) con polinización asistida, y con aplicación de ANA, se obtuvieron 5,57 y 6,60 toneladas de aceite/ha, respectivamente. Estas producciones se logran al ajustar el criterio de cosecha a más de 25 frutos desprendidos y al aplicar la escala fenológica del punto óptimo de cosecha (Sinisterra et al., 2019) (tabla 5.4). La sobreproducción por efecto de la aplicación de cualquiera de estas tecnologías, polinización asistida o ANA, hace que sea positiva la relación costo-beneficio. Bajo estas condiciones, el cultivo del híbrido O × G Corpoica Elmira es una alternativa viable en regiones con alta incidencia de PC y para la renovación de cultivos viejos e improductivos de la especie *E. guineensis*.

Un paralelo del comportamiento del híbrido O × G Corpoica Elmira en PEA, en los C. I. Caribia y El Mira, indica superioridad en el C. I. Caribia con respecto a la producción de RFF/ha/año, tanto en el primero como en el segundo año de producción. Este comportamiento obedece a una respuesta positiva del híbrido O × G a un mejor ambiente, bien por características agroclimáticas, bien por aplicación de mejores prácticas de manejo agronómico, incluido riego, lo cual es indicio de respuesta directa por parte del híbrido al manejo agronómico suministrado.

El híbrido O × G Corpoica Elmira produce igual cantidad de racimos/palma/año en Caribia y El Mira durante el segundo año de cosecha. En cambio, en el C. I. Caribia produce racimos más pesados (9,7 kg/racimo) que en el C. I. El Mira (8,3 kg/racimo) (tablas 5.2, 5.3).

Estos resultados demuestran que el número de racimos/palma/año (NRP) presenta mayor coeficiente de heredabilidad que el peso promedio del racimo (PPR), el cual fue influenciado por el ambiente (Bastidas et al., 2013; Dumortier, 2004). La disponibilidad de agua y la fertilización balanceada contribuyen a incrementar el peso de los racimos.

La producción de RFF/ha es el resultado del NRP, del PPR, y del número de palmas productivas (en ciclo femenino) por hectárea, por lo tanto, la producción de RFF/ha es una característica altamente influenciada por el ambiente. Fallas en la disponibilidad de agua, y la aplicación de un plan de fertilización inadecuado, causan cambio del ciclo de floración femenina hacia floración masculina; por lo tanto, ocurrirá disminución en el NRP y como consecuencia reducción en la producción de RFF/ha.

A continuación, se presentan algunas cualidades particulares del híbrido O × G Corpoica Elmira (figura 5.4) (Bastidas et al., 2020):

Tolerante a la pudrición del cogollo: A nivel comercial, menos de 1% de incidencia de PC. Inscrito en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA como resistente a PC (ICA, 2011). Hasta la fecha, la tolerancia se mantiene.



Figura 5.4. Precocidad de floración y fructificación, cultivar O × G Corpoica Elmira.
Fotos: Leidy Paola Moreno

Precoz en floración y fructificación: Las primeras floraciones productivas se presentan a partir de los 28 a 30 meses. En consecuencia, las primeras cosechas se realizan entre los 34 y 36 meses después de siembra (DS).

Floración normal: Emiten inflorescencias femeninas y masculinas normales desde la primera floración. No presentan floración andrógina en etapa de producción; en esta cualidad radica su precocidad.

Produce inflorescencias expuestas:[12] Las palmas del híbrido O × G Corpoica Elmira emiten inflorescencias descubiertas en dos terceras partes de su longitud. Esta cualidad facilita la polinización (natural, asistida o artificial), y por lo tanto la formación de racimos, también descubiertos hasta en dos terceras partes de su longitud.

Produce RFF con frutos partenocárpicos: Las palmas del híbrido O × G Corpoica Elmira producen racimos con más de 70 % de frutos partenocárpicos[13] (frutos sin semilla), los cuales representan entre 35 y 55 % del peso del racimo, mientras que los frutos con semilla aportan entre 15 y 20 % del peso. La ventaja de los frutos sin semilla[14] con respecto a los que sí la tienen está en el mayor porcentaje, hasta 98 %, de pulpa con aceite (Ceballos et al., 2017).

Responde favorablemente a la polinización artificial: Cuando se realiza polinización asistida[15], la proporción de frutos con semilla es mayor de 50 %, lo que genera un incremento de 30 a 50 % del peso de los racimos; como consecuencia, también aumenta la cantidad de aceite por racimo.

12 Por lo general, las inflorescencias de los híbridos O × G permanecen cubiertas de fibras desde su emisión hasta la madurez del racimo, lo cual dificulta la polinización, la cosecha y el procesamiento en la planta de beneficio (Torres et al., 2004).

13 En la empresa Guaicaramo (Barranca de Upía, Meta), encontraron que los híbridos O × G producen racimos de 30 a 80 % de frutos partenocárpicos, los cuales aportan entre 47 y 58 % de aceite en pulpa fresca (Torres et al., 2004).

14 Los frutos partenocárpicos presentan mayor heredabilidad en sentido amplio que los fértiles (Mendoza, 2015).

15 La polinización asistida en el híbrido interespecífico O × G mejora la conformación de racimos y frutos, por lo tanto, la cantidad de aceite (Quintero, 2016).

Eficiente en la captación de luz: Emite hojas con foliolos anchos y largos, insertados en el raquis de la hoja a corta distancia entre sí, para capturar mayor cantidad de radiación solar. Esta característica es un signo de adaptación a condiciones de baja luminosidad presentes en la zona palmera de Tumaco, donde el promedio de brillo solar es de 1.008 horas/año, muy por debajo del promedio de las otras zonas palmeras. Por ejemplo, en San Alberto (Cesar), zona central, el brillo solar es de 2.298 horas/año, y en Aracataca (Magdalena), zona norte, es de 2.435 horas/año (Motta et al., 2004).

Referencias

Adjé, I. (2004). Producción de semilla mejorada de *Elaeis guineensis* por Cra PP Pobé en Benín. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 326-329.

Alvarado, A., & Escobar, R. (2017). Mejoramiento genético de la palma aceitera y producción de semillas en ASD Costa Rica. ASD *Oil Palm Papers,* (47), 2-18. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD_OIL_PALM_PAPERS-47-min.pdf

Alvarado A, & Henry J. (2015). Comportamiento agronómico del híbrido O×G Amazon. *Oil Palm Papers,* (44), 1-8.

Alvarado, G., Posada-Suárez, H. E., & Cortina, H. A. (2005). Castillo: nueva variedad de café con resistencia a la roya. *Avances Técnicos Cenicafé, 337,* 1-8. https://doi.org/10.38141/10779/0337

Amblard, P., Berthaud, A., & Durand-Gasselin, T. (2000). Las semillas de palma de aceite comercializadas por el CIRAD, presente y futuro. *Palmas, 21*(número especial, tomo II), 300-308.

Amblard, P., Billotte, N., Cochard, B., Durand, T., Jacquemard, C. J., Louise, C., Novy, B., & Potier, F. (2004). El mejoramiento de la palma de aceite *E. guineensis* y *E. oleifera* por el CIRAD-CP. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 306-310.

Barba, J., Orellana, F., Vallejo, G., & Manzano, R. (2010). Evaluación agronómica de híbridos interespecíficos de palma de aceite O×G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) provenientes de diversos orígenes americanos y su tolerancia a la pudrición del cogollo. *Palma,* (4), 11-15.

Barcelos, E. (1986). *Características genético-ecológicas de populações naturais de caiaué* (Elaeis oleifera *[H. B. K.] Cortés) na Amazônia brasileira* [Dissertação mestrado]. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil.

Bastidas, S. (2013). Híbrido O×G Corpoica Elmira de palma de aceite: avances en el desarrollo de materiales genéticos resistentes a la PC. *Palmas, 34*(2), 135-141.

Bastidas, S., Betancourth, C., Preciado, C. A., Peña, E., & Reyes, R. (2011). Predicción y control de la cosecha en el híbrido inerespecífico *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineenses* en la zona palmera occidental de Colombia. II. Determinación del ciclo de cosecha para obtener racimos con alto contenido de aceite. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 12*(1), 13-20. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num1_art:211

Bastidas, S., & Hurtado, L. (1992). Palmas prolíficas en la especie *Elaeis oleifera,* una mutación afortunada. *Palmas, 13*(3), 55-60. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/352

Bastidas, S., & Hurtado, L. (1993). Evaluación de palmas prolíficas en la especie *Elaeis oleifera* e híbridos interespecíficos *E. oleifera* × *E. guineensis*. *Palmas, 14*(4), 55-60.

Bastidas, S., Peña, R. E., & Reyes, C. R. (2013). *Preguntas sobre palma de aceite* Elaeis guineensis *Jacq., palma nolí* Elaeis oleifera *(Kunth) Cortés y los híbridos interespecíficos nolí × palma de aceite (*E. oleifera × E. guineensis*)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/12614

Bastidas, P. S., Peña, R. E., Reyes, C. R., Medina, C. C., Villa, T. A., & Tolosa, M. W. (2009). Avances sobre pruebas agronómicas para comprobar la tolerancia y productividad de los híbridos *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* al disturbio pudrición del cogollo en la zona palmera occidental de Colombia. En II *Seminario Experiencias en la Inversión en Ciencia y Tecnología para el Sector Agropecuario Colombiano.* http://hdl.handle.net/20.500.12324/19921

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Medina, C., Villa, A., & Tolosa, W. (2010). Pruebas agronómicas para certificar la tolerancia de los híbridos O×G a pudrición del cogollo: fase I (resumen ejecutivo). En *Ciencia y tecnología para la competitividad del sector agropecuario 2002-2010* (pp. 158-159). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR).

Bastidas, S., Reyes, R., Tolosa, W. T., Gutiérrrez, I. G., Arenas, I. A., & Moreno, L. P. (2020). *HÍbrido interespecífico O x G Corpoica Elmira de palma de aceite. Una alternativa de producción para zonas afectadas por pudrición del cogollo*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Breure, C. J. (1988). *Metodología para el análisis fisicoquímico de racimos: reporte sobre visita a Colombia palma de aceite y palma de coco: consultoría para* ICA. Harrisons Fleming Advisore Services Limited.

Breure, C. J. (1996). Desarrollo de las hojas en la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) y determinación de la tasa de apertura de las hojas. *Palmas, 17*(4), 45-49. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/563

Caicedo, A., Urrego, N. F., Ruiz, R., & Romero, H. M. (2018). *Punto óptimo de cosecha en los híbridos Cereté × Deli y Manaos × Compacta* [Póster]. XIX Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite, Cenipalma-Fedepalma, Cartagena, Colombia. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.21202.58565

Castillo, J., & Moreno, L. G. (1988). *La variedad Colombia: selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del cafeto*. Centro Nacional de Investigación de Café (Cenicafé). https://doi.org/10.38141/cenbook-0023

Ceballos, D., Castilla, C., Bastidas, S., & Reyes, R. (2017). *Resultados de investigación y desarrollo del híbrido O × G Elmira 2015-2017* [Póster]. XIV Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite, Cenipalma-Fedepalma, Bogotá, Colombia.

Chávez, B. G. A., Rubio, J. D., Socha, J. A., Fandiño, T. A., Cayón, G., & Giraldo, J. F. (2014). *Evaluación del porcentaje de germinabilidad y determinación de diferentes dosis de polen en inflorescencias de híbridos (*Elaeis oleifera *H. B. K. Cortés ×* E. guineensis *Jacq.)*. XII Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite, Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia, Intensificación y adaptación al cambio climático, 30 de septiembre-2 de octubre, Bogotá, Colombia.

Choo, Y. M., Ma, A. N., & Yap, S. C. (1998). Carotenos, vitamina E y esteroles en aceites de *Elaeis guineensis*, *Elaeis oleifera* y sus híbridos. *Palmas, 19*(2), 79-85.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. (2018). *Proyecto 377. Pruebas de evaluación agronómica para dos cultivares híbridos de palma de aceite en cuatro zonas palmeras del país y estudios de asociación genética como base para futuros procesos de selección: marzo/2013-diciembre/2017* [Informe técnico final de proyecto].

Cunha, R. N. V. D., Barcelos, E., Rodrigues, M. D. R. L., & Nouy, B. (1999). Melhoramento genético do dendezeiro visando à obtenção de materiais melhorados, adaptados às condições locais, pela utilização de germoplasma de caiaué (*Elaeis oleifera*). *Pesquisa em Andamento,* (10), 1-4.

Dumortier, F. (2004). Mejoramiento de progenies de altos rendimientos en Dami OPRS. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 276-282.

Escobar, R., Sterling, F., & Peralta, F. (2000). Nuevos materiales comerciales de semilla de palma de aceite de ASD. *Palmas, 21*(número especial, tomo II), 280-290. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/841

Falconer, D. S. (1984). *Introducción a la genética cuantitativa* (14.ª Ed.). Compañía Editorial Continental S. A.

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [Fedepalma]. (2019). *Minianuario estadístico 2019: principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia.* http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107696

Flórez, C. P., Maldonado, C. E., Cortina, H. A., Moncada, M. P., Montoya, E. C., Ibarra, L. N., Unigarro, C. A., Rendón, J. R., & Duque Orrego, H. (2016). Cenicafé 1: nueva variedad de porte bajo altamente productiva resistente a la roya y al CBD con mayor calidad física del grano. *Avances Técnicos Cenicafé,* (469). https://doi.org/10.38141/10779/0469

Franqueville, H. D. (2001). *La pudrición del cogollo de la palma aceitera en América Latina: revisión preliminar de los hechos y logros alcanzados*. Departamento de Cultivos Perennes (CIRAD). http://www.buecke.com.br/public/upload/arquivo/buecke/La%20pudricion%20del%20cogollo%20de%20la%20palma%20aceitera%20en%20America%20Latina-02c2d.pdf

Gallego, G., Barrero, L. S., Suárez, H., Bastidas, S., & Hernández, E. G. (2012). *Aplicación de herramientas biotecnológicas para potenciar el desarrollo regional: parentales e híbridos O×G de palma de aceite caracterizados molecularmente (SSRs)* [Documento interno, informe final, Convenio 072 de 2011]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica); Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT]; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR].

Hardon, J. J., & Thomas, L. R. (1968). Breeding and selection of the oil palm in Malaya. *Cambia Revista Oleagineux*, (23), 85-90.

Hartley, C. (1988). *The oil palm* (3.ª Ed.). Longman Group.

Hormaza, M. P. A., & Romero, A. H. M. (2012). Escala BBCH para la descripción del desarrollo reproductivo del híbrido O × G. En *Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite* (pp. 105-120). Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).

Hurtado, J. R., & Ramos, G. (1970). Estudio de la palmera nolí (*Elaeis melanococca* Gaert.) y preliminares de su fitomejoramiento en Colombia. *Acta Agronómica,* 20(1-2), 9-23. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/48869

Hurtado, R., & Rincón, V. (2009). La geomática como instrumento para modelar y hacer seguimiento a la pudrición del cogollo (PC) y al insecto plaga *Rhynchophorus palmarum*: zona occidental, Tumaco (Colombia). *Palmas, 30*(3), 21-35.

Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux [IRHO]. (1973). *Híbrido interespecífico* Elaeis melanoccoca × Elaeis guineensis*, intercambio internacional.*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2008). *Resolución 01720. "Por la cual se establecen las normas para el Registro y Seguimiento Agronómico de cultivares de palma de aceite* Elaeis guineensis *D × P (Ténera) e híbrido interespecífico (*Elaeis oleifera × Elaeis guineensis*), para la comercialización de semillas y clones en el territorio colombiano".* https://www.ica.gov.co/getattachment/682ca5bb-3a6f-45ad-a9db-088618f5f54b/2008R1720.aspx

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2011). *Resolución 001446. "Por la cual se ordena el registro del híbrido interespecífico de palma de aceite O × G CORPOICA ELMIRA en el Registro Nacional de cultivares Comerciales del ICA para la subregión natural Pacífico Colombiano, con el número de registro PLA-11-04".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2019). *Resolución 0015591. "Por el cual se amplía el registro del híbrido interespecífico de palma de aceite O x G Corpoica ElMira en el Registro Nacional de cultivares Comerciales del ICA para la subregión natural Caribe Seco".*

Mantilla, V. E. P. (2015). *Evaluación de viabilidad y compatibilidad de polen de distintos materiales híbridos de palma aceitera (Eo × Eg)* [Trabajo de grado]. Universidad de las Américas, Quito, Ecuador.

Márquez, S. F. (1985). *Genotecnia vegetal: métodos, teoría, resultados* [Tomo I]. AGT Editor S. A.

Martins, L. E. P., Miranda, I. P. A., & Nunes, C. D. (2002). Morfologia polínica de populações amazônicas de *Elaeis oleifera*. *Acta Amazônica, 33*(2), 159-166. https://doi.org/10.1590/1809-4392200332166

Mendoza, C. L. J. (2015). *Estimación de componentes de varianza y heredabilidad en sentido amplio para la producción de fruta y aceite en cruzamientos O×G (*Elaeis oleifera *[H. B. K.] Cortés ×* Elaeis guineensis *Jacq.).* [Trabajo de grado]. Universidad Tecnológica Equinoccial, Santo Domingo, Ecuador.

Millán, E., Ruiz, R., & Romero, H. (2017). *Criterios de cosecha en cultivares híbridos: características que evalúan el punto óptimo de cosecha en palma de aceite: guía de bolsillo.* Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma). http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107649

Miranda, I. P. A., Rabelo, A., Bueno, C. R., Barbosa, E. M., & Ribeiro, M. N. S. (2001). *Frutos de palmeiras da Amazônia.* Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. (MCT INPA).

Molina, G. J. D. (1992). *Introducción a la genética de poblaciones y cuantitativa (algunas implicaciones en genotecnia)* (1.ª Ed.). AGT Editor S. A.

Moreno, L. P., & Romero, H. M. (2015). Phenology of the reproductive development of *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés. *Agronomía Colombiana, 33*(1), 36-42. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n1.47199

Moretzsohn, M. C., Ferreira, M. A., Amaral, Z. P. S., Coelho, P. J. A., Grattapaglia, D., & Ferreira, M. E. (2002). Genetic diversity of Brazilian oil palm (*Elaeis oleifera* H. B. K.) germplasm collected in the Amazon forest. *Euphytica, 124,* 35-45. https://doi.org/10.1023/A:1015606304653

Motta, D. F., Arias, N. A., Munévar, F., Aldana, J. A., Rairán, N., & Córdoba, H. (2004). Relación entre la nutrición del cultivo y la incidencia de pestalotiopsis de la palma de aceite en las zonas norte y central de Colombia. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 179-185.

Ortega Cedillo, D. S., Barros, W. S., Ferreira, F. M., Dos Santos Dias, L. A., Rocha, R. B., & Cruz, C. D. (2008). Correlation and repeatability in progenies of african oil palm. *Acta Scientiarum. Agronomy, 30*(2), 197-201.

Osorio-Guarín, J., Garzón-Martínez, G., Delgadillo-Durán, P., Bastidas, S., Moreno, L., Enciso-Rodríguez, F., Cornejo, O., & Barrero, L. S. (2019). *Identification of candidate genes responsible for morphological and yield-related traits via genome-wide association analysis (GWAS) in oil palm* (Elaeis guineensis × E. oleifera). https://doi.org/10.21203/rs.2.13122/v1

Preciado, C. A., Bastidas, S., García, C. B., Peña, E., & Reyes, R. (2011). Predicción y control de la cosecha en el híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* en la zona palmera occidental de Colombia II Determinación del periodo de madurez para obtener racimos con alto contenido de aceite. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 12*(1), 5-12. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num1_art:210

Quintero, J. S. (2016). *Polinización asistida mediante interacción método, dosis y fuente de polen, en híbrido interespecífico O×G* (Elaeis oleifera × Elaeis guineensis) [Tesis de grado, Universidad de Guayaquil, Ecuador]. http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/13526

Rajanaidu, N. (2016). Una mirada al mejoramiento genético de la palma de aceite en los últimos cincuenta años: una aventura personal. *Palmas, 37*(número especial, tomo I), 190-202.

Ramírez, O. (2004). Híbrido de la palma: una alternativa a la soya. *Palmas, 25*(número especial, tomo I), 295-300.

Rey, B. L., Ayala, D. I. M., Ruiz, R. R., Gómez, C. P. L., Reyes, R. A., & Martínez, M. D. (2004). Evaluación y selección de materiales Dura en plantaciones comerciales de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. *Palmas, 25*(número especial, tomo II), 330-338.

Rey, B. L., Gómez, C. P., Ayala, D. I., Delgado, A. W., & Rocha, S. P. (2004). Colecciones genéticas de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq., y *Elaeis oleifera* (H. B. K.) de Cenipalma: características de híbridos t para el sector palmicultor. *Palmas, 25*(número especial 2), 39-48.

Reyes, C. P. (1985). *Fitogenotecnia básica y aplicada* (1.ª Ed.). AGT Editor, S. A.

Rincón, S. M., Hormaza, P. A., Moreno, L. P., Prada, F., Portillo, D. J., García, J. A., & Romero, H. M. (2013). Uso de las etapas fenológicas de los frutos y características fisicoquímicas del aceite para determinar el momento de cosecha óptimo en híbridos interespecíficos de palma O×G. *Palmas, 34*(2), 21-33.

Rojas, E. (1972). *Investigaciones sobre la enfermedad pudrición del cogollo de la palma africana en la plantación "La Arenosa" de Coldesa, S. A., Turbo, departamento de Antioquia.* Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Sinisterra, K., Caicedo, A., Castilla, C., Ceballos, D., Palacio, M., Cortés, I., Camperos, J., Ayala, I., & Mosquera, M. (2019). Validación del punto óptimo de cosecha en el cultivar híbrido interespecífico O×G CORPOICA (Cereté × Deli y Cereté × Yangambi). *Ceniavances,* (189). https://www.researchgate.net/publication/353691896_Validacion_del_punto_optimo_de_cosecha_en_el_cultivar_hibrido_interespecifico_OxG_Corpoica_Cerete_x_Deli_y_Cerete_x_Yangambi

Smith, N. (2015). *Elaeis oleifera*. In *Palms and People in the Amazon* (pp. 225-234). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05509-1_32

Tan, G. Y. (1978). Genetic studies of some morpho-physiological characters associated with yield in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Tropical Agriculture, 53*(1), 9-16.

Torres, M., Rey, L., Gelves, F., & Santacruz, L. (2004). Evaluación del comportamiento de los híbridos interespecíficos *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*, en la plantación de Guaicaramo S. A. *Palmas, 25*(número especial, tomo ii), 350-357.

Vallejo, R. G. (1976). *Estudio de poblaciones espontáneas de nolí (*Elaeis oleifera *H. B. K. Cortés) en Colombia* [Tesis de grado *magister scientiae*]. Universidad Nacional (UN); Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Vallejo, R. G. (1978). Mejoramiento genético de la palma africana. En *Palma africana de aceite* [Manual de Asistencia Técnica n.º 22]. (pp. 97-144). Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Vallejo, R. G. (1981). Mejoramiento genético. En *La palma africana de aceite* [Temas de orientación agropecuaria n.º 149] (pp. 49-70). Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Vencovsky, R. (1972). *Princípios de genética quantitativa*. Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz, Universidade de São Paulo (ESALQ-USP).


6102
4104
5202



Sección II



Rol de otras disciplinas en el mejoramiento genético de la palma de aceite en AGROSAVIA


PP
SYSTEMS

Capítulo 6
Ecofisiología y mejoramiento genético de la palma de aceite

Rafael Reyes Cuesta, Lizardo Norbey Ibarra Ruales

La función productiva de una especie vegetal, entendida como su producción de biomasa y su distribución para conformar la parte de interés económico para el hombre, está relacionada con los factores que determinan el fenotipo, es decir, depende de factores genéticos y ambientales y su combinación, como se indica a continuación:

Fenotipo = Genotipo + Ambiente + Interacción Genotipo y ambiente.

Dentro del ambiente, además de los aspectos biofísicos (suelo, atmósfera, agua, entre otros), se encuentra el manejo agronómico del sistema de producción. Por ello, una de las alternativas más viables para obtener adecuados niveles de productividad en una especie vegetal es disponer de genotipos de adaptación específica. Esto permite sembrar la especie y explotarla económicamente en condiciones ambientales que favorecen la expresión biológica potencial de las características sobresalientes de interés humano, sin que se presenten disturbios en su crecimiento y desarrollo que conduzcan a la disminución de su productividad y, en algunos casos, a la muerte de la planta.

Por ello, el programa de mejoramiento genético estatal de la palma de aceite en Colombia, ejecutado por el IFA y el ICA, y continuado por AGROSAVIA (Corpoica hasta 2017), desde 1994 ha tenido como objetivo obtener cultivares de adaptación específica a las condiciones agroecológicas tropicales del país (Bastidas et al., 1993; Bastidas et al., 2004), lo que ha involucrado varias disciplinas del conocimiento, dentro de las cuales se encuentra la fisiología vegetal.

Con el recurso genético disponible en el Banco de Germoplasma nacional de las palmas de aceite africana (*Elaeis guineensis*) y americana (*Elaeis oleifera*) (Bastidas & Hurtado, 1992; Bastidas et al., 2003b; Corpoica, 2012) y los recursos dispuestos por las entidades citadas arriba, en Colombia se han desarrollado diferentes estudios fisiológicos y ecofisiológicos sobre materiales parentales y sus progenies, algunos de los cuales se describen más adelante.

Esos estudios han contribuido al desarrollo de cuatro cultivares comerciales nacionales de palma de aceite, uno de *E. guineensis* tipo Ténera (cruce Dura × Pisífera)[1] y tres que son híbridos O × G (F1[2], Pacífico RC1[3] y Tumaco RC1[4]) producto del cruzamiento de *E. oleifera* y *E. guineensis*, y que se encuentran en proceso de desarrollo, gracias a investigaciones que han tenido como base principal el C. I. El Mira. Este centro se ubica en la región sur de la Costa Pacífica de Colombia, municipio de Tumaco, departamento de Nariño (1° 32′ 58″ latitud norte, 78° 41′ 21″ longitud oeste y 16 m s. n. m.), región de características agroecológicas de bosque húmedo tropical (bh-T).

Ecofisiología

La ecofisiología vegetal estudia las respuestas fisiológicas de las plantas a las condiciones de oferta ambiental, que incluyen la interacción de los materiales genéticos y el ambiente, y los procesos de adaptación.

La palma africana de aceite *Elaeis guineensis* Jacq.

Es una planta perenne, de la familia Arecaceae, originaria de África occidental, monocotiledónea (su semilla tiene un solo cotiledón) y monoica, es decir, las flores están agrupadas en un espádice donde las femeninas y masculinas se producen en ejes independientes. Es alógama, por lo tanto, su polinización es cruzada, con ciclos de floración alternos masculino-femenino. La polinización natural es favorecida por la acción del viento y los insectos (Cav Dwell et al., 2003; Chinchilla & Richardson, 1991).

1 Híbrido intraespecífico Ténera Corpoica Elmira.

2 Híbrido interespecífico F1 O × G Corpoica Elmira.

3 Híbrido interespecífico Pacífico RC1 ([F1 O × G] × $G_{pisífera}$).

4 Híbrido interespecífico Tumaco RC1 ([F1 O × G] × G_{dura}).

El tallo o estípite es la estructura que comunica el sistema radical con las hojas. La palma de aceite presenta un sistema radical fasciculado distribuido en los primeros 60 cm de profundidad del suelo. Las raíces se originan del bulbo (base del tallo) y se extienden radial y horizontalmente para formar raíces primarias, secundarias, terciarias y cuaternarias (Corley & Tinker, 2003; Reyes et al., 1997; Tomlinson, 1990).

Presenta hojas compuestas, pinnadas, con foliolos dispuestos de forma irregular en dos planos. Una palma adulta posee entre 30 y 40 hojas pinnadas, las cuales miden entre 5 y 7 m de longitud según el cultivar. El pecíolo es compacto en su base y está provisto de espinas en los bordes, las cuales se transforman en foliolos rudimentarios a medida que se alejan del tallo. El pecíolo es asimétrico con dos caras: una inferior, redondeada, y otra superior, lisa. Los estomas están localizados en el envés del foliolo (abaxial) con densidad promedio de 146/mm^2 y son semixeromórficos, es decir, se adaptan para prevenir la pérdida de agua durante largos periodos de sequía (Chaimsohn et al., 2008; Corley & Tinker, 2003). La palma de aceite posee la capacidad natural de sobrevivir a periodos prolongados de sequía y presenta variabilidad genética para la tolerancia al déficit hídrico (Alvarado & Sterling, 2005; Cornaire et al., 1993; Gutiérrez & Villalobos, 1996).

El racimo por lo general es ovoide, con un peso de 2 a 3 kg en palmas jóvenes y 25 kg en adultas (alcanza 100 kg). El fruto es una drupa que adopta varias formas según su posición en el racimo y su coloración exterior varía durante la madurez. El más común es violeta oscuro y naranja rojizo en la madurez y se denomina *nigrescens*. Otro fruto menos común es el que tiene tonalidades entre verdes y naranjas y se denomina *virescens*. Los frutos tienen una forma de esférica a ovoide, y su longitud alcanza de 2 a 5 cm con un peso de 3 a 30 g (Corley & Tinker, 2003; Kushairi, 2008).

El crecimiento, desarrollo y producción de la palma de aceite es el resultado de la interacción entre el material genético y el ambiente de la zona de producción (temperatura, radiación solar, precipitación, humedad relativa y suelos). Los requerimientos climáticos para el cultivo de la palma de aceite se describen en la tabla 6.1. Se resalta que la precipitación debe ser superior a 100 mm/mes y distribuida a lo largo del año, con brillo solar superior a 5 horas/día. Se requieren suelos planos (pendiente < 8 %), de textura franca a franco-arcillosa, sin grava

en los primeros 1,2 m del perfil, con buena aireación y suficiente humedad para las plantas durante todo el año. No tolera mantos freáticos permanentemente altos en suelos impermeables, y se adapta a pH bajos (4,0 a 5,5). Los suelos que favorecen el desarrollo son los limosos profundos y bien drenados (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Kushairi, 2008; Paramananthan, 2003b).

Tabla 6.1. Variables climáticas requeridas para el cultivo de palma de aceite

Factor climático	Rango
Precipitación	2.000 a 2.500 mm/año
Altitud	Menos de 500 m s. n. m.
Temperatura media máxima	29-33 °C
Temperatura media mínima	22-24 °C
Brillo solar	>1.500 horas/año
Humedad relativa	75-85 %

Fuente: Corley & Tinker (2003), Hartley (1983), Kushairi (2008), Paramananthan (2003b)

El sistema fotosintético de la palma de aceite es C3; la fotosíntesis se lleva a cabo en estratos acumulados y superpuestos de las hojas con sombreamiento entre ellos. Por ello, la radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente es absorbida en los diferentes estratos a medida que atraviesa las capas de hojas, lo que permite el óptimo aprovechamiento, y las hojas de los estratos inferiores presentan una tasa fotosintética menor que las hojas de estratos superiores. El área foliar es uno de los factores determinantes de la capacidad fisiológica de la planta y puede ser utilizada para valorar la eficiencia fotosintética y predecir el desempeño productivo de los cultivos. Con respecto al índice de área foliar (IAF), a los diez años se alcanza el valor máximo (8 a 10), el cual varía con la edad de la palma y la densidad de siembra (un IAF de 6 se considera apropiado para una buena producción de racimos) (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003). El estrato foliar donde se presenta máxima interceptación de luz en palmas de nueve años es en las hojas 15 a 20 (Lamade et al., 2009). Se ha determinado que hojas de hasta 21 meses de edad todavía son fotosintéticamente activas (Corley, 1983; Corley & Tinker, 2003). La fotosíntesis neta (Fn) fluctúa entre 3 y 27 µmol $CO_2/m^2/s$, influenciada por las condiciones ambientales de los sitios de siembra (humedad, radiación, temperatura) (Corley, 1982, 1983;

Dufrêne & Saugier, 1989; Lamade et al., 2009; Noor et al., 2005; Rodríguez & Villalobos, 1998; Suresh & Nagamani, 2006; Suresh & Reddy, 2005), con valores máximos entre 27 y 32 µmol $CO_2/m^2/s$ (Lamade & Setiyo, 1996; Lamade et al., 2009) y puntos de saturación de luz de 400, 800 y 1.150 µmol fotones/m^2/s (Corley & Tinker, 2003; Hanif, 2006; Henson, 1993; Rodríguez & Villalobos, 1998). La Fn máxima y el déficit de presión de vapor de agua en el aire (DPV) son inversamente proporcionales bajo condiciones de saturación de luz (Setyio et al., 1996).

La deficiencia de nitrógeno en plántulas en fase de vivero se asoció con la baja concentración de clorofila foliar. Este elemento es un componente estructural de la molécula de clorofila de los aminoácidos y de las coenzimas que son utilizados en las reacciones fotosintéticas.

Las hojas de la parte baja del dosel (sombreadas) pueden presentar mayor concentración de clorofila, asociada a una aclimatación por la baja radiación incidente (Lamade et al., 2009).

En la respiración total, la palma de aceite consume 75 % de los asimilados (CH_2O). Es la respiración de mantenimiento (Rm) la que ocupa el 50 % del proceso, mientras que 25 % corresponde a respiración de crecimiento (Rc), y el 25 % restante a C de ganancia de materia seca, distribuido en los diferentes órganos (raíces, hojas, tallo y racimos) (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003; Henson, 1992). Factores ambientales pueden afectar ese porcentaje y por tanto influenciar en parámetros de crecimiento o producción.

En India, en palmas de 4 a 5 años bajo condiciones de riego, la transpiración es menor en época seca (2,47-4,93 mm/día), mientras que en época húmeda es de 5,94 mm/día (Kallarackal et al., 2004). Las palmas que crecen en condiciones de estrés presentan potenciales hídricos foliares más negativos al medio día (Ψ_h = –1,8 MPa) respecto a las que crecen bajo condiciones de riego (Ψ_h = –1,0 MPa), debido a que estas últimas mantienen sus estomas cerrados (Kallarackal et al., 2004; Villalobos, 2001). En Costa de Marfil se encontró que, en lotes con riego, la evapotranspiración del cultivo equivalía a 81 % de la evapotranspiración potencial, y la transpiración diaria media presentó un rango de 1,25-2,31 mm/día (Dufrêne et al., 1992). Se sabe que las palmas con estrés hídrico presentan incremento de la temperatura de la hoja, debido a su

menor transpiración (Harun & Noor, 2006). En palma de aceite, la temperatura de la hoja puede ser 10 °C superior a la temperatura ambiente (Hong & Corley, 1976). La temperatura foliar adecuada para la actividad fotosintética es de 38 ºC y por encima de esta se genera cierre estomático (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003). Cuando existen temperaturas foliares superiores a 42 °C, la palma consume la mayor parte del CO_2 asimilado por fotosíntesis (Corley, 1982). El incremento en la resistencia estomática causa disminución en la eficiencia fotoquímica y la tasa fotosintética (Lamade et al., 2009).

La productividad primaria de las plantas (biomasa) es una medida de la fotosíntesis total, menos la respiración que ha ocurrido durante su crecimiento. En palmas de vivero de catorce meses de edad, el total de biomasa, incluido el sistema radical, fluctúa entre 815 y 980 g/planta (Reyes et al., 2008). En palmas adultas (trece años) sembradas en densidades de 143 palmas/ha, la biomasa acumulada puede ser de 78,7 t/ha, incluidas raíces e inflorescencias (Corley & Tinker, 2003). El incremento anual de biomasa neta del ecosistema de palma de aceite puede llegar a 17,4 t/ha, y la biomasa en circulación a 11,9 t/ha (Mutert, 1997). En cuanto al efecto de la temperatura sobre el crecimiento del cultivo, se ha determinado que temperaturas del aire inferiores a 15 ºC inhiben el crecimiento de la palma, mientras que a 25 ºC el crecimiento es siete veces más rápido que a 20 ºC (Hartley, 1983).

Los asimilados producidos en la fotosíntesis se distribuyen entre los diferentes órganos de la palma, de acuerdo con su edad (Breure, 2003; Bulgarelli et al., 2002; Corley & Tinker, 2003; Henson, 1992; Reyes et al., 1997, 2008). En palmas de vivero, el orden de distribución y acumulación de asimilados en la planta es similar entre variedades: foliolos > raíces > bulbo > raquis > tallo > base peciolar > pecíolo > hojas flecha (Reyes et al., 2008). No obstante, se ha encontrado que, para la distribución de fotoasimilados, la producción de materia seca total es más o menos constante, con variaciones en la parte destinada a los racimos, según el exceso de fotoasimilados disponible, una vez se han cubierto las necesidades vegetativas (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003). Lo anterior indica que en la palma de aceite el crecimiento vegetativo es prioritario cuando el aporte de asimilados es limitante, como ocurre en la estación seca (Corley et al., 1971).

Henson (1990, 1991) considera que en palmas jóvenes la tasa de fotosíntesis se estimula por el desarrollo de racimos, que actúan como sumidero para los asimilados. Cuando se inicia la producción de racimos, la tasa de fotosíntesis aumenta para satisfacer la demanda de estos sumideros, pero se mantiene un balance con otros órganos que también requieren energía, de manera que se puede restringir el crecimiento vegetativo (Corley & Breure, 1992). El índice de cosecha (la razón del peso seco entre racimos y el total de la planta) se sitúa entre 0,27 y 0,53 (Corley & Tinker, 2003; Villalobos et al., 2001).

En la palma de aceite, la concentración de nutrientes, así como la producción y distribución de biomasa en las diferentes partes de la planta, es variable según suelo, clima y edad. La absorción de nutrientes se incrementa después del primer año de trasplante del vivero al campo. En general, el orden de la demanda es: K > N > S > Ca > Mg > P > Fe > Mn > Zn > Cu > B (Owen, 1996; Ng, 1972). Para palmas adultas (148 palmas/ha) y con una producción de 25 t de racimos por ha/año, la absorción (kg/ha/año) de algunos elementos es la siguiente: nitrógeno (192,5), fósforo (26,0), potasio (251,4), calcio (99,3), magnesio (61,3).

La demanda por nutrientes es mayor en palmas jóvenes en crecimiento activo (sobre todo por las hojas y raíces) y disminuye en palmas adultas, debido en parte a que los nutrientes son recirculados desde las hojas e inflorescencias senescentes. No obstante, en cultivos comerciales las hojas son podadas y estas, junto con restos de inflorescencias, son recicladas una vez se descomponen en el suelo. Se estima que se producen hasta 10 t de hojas por ha/año, lo cual representa aproximadamente 75 kg de N, 10,6 kg de P, 98,1 kg de K y 27,9 kg de Mg (Basiron et al., 1998).

El tronco o estípite mantiene una demanda sostenida de nutrientes para sostener su crecimiento con la edad, pero es la cosecha de racimos lo que tiene mayor impacto, dado que estos son retirados del sistema, aunque parte de ellos puede retornar al campo en forma de racimos vacíos y efluentes desde la planta extractora de aceite (Kushairi, 2008; Paramananthan, 2003a). La práctica de sembrar una leguminosa de cobertura también representa una fuente importante de nutrientes para el sistema, que ayuda en el largo plazo a reducir la dependencia de fertilizantes inorgánicos (Basiron et al., 1998; Kushairi, 2008; Wood, 2007).

La palma americana de aceite *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés

Es una especie perenne, denominada anteriormente como *Elaeis melanococca*. Se le conoce en Colombia como corozo o nolí y en Brasil como *caiaué*. Es originaria de América y se encuentra en países tropicales de Centro y Suramérica, incluida Colombia.

La principal característica de esta palma, que la distingue de *E. guineensis*, es que en condiciones naturales su tronco presenta crecimiento rastrero (procumbente), que alcanza más de 7 m de largo, y su copa tiene una posición erecta, de 1,5 a 3,0 m de alto (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Patiño, 1977). En el C. I. El Mira, las palmas de la colección de la especie plantadas en campo han mantenido el tallo erecto por 36 años y se ha comprobado que crecen mucho más lento en longitud que *E. guineensis*.

La hoja de *E. oleifera* presenta todos los foliolos en inserción simple (un solo plano), sin engrosamiento basal, y las espinas del pecíolo son cortas y gruesas, a diferencia de *E. guineensis*, que presenta los foliolos en inserción doble (dos planos). Los racimos pesan entre 8 y 12 kg, pero a veces llegan a 30 kg. Generalmente son redondos y anchos en su centro, y tienden a ser puntiagudos en el ápice, lo que les permite tener apariencia cónica, a diferencia de los racimos de *E. guineensis*, que son de forma ovoide. La capa de mesocarpio del fruto es delgada y a menudo constituye 29 a 42 % del fruto normal, aunque llega a más del 80 % en el fruto partenocárpico. El aceite en el mesocarpio varía entre 16 y 38 %. La relación fruto normal-racimo es baja, de 28 a 46 %, y la relación fruto partenocárpico-racimo puede variar de 9 a 25 %.

Comparado con *E. guineensis*, el aceite tiene mayores contenidos de ácidos grasos insaturados y en especial de ácido oleico. No hay evidencias de que la especie presente formas de fruto comparables a Dura, Ténera y Pisífera (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Patiño, 1977).

El híbrido *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*

La explotación comercial de la palma *E. oleifera* puede ser de interés por su resistencia a disturbios como la pudrición del cogollo, por su lento crecimiento en altura y la calidad de su aceite, aunque su limitante es la baja producción

de aceite en condiciones de plantación. Como no hay tipos Ténera en la especie, se impone la utilización de híbridos interespecíficos O × G entre *E. oleifera* y *E. guineensis*, debido a su posible adaptación a climas con fuertes estaciones secas, a su posible resistencia a enfermedades y a su producción de aceite con una mayor proporción de ácidos grasos no saturados que la palma *E. guineensis* (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Patiño, 1977).

Genéticamente, el género *Elaeis* (especies *E. oleifera* y *E. guineensis*) tiene 16 pares de cromosomas (número diploide, 2n = 32), lo que facilita su cruzamiento. Los híbridos O × G, F1 y RC1 se caracterizan por tener hojas más largas que las de sus progenitores, pero manifiestan las características de *E. oleifera* en lo que se refiere a disposición de foliolos, tasa de crecimiento, forma del racimo, partenocarpia y forma del fruto. Pero en cuanto a producción de aceite en plantación, sus rendimientos son generalmente menores que los de *E. guineensis*. Por otra parte, han presentado resistencia diferencial a la pudrición del cogollo (Bastidas et al., 2003a, 2007, 2011; Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Patiño, 1977; Preciado, 2010). En la actualidad, se considera que una de las alternativas que tienen los palmicultores para zonas afectadas por la PC es la siembra de cultivares resistentes a la enfermedad, resultantes de cruzamientos O × G (*E. oleifera* × *E. guineensis*). El uso de la polinización asistida o la aplicación del regulador de crecimiento ANA a las inflorescencias de híbridos O × G, y la aplicación de la escala de punto óptimo de cosecha, han permitido elevar su producción de aceite a tasas y rendimientos similares, incluso con ANA superiores a los de las palmas Ténera (*E. guineensis*). Sin embargo, es necesario seguir investigando los efectos sobre las plantas del uso a largo plazo del regulador de crecimiento (Romero, 2018; Romero et al., 2020; Sinisterra et al., 2019).

AGROSAVIA, mediante el Banco de Germoplasma de especies palmáceas del país, ejecuta un programa de introgresión de genes entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*, que ha incluido su retrocruzamiento, lo que permite disponer de genotipos O × G, F1 y RC1 en fase de evaluación como cultivares comerciales (S. Bastidas et al., 1993, 2003a, 2003b, 2007; L. E. Bastidas et al., 2008a; Preciado et al., 2011). Como resultado, se obtuvo el Registro ICA para tres de ellos: O × G Corpoica Elmira, Pacífico RC1 y Tumaco RC1. Mediante trabajo conjunto de Cenipalma y AGROSAVIA se determin**ó** el punto óptimo de cosecha para el cultivar O × G Corpoica Elmira (Sinisterra et al., 2019).

En general, la fisiología de la función productiva de la palma de aceite se describe en el esquema de la figura 6.1. Se observa la importancia del genotipo, de las prácticas agronómicas y del ambiente, para la obtención de una buena producción biológica y económica.

Algunos estudios realizados en Colombia

En esta sección, se describen estudios relacionados con la ecofisiología de la palma de aceite, que forman parte del programa de mejoramiento genético que ejecuta AGROSAVIA.

Crecimiento en vivero

Una de las principales bases para tener una plantación de palma de aceite productiva, competitiva y sostenible es obtener, en la etapa de vivero, plantas de buen crecimiento, que inicien en campo la producción de racimos y alcancen su máximo rendimiento en el menor número de meses (Bulgarelli et al., 1993; Chinchilla et al., 1990; Corley & Tinker, 2003; Umaña et al., 1990). Para ello, es necesario y útil disponer en las regiones palmeras de estudios de crecimiento locales de los diversos materiales de siembra, que puedan ser utilizados como guía o referencia para seguir el crecimiento de las palmas en vivero y seleccionar antes de la siembra en campo (Bulgarelli et al., 1993). En esta selección se descarta alrededor del 15 al 25 % de la población del vivero por no cumplir con los parámetros de crecimiento requeridos para un material plantable de buena calidad (Chee et al., 1998; Vallejo, 1987).

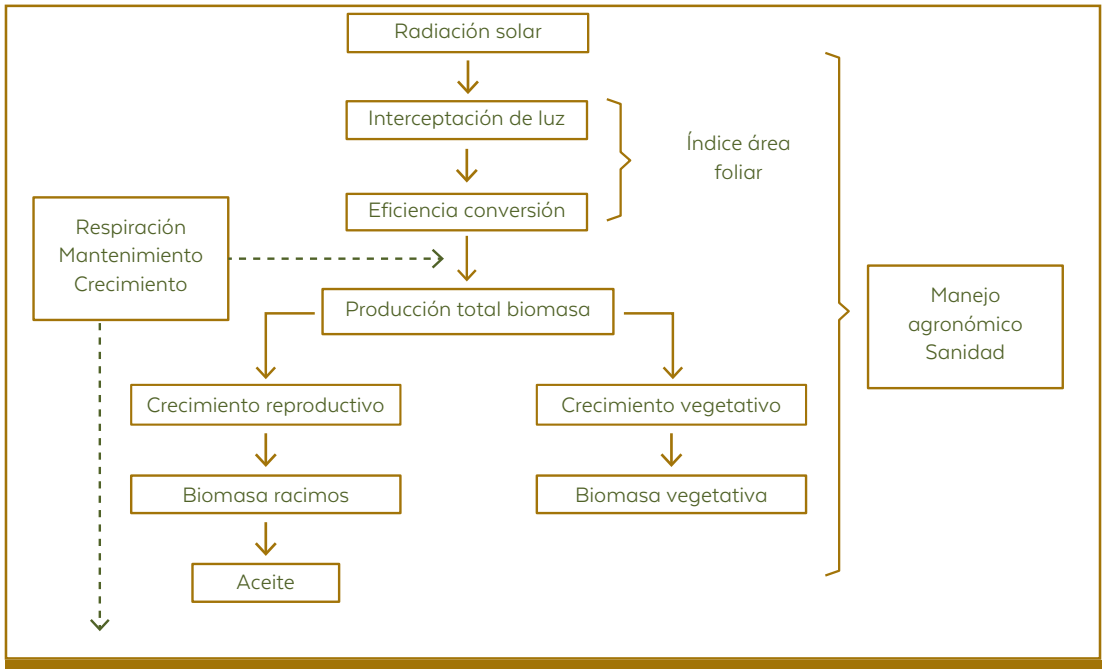


Figura 6.1. Fisiología de la función productiva en palma de aceite.
Fuente: Elaboración propia

Debido a su importancia, se realizaron en Tumaco, Colombia, estudios de crecimiento en la etapa de vivero de *E. guineensis* y de los híbridos O × G de *E. oleifera* × *E. guineensis*.

Para la palma africana de aceite (*E. guineensis*) tipo Ténera se realizó un estudio en condiciones de vivero tradicional, en bolsas plásticas con suelo arenoso, y con cuatro variedades comerciales: Tanzania × Ekona, Deli × Yangambi (1, Costa Rica), Deli × Avros y Deli × Yangambi (2, Corpoica, Colombia[5]) (Reyes, 2010; Reyes et al., 2008). El último material fue obtenido por Corpoica y el ICA, a partir de estudios con material genético del Banco Nacional de Germoplasma de la especie de Colombia (Bastidas et al., 2003b, 2004, 2006).

Se observaron para el diámetro del bulbo (DB) y la altura de la planta (AP) diferencias entre cultivares, explicadas por las tasas diferenciales de crecimiento transversal del bulbo y la altura (tabla 6.2; figuras 6.2, 6.3). Por

5 Cultivar Ténera Corpoica Elmira de palma de aceite. Híbrido intraespecífico entre los tipos Dura y Pisífera de la especie *E. guineensis*. Registro ICA PLA-04-3 de abril de 2004.

su parte, el número de hojas por planta y la mayoría de componentes de la hoja también presentaron diferencias (tablas 6.2, 6.3). Esto evidenció la probable existencia de un mecanismo propio de la especie, manifestado en cada cultivar, para la organización de su aparato fotosintético, en unas condiciones ambientales específicas (Reyes et al., 2008).

Tabla 6.2. Variables de crecimiento de plantas de vivero en bolsas plásticas, de cultivares de palma de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia)

Época	Cultivares	Diámetro del bulbo (DB) (cm)	Altura de planta (AP) (cm)	Hojas por planta (HPL) (n.º)
432 DDS	Tanzania × Ekona	9,72a	34,48b	13,88ab
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	9,49ab	35,56ab	14,04a
	Deli × Avros	9,10b	37,12a	12,84c
	Deli × Yangambi (Colombia)	9,57ab	33,32b	13,4bc
	Coeficiente de variación (CV) (%)	7,9	8,81	6,31
	F (variedades)	*	**	**

DDS: días después de siembra, incluidos 71 días de previvero.
*Significativo al 5% y **altamente significativo al 1%, por la prueba de F (Fisher), respectivamente.
Nota : Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.
Fuente: Reyes et al. (2008)

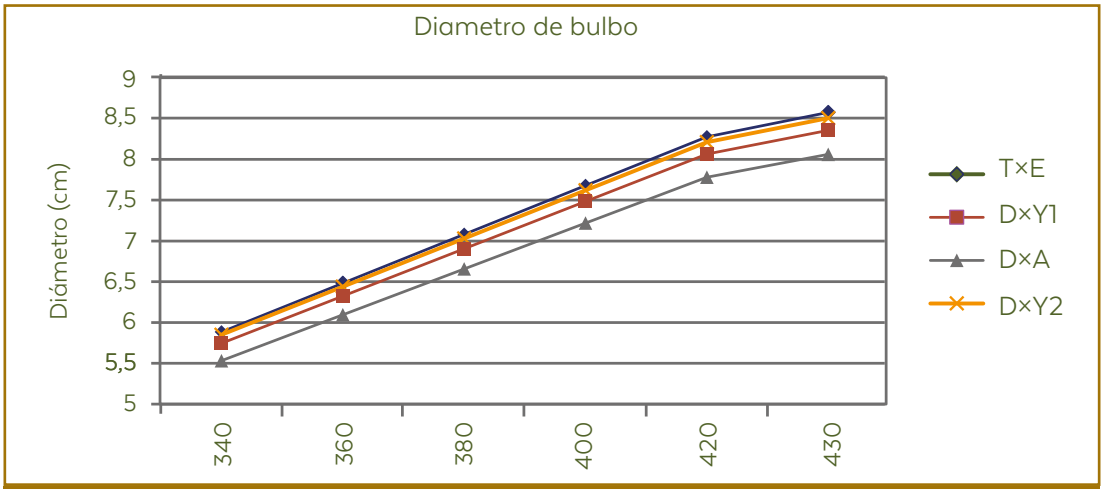


Figura 6.2. Comportamiento del diámetro de bulbo de plantas de vivero en cultivares de palma de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia).
T×E: Tanzania×Ekona; D×Y1: Deli×Yangambi, Costa Rica; D×A: Deli×Avros; D×Y2: Deli×Yangambi, Colombia.
Fuente: Reyes et al. (2008)

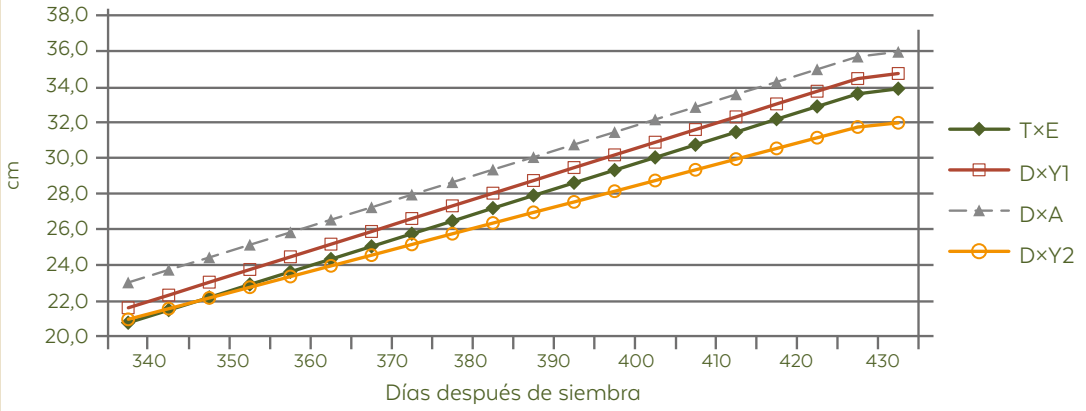


Figura 6.3. Comportamiento de altura de plantas de vivero en cultivares de palma de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia).

T×E: Tanzania×Ekona; D×Y1: Deli×Yangambi, Costa Rica; D×A: Deli×Avros; D×Y2: Deli×Yangambi, Colombia.

Fuente: Reyes et al. (2008)

Tabla 6.3. Características de la hoja 4 de plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Época	Cultivares	Foliolos				Longitud			Pecíolo		Área sección pecíolo (P×S) (cm^2)	Foliolos por metro de raquis (FMR) (n.°)
		Número por hoja (FPH)	Longitud (LF) (cm)	Ancho (ADF) (cm)	Área hoja (AH) (m^2)	Pecíolo (LD) (cm)	Raquis (LR) (cm)	Hoja (LH) (cm)	Ancho (s) (cm)	Grosor (p) (cm)		
432 DDS	Tanzania×Ekona	62,8a	33,9a	2,81a	0,2051a	10,28a	78,73a	89,01a	1,68a	0,94a	1,59a	79,8a
	Deli×Yangambi (Costa Rica)	58,6b	40,3b	2,71a	0,1937a	9,34b	90,01b	99,35b	1,73a	0,93a	1,61a	66,1b
	Deli×Avros	59,2ab	39,2b	2,79a	0,2117a	10,85ab	93,12b	103,97b	1,79ab	0,91a	1,65a	63,6b
	Deli×Yangambi (Colombia)	57,9b	36,7c	2,87a	0,2205a	8,72c	88,98b	97,70b	1,88b	1,05b	1,97b	63,7b
	CV (%)	8,17	6,95	7,47	20,35	13,9	9,71	9,11	10,36	12,3	19	10,97
	F (variedades)	**	**	ns	ns	**	**	**	**	**	**	**

ns: no significativo, *significativo al 5% y **altamente significativo al 1%, por la prueba de F (Fisher), respectivamente.

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2008)

En cuanto al destino de los asimilados producidos, los cuatro cultivares evaluados presentaron el siguiente orden de distribución y acumulación de fotoasimilados: folíolos > raíces > bulbo > raquis > tallo > base peciolar >peciolo > hoja flecha. En la hoja, la disposición fue la siguiente: folíolos > raquis > peciolo. Todo lo anterior está relacionado con las características de sumidero de cada órgano (tablas 6.4, 6.6) (Reyes et al., 2008).

Tabla 6.4. Distribución de la biomasa de plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Época	Cultivares	Distribución de materia seca (%)							
		Raíces	Bulbo	Tallo	Base peciolar	Pecíolo	Raquis	Foliolos	Flecha
432 DDS	Tanzania × Ekona	22,7a	18,2a	7,9a	5,4a	3,4a	13,2a	26,6a	2,7a
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	17,2a	18,3a	10,9a	5,5a	3,1a	15,6a	27,4a	2,2a
	Deli × Avros	19,3a	17,1a	8,9a	5,5a	3,2a	15,6a	27,7a	2,6a
	Deli × Yangambi (Colombia)	17,0a	18,1a	8,3a	4,8a	3,2a	16,0a	30,2a	2,5a
	CV (%)	28,12	13,94	40,95	20,21	22,85	16,45	14,31	32,15
	F (variedades)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: no significativo, por la prueba F (Fisher).

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2008)

En cuanto a la planta, no se presentaron diferencias entre cultivares para la razón de área foliar (RAF) (área foliar de la planta [AF]/materia seca total planta [PSP]) y para el área foliar específica (AFE) (área de la hoja [AH]/ materia seca de la hoja) (tabla 6.5) (Reyes et al., 2008), lo que indica que la proporción entre el tamaño de la fuente de asimilados (AF) y el tamaño del sumidero de asimilados (PSP) en todos los cultivares no se alteró por factores externos, y se expresó lo correspondiente a factores internos (genéticos) de la especie y cultivares (Benincasa, 1988; Kvet et al., 1971). No se presentaron diferencias significativas entre cultivares para la razón materia seca parte área/sistema radical (PA/SR) (tabla 6.5) (Reyes et al., 2008), lo que indica que las variables están determinadas genéticamente y no fueron influenciadas por el ambiente (Marschner, 1986; Rodríguez & Leihner, 2006).

Tabla 6.5. Razones de área y peso foliar, parte aérea, sistema radical y área foliar específica, de plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Época	Cultivares	Razón de área foliar (RAF) cm^2/g	Razón de peso foliar (RPF) g/g	Área foliar específica (AFE) cm^2/g	Razón parte aérea/sistema radicular (PA/SR)
432 DDS	Tanzania × Ekona	33a	0,27a	130a	3,48a
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	34a	0,27a	120a	4,8a
	Deli × Avros	29a	0,27a	110a	4,3a
432 DDS	Deli × Yangambi (Colombia)	32a	0,30a	110a	4,9a
	CV (%)	16,78	14,31	16,74	37,89
	F (variedades)	ns	ns	ns	ns

ns: no significativo, por la prueba de F (Fisher).

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2008)

Para la biomasa de la hoja, así como para su distribución porcentual entre los diferentes componentes, se presentaron diferencias significativas entre cultivares para los componentes raquis y foliolos, pero no para el pecíolo (tabla 6.6) (Reyes et al., 2008). Se presentó mayor contenido de materia seca en el cultivar Deli × Yangambi (Corpoica) y menos en el cultivar Tanzania × Ekona. Sin embargo, los cultivares mostraron un crecimiento armónico entre las diferentes partes de la planta, con similar distribución y acumulación de asimilados en sus órganos, así como similares AH, AF e IAF (Reyes, 2010; Reyes et al., 2008, 2009).

Tabla 6.6. Biomasa de la hoja y su distribución en plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Época	Cultivares	Materia seca hoja (g/hoja)					Distribución materia seca hoja (%)	
		Peciolo (PSPe)	Raquis (PSRA)	Foliolos (PSF)	Hoja (PSH)	Peciolo	Raquis	Foliolos
432 DDS	Tanzania × Ekona	3,463a	11,176a	29,379a	44,018a	7,9a	25,4a	66,7a
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	2,798a	13,499ab	29,484a	45,780a	6,1b	29,5b	64,4b
	Deli × Avros	3,421a	14,806bc	32,383ab	50,611ab	6,8ab	29,3b	64,0b
	Deli × Yangambi (Colombia)	3,441a	15,902c	35,570b	54,912b	6,3ab	29,0b	64,8ab
	CV (%)	36,57	23,45	22,15	21,61	3,66	7,86	4,4
	F (variedades)	ns	**	**	**	*	**	*

ns: no significativo, *significativo al 5% y **altamente significativo al 1%, por la prueba de F (Fisher), respectivamente.

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2008)

Además, para las palmas que crecieron en vivero en Tumaco, se determinó lo siguiente: 1) el área de la hoja puede ser estimada, para cada cultivar, con ecuaciones ajustadas del tipo $AHE = C \times (n \times l \times a)$ (tabla 6.7) (Reyes et al., 2008); 2) el peso seco de la hoja puede estimarse, para cada cultivar, con modelos ajustados del tipo $PSHE = FC^{*}(P \times S)$ (tabla 6.7) (Reyes et al., 2008).

También se determinaron las ecuaciones del tipo $Y = a + bX$ para diámetro del bulbo (DB) y altura de planta (AP) en cada cultivar durante periodos específicos, así como las tasas (cm/día) de crecimiento transversal de bulbo y altura de planta (tabla 6.8) (Reyes, 2010; Reyes et al., 2008). Estas curvas son útiles como guía o referencia para seguir el crecimiento de las palmas de vivero y seleccionarlas antes de la siembra en campo, y no están disponibles en la región palmera de Tumaco. Son útiles también las determinadas para estimar el área y el peso seco de la hoja.

Tabla 6.7. Ecuaciones y modelos para estimar el área de la hoja (A) y su peso seco (W), en plantas de vivero en bolsas plásticas de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Cultivares	Ecuaciones área de la hoja (m^2)	Modelos peso seco de la hoja (kg)
Tanzania × Ekona (T × E)	A (T × E) = 0,34 × (n × L × a)*	W (T × E) = 0,028 × (P × S)**
Deli × Yangambi (Costa Rica) (D × Y1)	A (D × Y1) = 0,30 × (n × L × a)	W (D × Y1) = 0,028 × (P × S)
Deli × Avros (D × A)	A (D × A) = 0,32 × (n × L × a)	W (D × A) = 0,031 × (P × S)
Deli × Yangambi (Colombia) (D × Y2)	A (D × Y2) = 0,37 × (n × L × a)	W (D × Y2) = 0,028 × (P × S)
Promedio especie (PE)	A (PE) = 0,33 × (n × L × a)	W (PE) = 0,029 × (P × S)

* n: número de foliolos por hoja; L × a: promedio de largo por el ancho de foliolos en cm^2.
** P × S: sección transversal del pecíolo en cm^2.
Fuente: Reyes et al. (2008)

Tabla 6.8. Ecuaciones para estimar diámetro de bulbo (DB) y altura de planta (AP) en plantas de vivero en bolsas plásticas de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia)

Variable	Cultivares	Ecuación	R^2	Tasa de crecimiento cm/día	Periodo DDS*
Diámetro del bulbo	Tanzania × Ekona	DB = −4,282 + 0,02999 DDS	0,90	0,0299	123-432
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	DB = −4,115 + 0,02900 DDS	0,92	0,0290	123-432
	Deli × Avros	DB = −4,022 + 0,02810 DDS	0,91	0,0281	123-432
	Deli × Yangambi (Colombia)	DB = −4,180 + 0,02950 DDS	0,93	0,0295	123-432
Altura de planta	Tanzania × Ekona	AP = −27,77 + 0,1427 DDS	0,80	0,1427	331-432
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	AP = −27,00 + 0,1429 DDS	0,81	0,1429	331-432
	Deli × Avros	AP = −24,83 + 0,1407 DDS	0,75	0,1407	331-432
	Deli × Yangambi (Colombia)	AP = −19,79 + 0,1198 DDS	0,70	0,1198	331-432

* Periodo de aplicación de ecuaciones días después de siembra (DDS).
Fuente: Reyes et al. (2008)

Con los mismos cuatro cultivares *E. guineensis* tipo Ténera del estudio anterior, se evaluó el crecimiento en vivero en materos plásticos con dos suelos de diferentes propiedades físicas, uno franco-arcillo-limoso (F. Ar. L.) y el otro arenoso franco (A. Fr.) (tabla 6.9).

En el suelo arenoso franco, y en relación con el franco-arcillo-limoso, todos los cultivares presentaron mayor valor de diámetro del bulbo (DB), área de la hoja (AH), longitud del foliolo (LF), sección transversal del pecíolo (P × S), área foliar (AF), peso seco de la hoja (PSH) y peso seco de hojas (PSDH). Entre tanto, en el suelo franco-arcillo-limoso, en comparación con el suelo arenoso franco, solo presentaron mayor valor en tasa de emisión foliar (TEF) y foliolos por metro de raquis (FMR) (tablas 6.10, 6.11) (Reyes, 2010; Reyes et al., 2009). Lo anterior mostró que las condiciones de mejor espacio aéreo y aireación que brindó el suelo de menor retención de humedad y mayor drenaje (suelo arenoso franco) (tabla 6.9) favorecieron el crecimiento de los cultivares evaluados, y se determinó que, en las condiciones ambientales de Tumaco, los suelos del tipo arenoso franco son más adecuados para viveros de palma de aceite africana, que los del tipo franco-arcillo-limoso.

Tabla 6.9. Características físicas de los dos tipos de suelo de Tumaco, Nariño (Colombia), empleados en el estudio

Suelo	Profundidad (cm)	Textura*	Profundidad (cm)	Retención de humedad en humedad volumétrica (%) MPa de determinación				Espacio aéreo (EA) (%)			
				0,03	**0,15**	**1,00**	**1,50**				
Franco-arcillo-limoso (PT)	0-20	F. L.	0-5	49,06	46,91	45,61	44,54	19,20	21,35	22,65	23,72
	20-40	F. Ar. L.	5-10	46,94	45,61	44,39	43,46	16,29	17,62	18,84	19,77
Arenoso franco (PR)	0-20	A. Fr.	0-5	43,06	41,66	40,66	39,88	30,32	31,72	32,72	33,5
	20-40	A. Fr.	5-10	45,21	43,59	42,55	41,74	29,97	31,59	32,63	33,44

F. L.: franco limoso; F. Ar. L.: franco-arcillo-limoso; A. Fr.: arenoso franco.
* Bouyoucos.
Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2009, 2013a)

En relación con los cultivares, se observó que Deli × Avros y Tanzania × Ekona presentaron los mayores valores en DB y FMR, en tanto que Deli × Yangambi (Colombia) presentó los mayores valores para AH y AF (tablas 6.10, 6.11) (Reyes et al., 2009). Probablemente, debido a los atributos genéticos de tolerancia a baja luminosidad de Tanzania × Ekona y Deli × Yangambi (Colombia), condición del sitio del estudio, el híbrido Deli × Avros es considerado de baja tolerancia. Sobre el particular, Benincasa (1988) indica que los límites de luminosidad soportables por la planta son una característica genética.

Tabla 6.10. Características de crecimiento de plantas de vivero de palma africana de aceite en materos plásticos y con dos tipos de suelo en Tumaco, Nariño (Colombia), 499 DDS

Cultivares	Diámetro de bulbo (cm)		Tasa de emisión foliar (hojas/mes)		Altura de planta (cm)		Área foliar por planta (m^2)		Índice de área foliar	
	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)
Tanzania × Ekona	11,55a	11,95a	2,03b	1,98a	33,53c	35,45b	3,60ab	4,347a	3,6ab	4,3a
Deli × Yangambi (Costa Rica)	11,11ab	11,93a	2,23a	2,05a	41,94a	39,53a	2,765ab	3,643a	2,8 b	3,6a
Deli × Avros	10,65b	11,30ab	2,00b	1,85b	40,52a	37,60b	3,677a	3,794a	3,7a	3,8a
Deli × Yangambi (Colombia)	10,72b	11,09b	2,23a	2,05a	37,20b	35,85b	4,416a	4,729a	4,4a	4,7a
CV (%)	7,72	7,83	11,11	11,11	8,72	7,09	14,84	18,37	14,84	18,37
F (genotipos)	**	**	**	*	**	**	**	ns	**	ns

ns: no significativo, **altamente significativo, por la prueba de Fisher, respectivamente.

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2009)

Tabla 6.11. Características de la hoja 4 de plantas de vivero de palma africana de aceite en materos plásticos y con dos tipos de suelo en Tumaco, Nariño (Colombia), 499 DDS

Cultivares	Área hoja (m^2)		Longitud hoja (cm)		Foliolos por metro de raquis (n.º)		Materia seca hoja (kg/hoja)	
	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)
Tanzania × Ekona	0,2725a	0,2860ab	119,5ab	110,7 b	71,8a	69,3a	0,067a	0,068a
Deli × Yangambi (Costa Rica)	0,1890b	0,2312b	110,1b	137,7a	61,4b	54,3b	0,062a	0,071ab
Deli × Avros	0,2553a	0,2631ab	134,4a	130,1ab	61,4b	57,5b	0,067a	0,084b
Deli × Yangambi (Colombia)	0,2869a	0,3191a	113,4b	123,6ab	68,1ab	60,2ab	0,069a	0,074ab
CV (%)	13,23	16,56	8,48	8,93	6,08	9,65	14,06	10,94
F (genotipos)	**	*	**	*	**	**	ns	*

ns: no significativo, *significativo al 5%, **altamente significativo al 1%, por la prueba de F (Fisher),

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.
respectivamente.
Fuente: Reyes et al. (2009)

Por su parte, Deli × Yangambi (Colombia) presentó con respecto a Deli × Yangambi (Costa Rica) menor valor para AP y mayor valor para AH (tablas 6.10, 6.11) (Reyes et al., 2009), comportamiento probablemente asociado a la adaptación de Deli × Yangambi (Colombia) a las condiciones ambientales del sitio de estudio (Tumaco, Colombia), en el cual fueron evaluados y seleccionados sus progenitores (Bastidas et al., 2003b, 2004, 2006).

Además, para diferenciar materiales de palmas en etapa de vivero con el uso de suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L.) y arenoso franco (A. Fr.) como sustrato, se observó que las variables de crecimiento vegetativo discriminantes son diámetro del bulbo, emisión foliar, altura de planta, área de la hoja 4 y número de foliolos (Reyes et al., 2009). En los cuatro cultivares y periodos específicos, también se determinaron ecuaciones del tipo $Y = a + bX$, para la estimación de curvas de referencia del comportamiento del DB y AP en palmas que crecen en

vivero dentro de baldes plásticos (tabla 6.12) (Reyes et al., 2009), y en las obtenidas para viveros tradicionales en bolsas plásticas (tabla 6.8). Asimismo, se determinaron las tasas (cm/día) de crecimiento transversal de bulbo y altura (Reyes, 2010; Reyes et al., 2008, 2009).

Tabla 6.12. Ecuaciones que describen el crecimiento de plantas de vivero de palma africana en materos plásticos y con dos tipos de suelo en Tumaco, Nariño (Colombia)

Variable	Cultivares	Suelo	Ecuación	R^2	Tasa de crecimiento (cm/día)	Periodo DDS*
Diámetro de bulbo (CM, DB)	Tanzania × Ekona	Franco-arcillo-limoso	DB = −6,299 + 0,0351 DDS	0,95	0,0351	220-499
	Deli × Yangambi (Costa Rica)		DB = −6,510 + 0,0358 DDS	0,94	0,0580	220-499
	Deli × Avros		DB = −5,736 + 0,0334 DDS	0,95	0,0334	220-499
	Deli × Yangambi (Colombia)		DB = −5,476 + 0,0322 DDS	0,97	0,0322	220-499
	Tanzania × Ekona	Arenoso franco	DB = −5,947 + 0,0354 DDS	0,96	0,0354	220-499
	Deli × Yangambi (Costa Rica)		DB = −6,394 + 0,0370 DDS	0,96	0,0370	220-499
	Deli × Avros		DB = −5,688 + 0,0341 DDS	0,95	0,0341	220-499
	Deli × Yangambi (Colombia)		DB = −4,945 + 0,0317 DDS	0,97	0,0317	220-499
Altura de planta (cm, AP)	Tanzania × Ekona	Franco-arcillo-limoso	AP = −11,94 + 0,0984 DDS	0,74	0,0984	310-499
	Deli × Yangambi (Costa Rica)		AP = −19,36 + 0,1222 DDS	0,87	0,1222	310-499
	Deli × Avros		AP = −8,807 + 0,1006 DDS	0,80	0,1006	310-499
	Deli × Yangambi (Colombia)		AP = −15,19 + 0,1046 DDS	0,87	0,1046	310-499
	Tanzania × Ekona	Arenoso franco	AP = −7,985 + 0,0898 DDS	0,81	0,0898	310-499
	Deli × Yangambi (Costa Rica)		AP = −10,07 + 0,1011 DDS	0,90	0,1011	310-499
	Deli × Avros		AP = −2,767 + 0,0831 DDS	0,81	0,0831	310-499
	Deli × Yangambi (Colombia)		AP = −7,717 + 0,0872 DDS	0,85	0,0872	310-499

* Días después de siembra

Fuente: Reyes et al. (2009)

Con los mismos dos suelos del estudio anterior, de diferente retención de humedad y espacio aéreo (espacio poroso) (tabla 6.9), se evaluó el crecimiento y desarrollo en etapa de vivero de los cultivares híbrido interespecífico F1 O × G (*E. oleifera* × *E. guineensis*) y palma africana de aceite Ténera D × P (*E. guineensis* × *E. guineensis*) de AGROSAVIA (Ibarra-Ruales & Reyes-Cuesta, 2015). Se encontró que el cultivar F1 O × G presentaba mayor crecimiento que el Ténera D × P en la mayoría de variables biométricas evaluadas y en la acumulación total de biomasa por planta. Además, se identificaron y seleccionaron tres características morfológicas discriminantes para diferenciar el comportamiento del crecimiento en los dos tipos de cultivares con respecto al suelo empleado en el vivero: área sección del pecíolo (P × S), largo del raquis (LR) y emisión foliar (EF).

Asimismo, se determinó la acumulación y distribución de biomasa por órgano de los dos cultivares, y se encontró la siguiente preferencia de distribución para el cultivar F1 O × G: foliolos > bulbo > raíces > base peciolar > tallo > pecíolo > hoja flecha > raquis. El cultivar F1 OxG presentó diferencias con respecto al cultivar Ténera D × P (foliolos > bulbo > raíces > tallo > pecíolo > base peciolar > hoja flecha > raquis). Esto indica que el patrón de distribución de asimilados es diferente, y que con respecto a D × P, se destaca en el cultivar F1 O × G la capacidad de destinar mayor proporción de asimilados a formar sistema radical en la planta (tabla 6.13). Asimismo, los resultados obtenidos permitieron determinar que los suelos del tipo franco-arcillo-limoso favorecen el crecimiento en vivero del cultivar híbrido F1 O × G, mientras que los de tipo arenoso franco favorecen el de Ténera D × P (Ibarra-Ruales & Reyes-Cuesta, 2015).

Tabla 6.13. Biomasa de raíces, parte aérea y razón parte aérea sistema radical (PA/SR) de las palmas de aceite híbrido O × G y Ténera D × P en vivero, en Tumaco, Nariño (Colombia), 330 DDS

Factor		Biomasa (g/planta)		PA/SR
		Raíces	Parte aérea	
Suelos	Franco-arcillo-limoso	160,1a	718,5a	4,4a
	Arenoso franco	240,9b	847,7b	3,5b
Materiales genéticos	Híbrido F1 (O × G)	239,3b	867,6b	3,6b
	Ténera (D × P)	171,7a	688,6a	4,0a

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.
Fuente: Ibarra-Ruales & Reyes-Cuesta (2015)

Adicionalmente, en el C. I. El Mira (Tumaco, Nariño), se evaluó en campo el crecimiento en vivero dentro de bolsas plásticas de seis genotipos de palma provenientes del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA: G × G (D × P), O × G F1 (P), O × G F1 (D), O × G RC1, O × G RC2 y O × G RC3 (tabla 6.14) (Loaiza et al., s. f.).

Se aplicaron tratamientos correspondientes a dos ambientes de condiciones de manejo agronómico del vivero, a plantas con etapa previa de previvero de 90 días:

Manejo agronómico tradicional: Se implementaron las prácticas agronómicas comunes utilizadas por los cultivadores en la región de Tumaco, Nariño (sustrato suelo, riego, fertilización, manejo de arvenses, manejo de plagas y enfermedades).

Manejo agronómico modificado: Se siguieron las recomendaciones y prácticas agrícolas generadas por AGROSAVIA y otras entidades y empresa privada, con ajustes en lo concerniente a sustrato (suelo + inclusión abono orgánico), elemento bioestimulante del sistema radical, fertilización edáfica y foliar, y aplicación de productos sintéticos y biológicos como preventivos contra ataques de artrópodos y microorganismos.

Tabla 6.14. Materiales genéticos de palma de aceite evaluados

Materiales genéticos			
Genotipo	N.º	Tipo	Cruzamientos
G1	1	G × G Ténera	*Eg* × *Eg*
G2	2	O × G F1 (P)	*Eo* × *Eg*
G3	3	O × G F1 (D)	*Eo* × *Eg*
G4	4	O × G RC1	(*Eo* × *Eg*) × *Eg*
G5	5	O × G RC2	([*Eo* × *Eg*] × *Eg*) × *Eg*
G6	6	O × G RC3	([{*Eo* × *Eg*} × *Eg*] × *Eg*) × *Eg*

P: Pisífera; D: Dura; *Eg* (G): *Elaeis guineenses; Eo* (O): *Elaeis oleifera.*
Fuente: Loaiza et al. (s. f.)

A los 218 días de la siembra en vivero, se observaron diferencias estadísticas significativas en el desarrollo de las palmas entre ambientes de manejo agronómico (P > 0,05). Todos los genotipos presentaron mejor desarrollo cuando crecieron en ambiente de manejo agronómico modificado (en comparación con el tradicional). El manejo agronómico modificado permitió obtener plantas de mayor biomasa (250,60 g/planta) en relación con el manejo tradicional (154,92 g/planta) (tabla 6.15), y con mayor altura (23,4 cm), diámetro del tallo (6,96 cm), área de sección del pecíolo de la hoja 4 (1,32 cm^2) y área foliar (1,18 m^2), que con el tradicional (17,37 cm, 5,50 m, 0,96 cm^2 y 0,89 m^2, respectivamente). Lo anterior evidencia que las condiciones de manejo agronómico modificado brindan a las palmas un mejor ambiente para su crecimiento y desarrollo, lo cual constituye un aporte al manejo agronómico de los viveros de palma de aceite (Loaiza et al., s. f.).

Tabla 6.15. Valores de biomasa de seis genotipos de palma de aceite en dos ambientes de manejo agronómico del vivero (modificado, tradicional), 218 DDSV, Tumaco, Nariño (Colombia)

Genotipo	Biomasa (g/planta)					
	Raíces		Foliolos		Peso total planta	
	Modificado	Tradicional	Modificado	Tradicional	Modificado	Tradicional
Ténera	90,12a	33,49ab	104,72a	37,62ab	365,73a	127,91ab
O × G F1 (P)	87,69a	41,74a	97,71ab	64,69a	330,8a	208,26a
O × G F1 (D)	84ab	35,46ab	86,04ab	49,5a	303,13a	151,25ab
O × G RC1	48,07cb	25,47ab	71bc	52,81a	221,54b	159,68ab
O × G RC2	17,93c	18,95b	22,47d	18,73b	75,96c	92,36b
O × G RC3	56,52ab	46,45a	56,62c	52,12a	206,47b	190,08ab
Ambientes	64,6a	33,59b	73,09a	45,91b	250,6a	154,92a

DDSV: días después de siembra en vivero más 90 días de previvero.
Nota: Las medias en las columnas seguidas con letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Duncan ($p < 0,05$).
Fuente: Loaiza et al. (s. f.)

Crecimiento y producción en campo

La palma africana (*E. guineensis*) registró crecimiento, desarrollo, producción de racimos y aceite de los tipos Dura y Pisífera del Banco de Germoplasma, y del tipo Ténera (Dura × Pisífera) durante las pruebas de progenies, y para

el cultivar Ténera Corpoica Elmira se determinaron las características morfológicas y productivas.

Se registró crecimiento, desarrollo, producción de racimos y aceite de las palmas nolí (*E. oleifera*) del Bando de Germoplasma y de los híbridos O × G (F1 y RC1) durante las pruebas de progenies (correspondientes a cruzamientos de palma americana [O] con palma de aceite africana [G: tipo Dura o tipo Pisífera]). Para los materiales híbrido F1 O × G Corpoica Elmira e híbrido RC1 ([F1 O × G] × G) se determinaron características morfológicas y productivas. Los resultados anteriores muestran las características híbridas de las progenies Ténera (D × P), F1 O × G y RC1 O × G con respecto a sus parentales, así como las diferencias en crecimiento, desarrollo y producción de racimos y aceite entre materiales Ténera e híbridos O × G, lo que resulta similar a lo observado en otros programas de mejoramiento del mundo.

Para conocer el crecimiento en campo del sistema radical de la palma *E. guineensis* tipo Ténera, se emplearon palmas de uno a 30 años, cultivadas en suelos aluviales del C. I. El Mira (Reyes et al., 1997, 1998). Se observó que la edad de la palma influye significativamente en la altura y el diámetro del estípite a nivel del suelo y en la cantidad y peso de las raíces que produce. También se evidenció que la altura de la palma y el diámetro del estípite a nivel del suelo están directamente asociados con la cantidad y el peso de las raíces primarias del bulbo radical, y que con el avance de la edad, el sistema radical acumula materia seca, se extiende horizontalmente y concentra la mayor parte de las raíces en los primeros 60 cm del perfil del suelo (Reyes et al., 1997).

Por su parte, las raíces primarias, con la edad, presentan una mayor acumulación de materia seca en las capas superficiales del suelo, y distancias horizontales más cercanas al estípite. Las raíces secundarias (secundarias, terciarias, cuaternarias) también se concentran en las capas superficiales, pero a distancias horizontales más alejadas del estípite, y de esta manera forman círculos concéntricos sucesivos alejados del estípite, según la edad de la palma (de 0,0 a 0,50 m para palmas de un año; de 0,0 a 1,50 m para dos años; de 0,0 a 2,0 m para tres años; de 1,0 a 2,5 m para cuatro y cinco años, y de 2,0 a 4,0 m para palmas de diez a 30 años). Lo anterior indica que la ubicación de los fertilizantes se debe modificar según la edad de la

palma, porque la zona del suelo donde se concentra la mayor masa de raíces absorbentes cambia según la edad (Reyes et al., 1997).

El crecimiento del sistema radical de la palma durante los primeros quince años depende de las raíces primarias. Al final de este periodo, las secundarias disminuyen la acumulación de materia seca para las primarias, y a partir de ese momento se presenta incremento para las raíces secundarias, lo que se traduce en un aumento general de la materia seca total del sistema radical (tabla 6.16) (Reyes et al., 1998).

Adicionalmente, se determinó que la acumulación de materia en función del tiempo en raíces de palmas tipo Ténera durante el periodo vegetativo (uno a 30 años), se puede estimar en kg/palma para raíces primarias (Wrp), raíces secundarias (Wrs) y total de raíces (Wtr), con las siguientes ecuaciones (Reyes et al., 1998):

$Wrp = -14{,}209658 + 8{,}567823X - 9{,}127224X^2 - 0{,}000666X^3$ (r^2: 0,91)

$Wrs = -4{,}966425 + 3{,}563283X - 0{,}270290X^2 - 0{,}0066694X^3$ (r^2: 0,95)

$Wtr = -19{,}17605 + 12{,}131176X - 0{,}397522X^2 - 0{,}006028X^3$ (r^2: 0,92)

Tabla 6.16. Tasas de producción de materia seca y de crecimiento relativo de raíces de palma africana de aceite (*Elaeis guineensis*) de 1 a 30 años de edad, Tumaco, Nariño (Colombia)

Tipo de raíces	Rango de tasa de producción de materia seca (kg/palma/año)*	Tasas de crecimiento relativo (kg/kg/año)	
		2 años	27 años
Primarias	0,024 a 8,050	3,33	0,002
Secundarias	0,05 a 6,08	2,26	0,159
Total	3,39 a 10,61	2,99	0,028

Fuente: Reyes et al. (1998)

La determinación de la distribución y dinámica de crecimiento del sistema radical de la palma africana en campo en Tumaco y su metodología (Reyes et al., 1997, 1998) fue aplicada en estudios para la evaluación y monitoreo del daño, y el desarrollo de prácticas de manejo del insecto *Sagalassa valida* (Lepidoptera: Glyphipterigidae), una de las principales plagas que afecta los cultivos de palma de dicha zona, cuyo estado larval alcanza altos niveles de daño a sus raíces (mediante barrenado), lo que da como resultado reducciones significativas de la producción. De esta manera, se pudo concluir que un nivel superior a 5 % de raíces primarias afectadas en la muestra es el criterio para aplicar medidas de manejo (Chávez et al., 2000; Peña et al., 1997).

Para conocer el tipo de plantas asociadas al cultivo de la palma *E. guineensis*, se evaluaron ocho plantaciones de Tumaco, con su respectivo reconocimiento e identificación taxonómica (Cantuca et al., 2001). Se encontraron 255 especies (agrupadas en tres subclases: doce pteridófitas, 163 dicotiledóneas y 80 monocotiledóneas), pertenecientes a 52 familias y 30 órdenes botánicos, y en ellas sobresalen las siguientes familias: Polypodiaceae (ocho especies), Amaranthaceae (cinco especies), Piperaceae (seis especies), Urticaceae (cinco especies), Papilionaceae (once especies), Euphorbiaceae (doce especies), Malvaceae (seis especies), Melastomataceae (ocho especies), Verbenaceae (cinco especies), Labiatae (nueve especies), Solanaceae (siete especies), Compositae (19 especies), Gramineae (37 especies), Cyperaceae (quince especies) y Commelinaceae (cinco especies). El mayor número correspondió a la familia Gramineae con 37 especies.

Por clases taxonómicas, en las zonas de calle y plateo del cultivo, predominaron las dicotiledóneas simpétalas, que se caracterizan por ser las más avanzadas evolutivamente dentro de la subclase de las dicotiledóneas. Por el contrario, en el borde del cultivo predominaron las monocotiledóneas, por ser esta una zona con alta incidencia de luz directa, sin interferencia del dosel del cultivo. Las gramíneas son mencionadas desde tiempo atrás como plantas altamente nocivas para el cultivo de la palma de aceite, y el conocimiento de su taxonomía es de vital importancia para implementar un eficiente manejo de estas plantas arvenses en el cultivo. Sin embargo, cabe señalar que 67 % de las plantas arvenses y ruderales encontradas, es decir, 170 especies de los grupos apétalo, polipétalo, simpétalo y del género *Cyperus*, pueden servir como refugio de insectos benéficos, depredadores

de plagas. Esto se da porque en los grupos mencionados existen nectarios extraflorales, y porque el género *Cyperus* tiene una inflorescencia en forma de umbela compuesta, que suministra alimento, todo lo cual puede contribuir al desarrollo de estrategias de manejo biológico de plagas del cultivo.

Complementario a lo anterior, se estudió el comportamiento del desarrollo vegetativo y la producción de la palma *E. guineensis* (Ténera Corpoica-ICA), con tres tipos de cultivo de cobertura, durante los primeros cuatro años de la etapa de cultivo (Peña et al., 2005). Las palmas con cobertura de leguminosa kudzu (*Pueraria phaseoloides*) presentaron los menores valores de emisión foliar (EF), emisión de inflorescencias masculinas (EIM), emisión de inflorescencias femeninas (EIF) y de medida de la circunferencia de la base del pseudoestípite (MCBE). Las palmas con cobertura de gramíneas arrojaron los mayores valores de EIM. A su vez, las palmas con cobertura de arvenses de hoja ancha mostraron los mayores valores de MCBE y de las características de producción variables número (NR) y peso de racimos (PR).

Los resultados obtenidos indicaron la necesidad de desarrollar estudios a largo plazo para determinar asociaciones específicas de cara a la explotación competitiva de la palma de aceite en cada zona productora. También mostraron que en una plantación de palma de aceite, la cobertura vegetal requiere ser manejada como cultivo, sobre todo en los tres primeros años. Por otra parte, el mayor número y peso de racimos que presentaron las palmas con cobertura de arvenses locales de hoja ancha en relación con las otras coberturas (incluida la leguminosa introducida kudzu) ratifica la necesidad de profundizar en este estudio.

Con el propósito de identificar alguna diferencia morfológica entre palmas afectadas y no afectadas por la PC, de forma que esto sirviera para detectar de manera temprana las palmas potencialmente susceptibles a este disturbio, se realizaron, en dos plantaciones de Tumaco, estudios de características morfológicas cualitativas y cuantitativas en palmas *E. guineensis* tipo Ténera de diferente origen genético. No fue posible identificar una característica o descriptor cualitativo o cuantitativo capaz de diferenciar una palma afectada de una no afectada (Bastidas et al., 2008b; Enríquez et al., 2008).

En la palma de aceite, la madurez de los racimos, así como el tiempo que se dedica para su localización durante el proceso de cosecha, son factores que afectan la producción y calidad del aceite. Por lo tanto, se deben establecer mecanismos de control antes de la cosecha o prácticas de polinización, a fin de incrementar la rentabilidad del sistema de producción con base en factores de calidad y cantidad de extracción de aceite, así como cortar los racimos en el punto óptimo de madurez.

Para el caso del material *E. guineensis* en Tumaco, con palmas Ténera (Corpoica-ICA) de nueve años se demostró que tres diferentes prácticas de control previo de la calidad de la cosecha de racimos (sin diferencias entre ellas) permiten extraer más cantidad de aceite de buena calidad en la planta extractora y reducir significativamente el volumen de fruta suelta, lo que facilita la recolección. Por razones económicas, se concluyó que la práctica de revisión semanal para identificar y marcar flores en antesis y cosechar 180 días después de la marcación fue la mejor. La razón es que así se controlan los ciclos y la calidad de la cosecha. Además, se demostró que al registrar oportunamente la antesis, es posible hacer una estimación confiable acerca del número de racimos y la producción/cosecha con seis meses de anticipación (Vera et al., 1998).

Para el caso de materiales O × G en Tumaco, con palmas de los híbridos interespecíficos F1 O × G Corpoica Elmira, después de cuatro a cinco años de sembrados en campo, obtenidos por cruzamiento entre *E. oleifera* tipo Cereté y *E. guineensis* (Bastidas et al., 2007), se determinó que con ciclos de polinización asistida de 21 días y frecuencias de cosecha del mismo lapso, se obtienen racimos con 23,9 % de extracción de aceite en laboratorio.

Por otra parte, se observó que si se cosecha 190 días después del primer día de polinización, con ciclos de 21 días de polinización o conteo de flores en antesis, se evita la cosecha de racimos verdes, que son los que castigan la tasa de extracción de aceite. Las variables aceite en pulpa fresca de frutos partenocárpicos (AcPFFP), aceite en racimo con base en frutos partenocárpicos (AcRFP) y aceite en racimo (AcR) fueron sensibles a los ciclos de cosecha, por lo tanto, su grado de expresión es un indicador de madurez y/o calidad de la cosecha.

Estudios ecofisiológicos básicos

En Tumaco se llevó a cabo un estudio ecofisiológico preliminar de la especie *E. guineensis* (D × P) en vivero y campo (Reyes, 2010). En las condiciones de bosque húmedo tropical de Tumaco, se lograron adaptar y validar metodologías para el uso de sensores sicrométricos de suelo y tejido foliar tipo Wescor, a fin de determinar el potencial hídrico de suelos y del tejido foliar de la palma africana (Reyes, 2010; Wescor, 2006a, 2006b). Asimismo, se determinó el intercambio de gases (fotosíntesis neta y transpiración) y de variables relacionadas, mediante equipo portátil LI-6200 (Licor, Nebraska, EE. UU.) (Reyes, 2010). Además, se obtuvo lo siguiente:

- Curvas de asimilación diaria de CO_2 (Fn), de palmas Ténera en vivero (edad: siete meses; hoja 4), que crecen en suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L.) y suelo arenoso franco (A. Fr.), de los materiales Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia) (figuras 6.4, 6.5).
- Curva de asimilación diaria de CO_2 (Fn) de palmas Ténera (Deli × Yangambi Corpoica-ICA) de 15 meses de edad en campo, que crecen en suelo arenoso franco (A. Fr.) (figura 6.6).
- Curva diaria de potencial hídrico de la hoja (ψ_h) en palmas Ténera (Deli × Yangambi Corpoica-ICA), en vivero (edad: ocho meses; hoja 4) y campo (edad: 18 meses; hoja 9) (figura 6.7).
- Curva diaria de oferta energética de la RFA (figura 6.8) y curva diaria del DPV (figura 6.9), a la altura de la hoja 9 en palmas Ténera (Deli × Yangambi Corpoica-ICA) de 22 a 28 meses de edad.
- Curva diaria de transpiración (T), con crecimiento en suelo franco-arcillo-limoso, de los cultivares Ténera en etapa de vivero (edad: ocho meses; hoja 4), Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia) (figura 6.10).

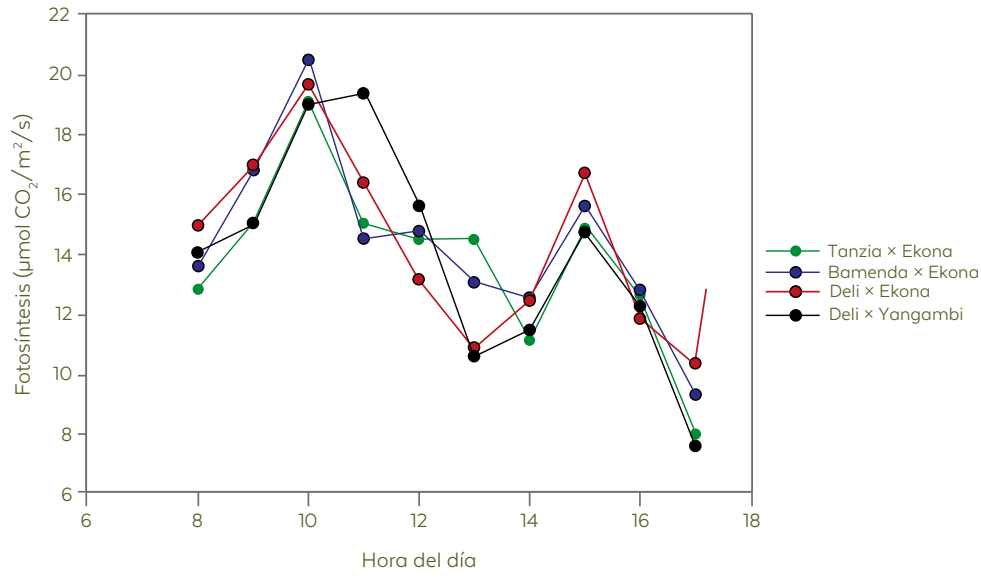


Figura 6.4. Curva diaria de asimilación de CO_2 (Fn) en vivero de cuatro cultivares de palma africana Ténera en suelo franco-arcillo-limoso, Tumaco, Nariño (Colombia).
Fuente: Reyes (2010)

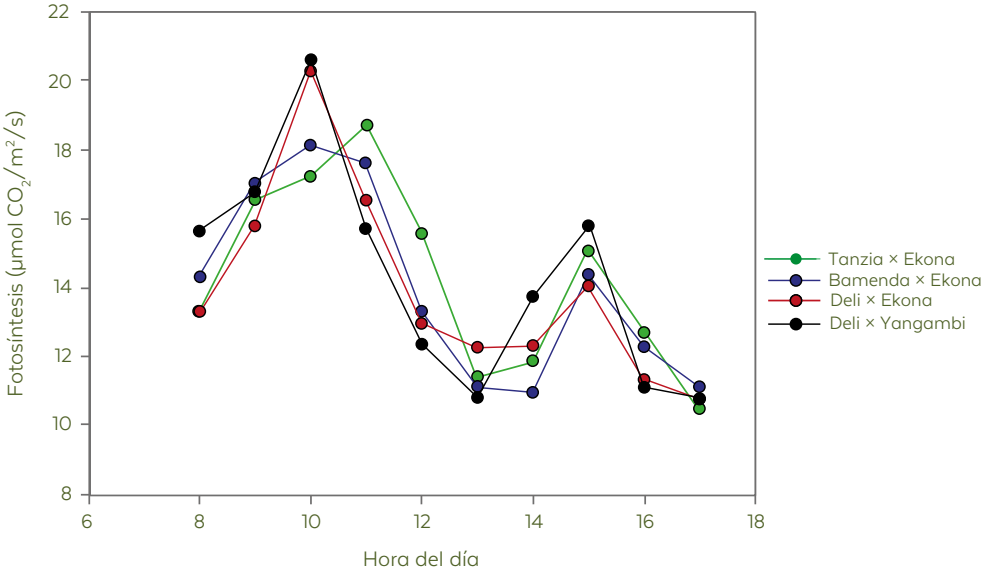


Figura 6.5. Curva diaria de asimilación de CO_2 (Fn) en vivero de cuatro cultivares de palma africana Ténera en suelo arenoso franco, Tumaco, Nariño (Colombia).
Fuente: Reyes (2010)

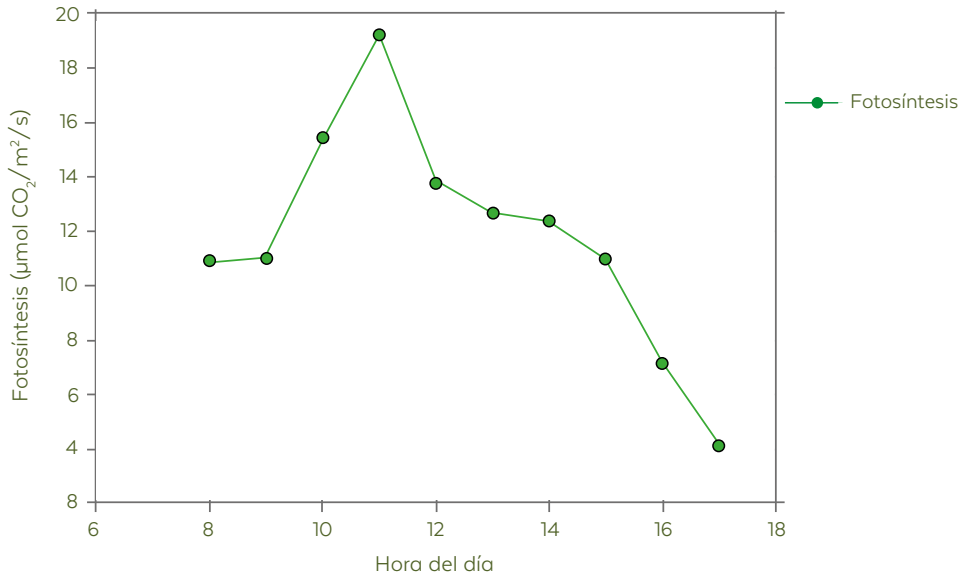


Figura 6.6. Curva diaria de asimilación de CO_2 (Fn) en campo de palma africana Ténera en suelo arenoso franco, Tumaco, Nariño (Colombia).

Fuente: Reyes (2010)

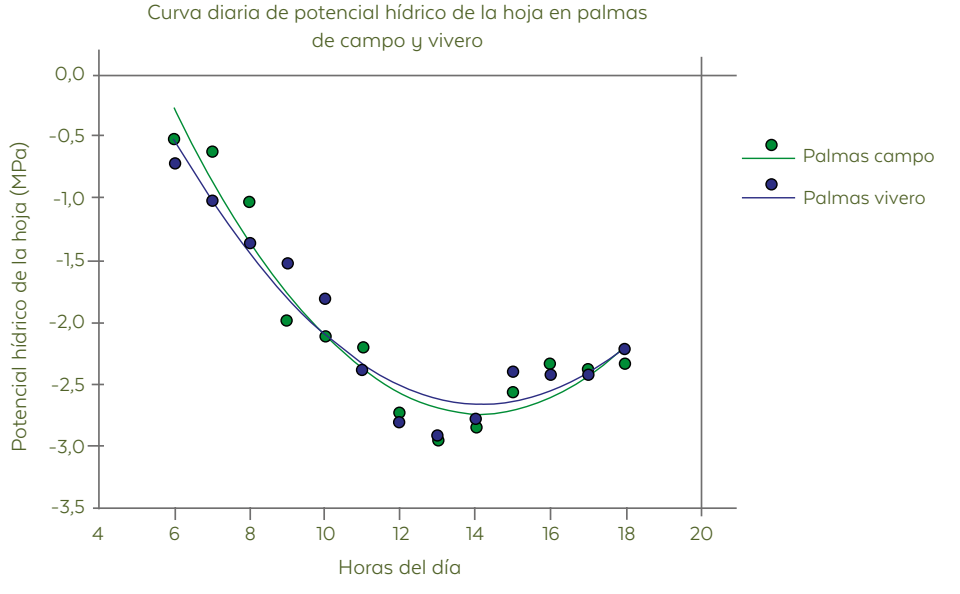


Figura 6.7. Curva diaria de potencial hídrico de la hoja (ψ_h) en palma africana de aceite Ténera, etapas vivero y campo, Tumaco (Colombia).

Fuente: Reyes (2010)

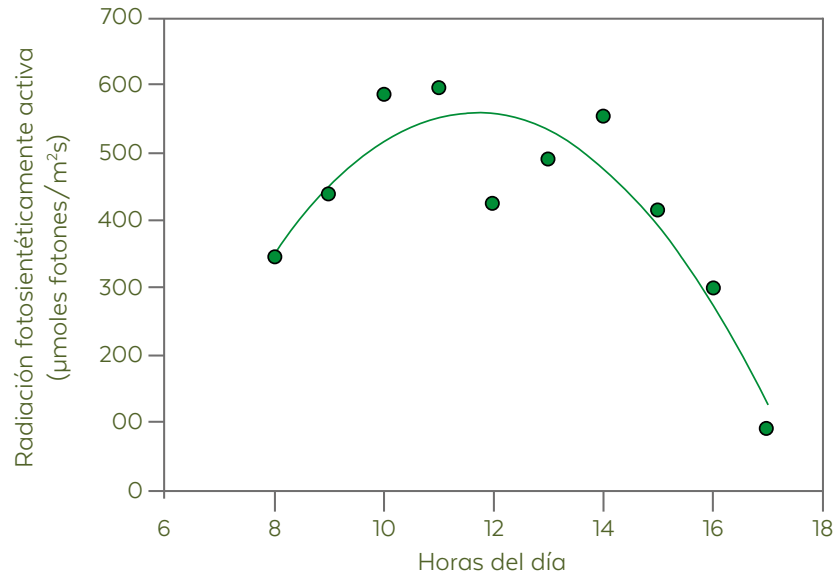


Figura 6.8. Curva diaria de radiación fotosintéticamente activa (RFA) en cultivos de palma africana de aceite Ténera, etapas vivero y campo, Tumaco, Nariño (Colombia).
Fuente: Reyes (2010)

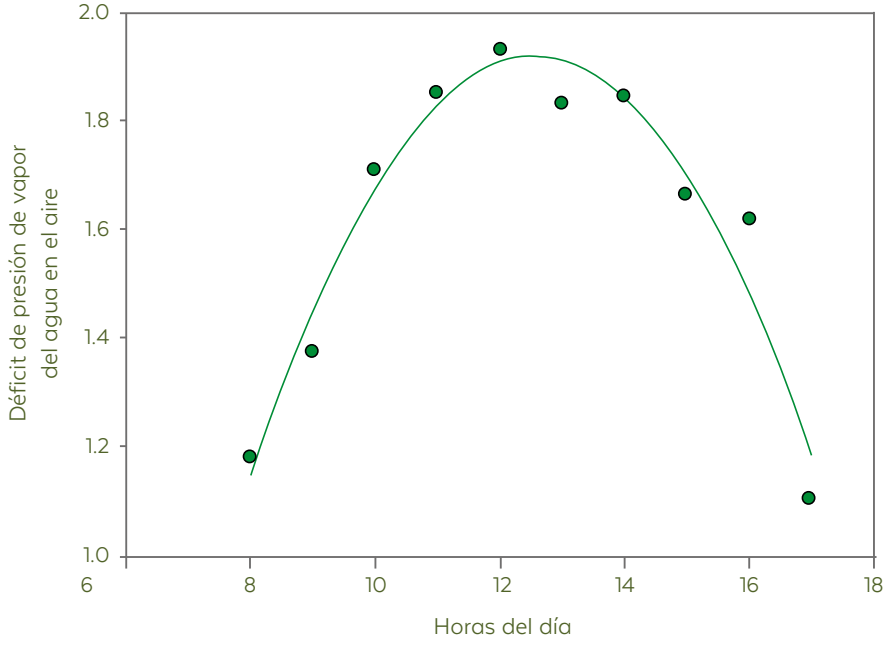


Figura 6.9. Curva diaria de déficit de presión de vapor de agua en el aire (DPV) en cultivos de palma africana de aceite Ténera, etapas de vivero y campo, Tumaco, Nariño (Colombia).
Fuente: Reyes (2010)

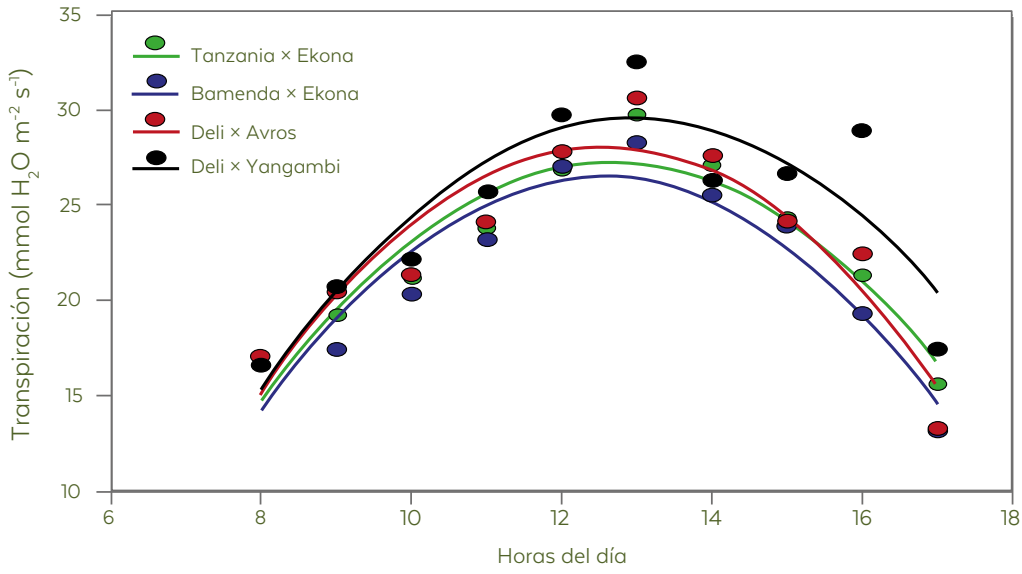


Figura 6.10. Curva diaria de transpiración (T) de palma africana de aceite Ténera, etapa de vivero, en suelo franco-arcillo-limoso, Tumaco, Nariño (Colombia).

Fuente: Reyes (2010)

La fisiología de la producción biológica de la palma de aceite y la humedad del suelo

Se estudió en casa de malla (Tumaco, Colombia), el secado por evaporación (EVP) de dos suelos utilizados en el cultivo de palma de aceite, que difieren en sus características físicas, uno de textura franco-arcillo-limosa (F. Ar. L.) y el otro arenoso franco (A. Fr.) (tabla 6.9) (Reyes, 2012; Reyes et al., 2013a).

Se determinó que el proceso de secado en los dos suelos se ajustó a dos modelos matemáticos: uno potencial decreciente ($\psi_s = a{\cdot}X^b$), que relaciona el potencial hídrico del suelo (ψ_s) con el tiempo. Esto permitió obtener las curvas de secamiento de los dos suelos por EVP a dos profundidades (10 y 20 cm), útiles para estudios de disponibilidad de agua en el suelo. Las tasas de secamiento de los dos suelos, con respecto al tiempo, fueron mayores para el suelo A. Fr. que para el F. Ar. L. El total de agua utilizable por las plantas (ψ_s = −0,03 a −1,50 MPa) se agotó en el suelo A. Fr. a los 73 días de secado, mientras que el suelo F. Ar. L., a los 100 días, aún disponía de gran parte del agua utilizable por las plantas, al presentar ψ_s = −0,55 MPa (figura 6.11).

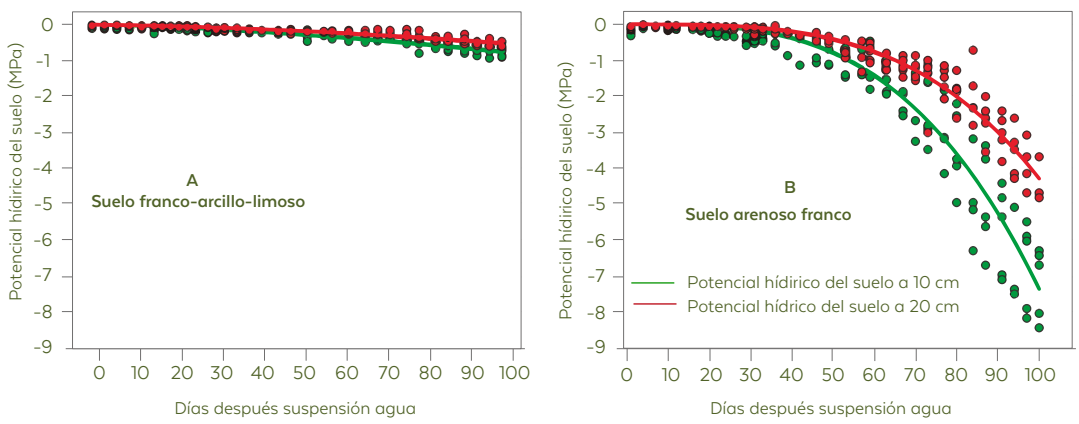


Figura 6.11. Relación entre potencial hídrico del suelo a 10 y 20 cm de profundidad en función del tiempo, Tumaco, Nariño (Colombia). a. Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L.); b. Suelo arenoso-franco (A. Fr.).

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013a)

Los resultados muestran que, durante el secado de los dos suelos por evaporación, en condiciones naturales de Tumaco, el franco-arcillo-limoso mantiene más tiempo el agua utilizable por las plantas. Lo anterior favorece en este suelo la disponibilidad de agua para las palmas en épocas prolongadas de poca precipitación, mientras que en el suelo arenoso franco se incrementa el déficit de humedad. Por el contrario, épocas prolongadas de alta precipitación favorecen las condiciones de exceso de humedad en el suelo franco-arcillo-limoso. Los eventos de exceso y déficit de humedad en los suelos pueden afectar la fisiología y producción de racimos de la palma aceite. Esto debe tenerse en cuenta para el manejo agronómico de las plantaciones en Tumaco, donde tales eventos se presentan asociados con los fenómenos climáticos de El Niño y La Niña. Al respecto, se ha demostrado que en Tumaco esas condiciones de estrés hídrico afectan el crecimiento y la producción de racimos (Cadena et al., 2004).

Con los mismos suelos del trabajo anterior (tabla 6.9), en Tumaco se llevaron a cabo tres estudios sobre el comportamiento fisiológico de la palma africana *E. guineensis* tipo Ténera ante diferentes condiciones de humedad del suelo, que se describen a continuación (Reyes, 2012; Reyes et al., 2013a, 2013b, 2014):

Estudio 1. Comportamiento fisiológico de la palma *E. guineensis* conforme el suelo perdía humedad por evapotranspiración (EVPT). Se emplearon palmas de vivero de ocho meses de edad de las variedades comerciales Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia) (Reyes, 2012; Reyes et al., 2013a).

El proceso de secado por EVPT de los dos suelos fue similar. Presentaron una mayor pérdida de agua durante los primeros 18 días, lo que contrasta con lo observado cuando se secaron por EVP, cuyo periodo de secado fue diferente según el tipo de suelo.

El proceso de secado por EVPT se ajustó a un modelo exponencial decreciente ($\psi_s = Yo + ae^{(-b \cdot X)}$) ya que el ψ_s se relacionó con el tiempo de secado y se obtuvieron las curvas y velocidades de secamiento de los dos suelos. Durante el proceso de secado se observó una relación entre el potencial hídrico de la hoja (ψ_h) y el ψ_s a 20 cm de profundidad. También se identificó una relación entre la Fn y el ψ_s a la misma profundidad (figura 6.12), lo que demuestra que el contenido de humedad en el perfil del suelo a 20 cm de profundidad es determinante para la actividad fotosintética de la palma de aceite. Esto indica que valores de humedad del suelo cercanos a la capacidad de campo de este último (–0,03 MPa) favorecen la movilidad del agua en el continuo suelo-planta-atmósfera, lo que mantiene la apertura estomática y por tanto el intercambio gaseoso. Este tipo de respuesta también se observó en otros estudios sobre palma de aceite y palma de cocotero (Cornaire et al., 1993; Gomes & Prado, 2007). Además, se evidenció el comportamiento diferencial de la Fn de todas las variedades ante la disminución del potencial hídrico del suelo a 20 cm de profundidad: Bamenda × Ekona y Tanzania × Ekona > Deli × Yangambi > Deli × Avros (figura 6.12).

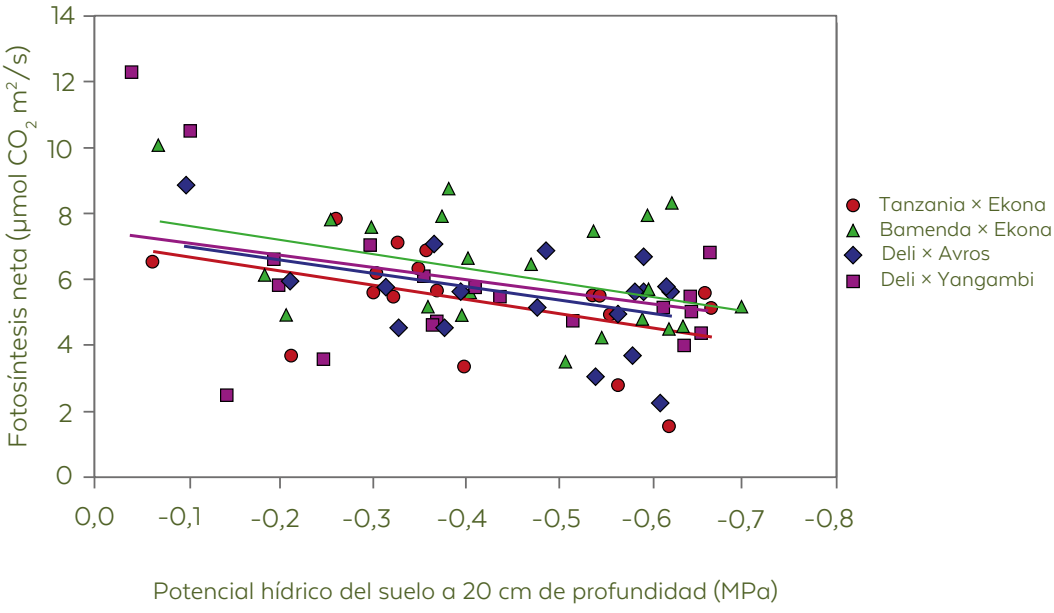


Figura 6.12. Relación entre el potencial hídrico del suelo y la fotosíntesis neta, entre las diez y once horas, durante 70 días de secamiento del suelo, para plantas de cuatro cultivares de palma africana de aceite Ténera (Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi), sembradas en dos tipos de suelo: franco-arcillo-limoso y arenoso franco (Tumaco, Colombia).

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013a)

Se observó que, conforme el suelo se secaba, disminuía la Fn y la transpiración (T) de los cuatro cultivares en ambos suelos. Se evidenciaron diferencias entre suelos y entre cultivares para la Fn. La mayor Fn se presentó en el suelo arenoso franco y en la variedad Bamenda × Ekona (tabla 6.17). La variedad Deli × Yangambi (Corpoica-ICA) mostró los mayores valores de T en los dos suelos. La eficiencia en el uso del agua (EUA) presentó diferencias entre genotipos, con mayor valor para la variedad Bamenda × Ekona.

Tabla 6.17. Valores de fotosíntesis neta (Fn) determinada en la hoja 4 de palma africana Ténera en vivero, por tipo de suelo y genotipo, Tumaco, Nariño (Colombia)

Suelos		Genotipos	
Tipos de suelo	**Fotosíntesis neta** ($\mu mol\ CO_2/m^2/s$)	**Cultivares**	**Fotosíntesis neta** ($\mu mol\ CO_2/m^2/s$)
Franco-arcillo-limoso	5,36a	Tanzania × Ekona	5,48ab
		Bamenda × Ekona	5,91a
Arenoso franco	5,70b	Deli × Avros	5,27b
		Deli × Yangambi	5,45ab

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Duncan ($p < 0,05$)
Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013a)

Estudio 2. Comportamiento fisiológico de la palma africana Ténera sometida a oferta estable de diferentes contenidos de humedad en el suelo: 45, 40, 35 y 30 % de humedad volumétrica (HV). Se emplearon palmas de la misma edad y cultivares del estudio anterior (Reyes, 2012; Reyes et al., 2013b).

Solo para la actividad fotosintética se evidenciaron efectos significativos del tipo de suelo, contenido de humedad del suelo y genotipos. En el suelo arenoso franco se registraron los mayores valores de Fn (figura 6.13a). Las variedades Bamenda × Ekona y Tanzania × Ekona exhibieron los mayores valores de Fn en el suelo arenoso franco a lo largo del tiempo (figura 6.13c), mientras que la variedad Tanzania × Ekona presentó el mayor valor de Fn en el suelo franco-arcillo-limoso (figura 6.13b). Los resultados evidenciaron la relación entre actividad fotosintética de las palmas y contenido de humedad del suelo. Los mayores valores de Fn se obtuvieron para las HV de 45 % (ψ_s = −0,042 MPa) y 40 % (ψ_s = −0,250 MPa). Por otra parte, se observó que el contenido de humedad del suelo fue el factor determinante para el crecimiento y producción biológica de las palmas, como lo es para su actividad fotosintética (figura 6.14), y los mejores resultados los propició la HV de 45 % (ψ_s = −0,042 MPa).

Esto demuestra la gran sensibilidad de la actividad fotosintética y del crecimiento de la palma de aceite ante disminuciones en la humedad del suelo, aun dentro del ámbito del agua rápidamente aprovechable por las plantas. Esta es una característica con potencial utilizable en la selección temprana de genotipos tolerantes a estrés hídrico.

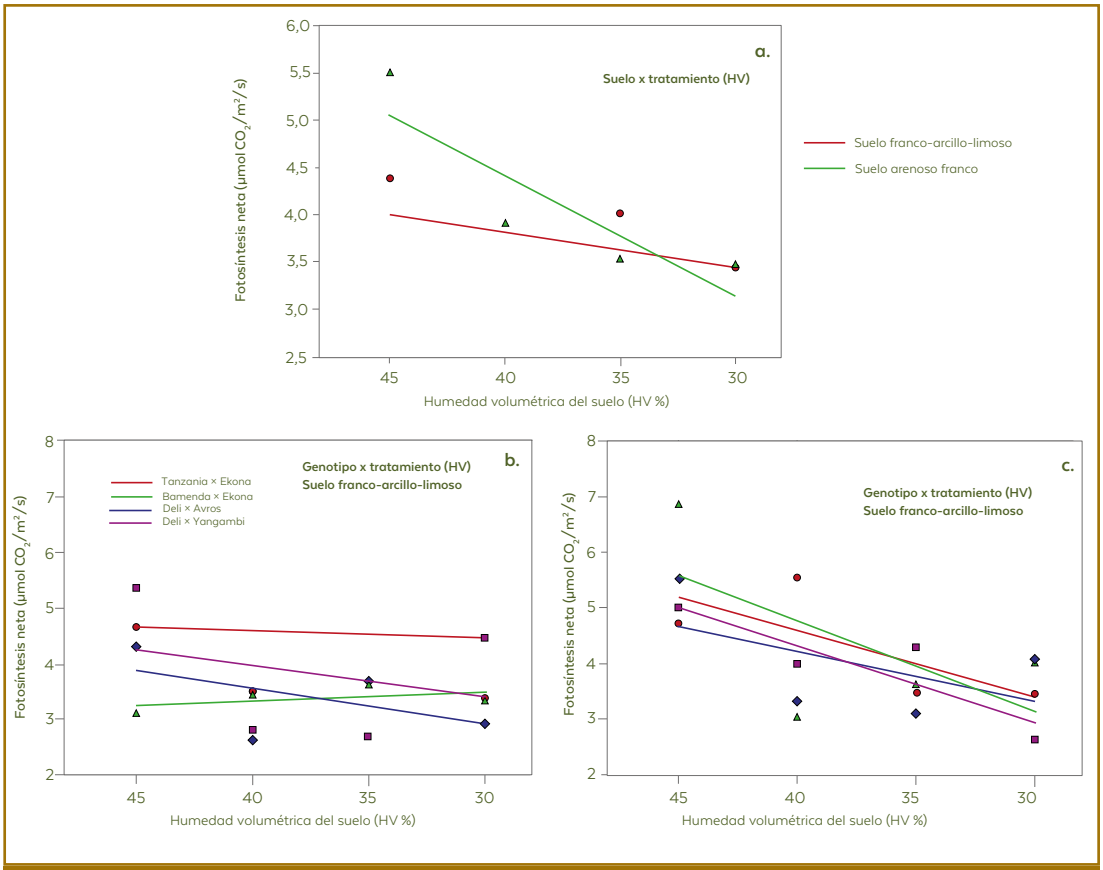


Figura 6.13. Comportamiento de la fotosíntesis neta (diez a once horas) en cuatro cultivares de palma africana de aceite Ténera para distintas interacciones, Tumaco, Nariño (Colombia). a. Suelo × tratamiento; b. y c. Genotipo × tratamiento (variedades: Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi; suelos: franco-arcillo-limoso y arenoso franco).

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013b)

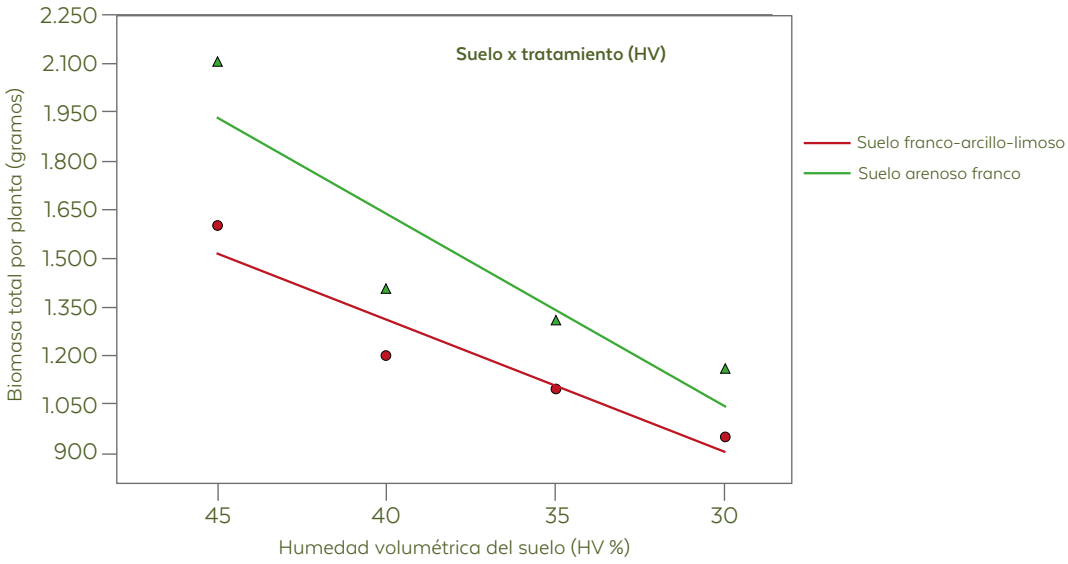


Figura 6.14. Valores de la biomasa total de la palma para la interacción suelo × tratamiento en plantas de cuatro cultivares de palma africana de aceite Ténera (Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros, Deli × Yangambi) en dos tipos de suelo, Tumaco, Colombia.

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013b)

Estudio 3. Comportamiento fisiológico de la palma *E. guineensis* sometida a diferentes condiciones de oferta hídrica en campo en Tumaco: déficit hídrico (DH), exceso hídrico (EH), testigo relativo (TR) y testigo absoluto (TA). Se emplearon palmas Ténera de 22 meses de edad en campo, de los cultivares comerciales Tanzania × Ekona, Deli × Yangambi (Costa Rica), Deli × Avros y Deli × Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia) (Reyes, 2012; Reyes et al., 2014).

Se observaron respuestas diferentes de la Fn en las variedades según la textura del suelo y su contenido de humedad. En el suelo F. Ar. L. cada variedad requiere un contenido de humedad específico para expresar su mayor Fn. Por su parte, en el suelo A. Fr. las variedades expresaron su mayor Fn en presencia de similar contenido de humedad, que correspondió a la condición de déficit hídrico (tabla 6.18).

Tabla 6.18. Fotosíntesis neta (Fn) determinada en la hoja 9 en estudio de campo sobre el efecto de la disponibilidad de agua en la fisiología de la palma africana Ténera en suelo arenoso franco (A. Fr.), Tumaco, Nariño (Colombia)

Contenidos de humedad en el suelo	Fotosíntesis neta ($\mu mol\ CO_2/m^2/s$)
Déficit hídrico	12,82a
Exceso hídrico	11,52b
Testigo absoluto	10,41c
Testigo relativo	10,86c

Nota: Las medias seguidas de la misma letra no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Duncan ($p < 0,05$)
Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2014)

Los resultados anteriores evidencian que en Tumaco la humedad del perfil del suelo es determinante para la actividad fotosintética y la producción biológica de la palma africana, lo cual demuestra que el sistema de producción tradicional aplicado en Tumaco, deficiente en prácticas de manejo de la humedad del suelo, requiere modificaciones para hacer un uso más eficiente de la capacidad fotosintética de la especie y, por consiguiente, mejorar su productividad biológica y tener plantaciones competitivas y sostenibles.

Por otra parte, los anteriores estudios permitieron verificar que es adecuado el uso de la tecnología psicrométrica en condiciones de bosque húmedo tropical de Tumaco, para cuantificar el potencial hídrico del suelo y el potencial hídrico del tejido foliar de la palma de aceite. Además, indicaron que, en Tumaco, la capacidad de campo de la especie con respecto a la humedad del suelo (balance aeración-humedad) puede corresponder al ámbito de ψ_s de −0,040 MPa a −0,250 MPa.

También se verificó la existencia de cuatro cultivares comerciales de palma africana con respuesta diferencial de tolerancia a disminución de humedad del suelo: Bamenda × Ekona y Tanzania × Ekona, mayor tolerancia; Deli × Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia), tolerancia intermedia, y Deli × Avros, mayor susceptibilidad. Esto puede facilitar la siembra comercial de la especie en regiones tropicales cultivadas y potenciales que presenten condiciones de estrés hídrico durante alguna época del año, donde la falta de materiales tolerantes constituye una limitante. Además, permitió conocer

el comportamiento fisiológico ante la disminución de la humedad del suelo para el cultivar de palma africana Ténera Deli x Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia), obtenido con los recursos genéticos del Banco de Germoplasma de palmáceas de Colombia.

Respecto a variables con capacidad discriminante, para la palma africana joven se determinaron tres fisiológicas y tres morfológicas, sensibles y asociadas a los cambios en la disponibilidad de agua en el suelo. Las fisiológicas corresponden a potencial hídrico de la hoja (ψ_h), fotosíntesis neta (Fn) y transpiración (T), y las morfológicas a biomasa de la base peciolar, área foliar por planta y biomasa del raquis. Estas variables pueden utilizarse en programas de selección temprana (vivero) de genotipos con tolerancia al estrés hídrico, dado que se pueden evaluar mediante la metodología desarrollada en los estudios descritos.

Lo anterior hace más eficiente el proceso de investigación, porque disminuye el tiempo de estudio y la cantidad de variables para evaluar. Esta observación, y la identificación de cultivares *E. guineensis* con respuesta diferencial a la disminución de la humedad del suelo, facilita la siembra comercial de la especie en regiones tropicales cultivadas y potenciales que presenten condiciones de estrés hídrico durante alguna época del año. En relación con las condiciones ambientales de Tumaco, se estableció que en algunos periodos del día existen limitaciones de RFA y DPV para la actividad fotosintética de la palma. Cuando los valores de RFA y DPV son de alta frecuencia, diferentes a los adecuados para la actividad fotosintética de la especie, como una RFA de 400 a 1.150 µmol fotones/m^2/s y una DPV de 0,5 a 1,7 KPa (Dufrêne & Saugier, 1993; Enríquez et al., 2008; Henson, 1993; Henson et al., 2005; Noor et al., 2005).

En cuanto a la actividad fotosintética de todos los cultivares, se observó mayor predominio de valores bajos de Fn en palmas jóvenes dentro de casa de malla (Fn de 2,5 a 9,2 µmol $CO_2/m^2/s$) y en campo (Fn < 15 µmol $CO_2/m^2/s$), cuando se compararon con lo informado en Malasia, Indonesia y Nigeria sobre palmas jóvenes (entre 7,9 y 9,50 µmol $CO_2/m^2/s$) y palmas en campo (ámbito de 3 a 27 µmol $CO_2/m^2/s$) (Harun & Noor, 2006; Lamade et al., 2009; Noor et al., 2005), lo que se asocia a limitaciones ambientales de RFA y DPV para Fn determinadas en la misma investigación. Sin embargo,

a pesar de estas limitaciones ambientales, para la expresión de la Fn se observaron diferencias e interacciones entre los factores involucrados (suelos, contenidos de humedad del suelo y genotipos). Además, se determinó que la región dispone de abundante oferta ambiental de CO_2 en la atmósfera (concentración > 390 ppm), lo que puede contribuir a incrementar la eficiencia fotosintética de la palma de aceite en Tumaco. En Malasia se ha demostrado que la especie presenta aclimatación y respuesta positiva de su actividad fotosintética al incremento de la concentración de CO_2 en la atmósfera (400, 800, 1200 ppm), en términos de aumento significativo de la tasa de fotosíntesis, rendimiento cuántico de la asimilación de carbono, eficiencia en el uso del agua, y aumento de la biomasa total y el área foliar (Ibrahim et al., 2010; Jaafar & Ibrahim, 2012).

Lo anterior indica que en la palma *E. guineensis*, en particular para la región palmera de Tumaco, existe potencial para la fijación de CO_2 y la producción biológica mediante la fotosíntesis de las palmas. El potencial puede ser explotado con el suministro de condiciones ambientales favorables, como adecuada humedad del suelo, para que exista una eficiente actividad fotosintética y producción biológica. Por lo tanto, para que en la zona palmera de Tumaco se puedan compensar en parte las limitaciones derivadas de la oferta ambiental local de RFA y DPV en la actividad fotosintética de la palma, y hacer más eficiente el proceso fotosintético, es indispensable suministrar a la palma contenido de humedad en el suelo (balance aeración-humedad), correspondiente al ámbito determinado de ψ_s (−0,040 MPa a −0,250 Mpa). Al respecto, se conoce una experiencia exitosa en Quevedo (Ecuador), región tropical de baja oferta energética (brillo solar de 2,5 horas/día), donde el adecuado suministro de agua a las palmas compensó en parte la baja oferta energética disponible para su producción biológica y permitió mantener la productividad de los racimos (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003; Mite et al., 1999).-

La investigación descrita por Reyes (2012) aporta nuevo conocimiento científico sobre el comportamiento fisiológico de la palma *E. guineensis* frente a la disponibilidad de agua en el suelo, en las condiciones de bosque húmedo tropical de Tumaco. Este conocimiento no existía y resulta útil para el desarrollo de un nuevo sistema de producción de la especie en dicha región, ante la necesidad urgente de modificarlo, por la pérdida de productividad

y sostenibilidad (30.000 ha) del sistema tradicional, que es deficiente en prácticas de manejo de la humedad del suelo. Se trata, además, de un conocimiento que puede extenderse a otras regiones de bosque húmedo tropical donde se cultiva la palma africana de aceite.

Lo anterior permite indicar que en Tumaco, como requisito para tener plantaciones productivas y sostenibles de la palma *Elaeis guineensis*, se debe modificar o rediseñar el sistema tradicional de producción. Esta modificación debe incluir, entre otras, las siguientes acciones: 1) efectuar una selección adecuada de suelos y sembrar cultivares adaptados a la oferta ambiental de la región; 2) evitar la exposición de las palmas a eventos de estrés hídrico en el suelo; 3) aplicar prácticas de adecuación y manejo de suelos que favorezcan y permitan la disponibilidad de agua para las palmas, dentro del ámbito de potencial hídrico del suelo determinado en esta investigación como favorable para la actividad fotosintética y el desarrollo de la especie; 4) establecer una red de estaciones meteorológicas automáticas que permita registrar y monitorear la oferta ambiental local y disponer de esta información de manera oportuna, lo que es de utilidad para el análisis de factores ambientales relacionados con la productividad biológica y la predisposición a disturbios fisiológicos en la palma de aceite, y 5) llevar a cabo una zonificación agroecológica para el cultivo, mediante acciones como la zonificación climática por balance hídrico y el estudio detallado de suelos, tal como ya se realizó en Brasil (Ramalho et al., 2010).

Todo lo anterior ratifica que el mejoramiento genético de la palma de aceite en Colombia debe buscar cultivares que se adapten de manera específica a las condiciones agroecológicas tropicales de las diferentes regiones donde se cultiva. También debe buscar un manejo agronómico apropiado, que incluya mantener la humedad del suelo que requieren las palmas. Dado que se trata de la función productiva de una especie vegetal (entendida como su producción de biomasa y su distribución), es necesario conformar la parte de interés económico para el ser humano, la cual está relacionada con los factores que determinan el fenotipo, es decir, con factores genéticos y ambientales y con su combinación (interacción genotipo–ambiente).

Al respecto, se sabe que para la palma africana de aceite los factores limitantes de la productividad son los ambientales (suelo, agua y otros)

y los que la disminuyen (plagas y enfermedades) (Breure, 2003). Por otra parte, la conservación y el incremento de recursos genéticos de las palmas africana (*E. guineensis*) y americana (*E. oleifera*), y su premejoramiento (todo lo cual puede llevarse a cabo en el Banco de Germoplasma de la Nación colombiana), contribuirá al desarrollo de los genotipos que requiere un cultivo comercial sostenible en el país y en otras regiones tropicales de condiciones agroecológicas similares.

Referencias

Alvarado, A., & Sterling, F. (2005). Stress tolerant varieties. ASD *Oil Palm Papers*, 28, 5-20.

Basiron, D. D. Y., Sukaimi, D. J., & Darus, A. (1998). *Oil palm and the environment*. Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).

Bastidas, L. E., Castillo, G. E., & Bastidas, S. (2008a). Contrastes cualitativos entre palmas de aceite sin síntomas y con síntomas de pudrición de cogollo en la zona palmera Occidental. *Revista de Ciencias Agrícolas, 25*(1 y 2).

Bastidas, L. E., Castillo, G. E., & Bastidas, S. (2008b). Observaciones morfológicas en palmas de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) sanas y afectadas por pudrición de cogollo. *Revista Fitotecnia Colombiana, 8*(2), 9-14.

Bastidas, S., Figueredo, P., & Reyes, R. (1993). Obtención de materiales de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) adaptados al trópico latinoamericano. *Revista Palmas, 14*(número especial), 49-56.

Bastidas, S., & Hurtado, L. B. (1992). Palmas prolíficas en la especie *Elaeis oleifera*, una mutación afortunada. *Revista Palmas, 13*(3), 55-60. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/352

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2003a). Avances sobre el comportamiento de los híbridos de primera generación de retrocruzamiento entre palma americana (*Elaeis oleifera*) y palma africana (*Elaeis guineensis*). *Revista Regional Novedades Técnicas, 3*(3), 32-36.

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2003b). Genealogía del germoplasma de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) del proyecto mejoramiento genético de Corpoica. *Revista Palmas, 24*(1), 21-29. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/950?articlesBySameAuthorPage=2

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2004). *Ténera Corpoica El Mira: material de palma de aceite colombiano*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/20560

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2006). Palma de aceite Ténera Corpoica El Mira: alternativa nacional. *Revista Innovación & Cambio Tecnológico, 4*(2 y 3), 47-50.

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Betancourt, C., & Preciado, C. A. (2011). Predicción y control de la cosecha en el híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* en la zona palmera occidental de Colombia. II. Determinación del ciclo de cosecha para obtener racimos con alto contenido de aceite. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 12*(1), 13-20. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num1_art:211

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Pérez, J., & Tolosa, W. (2007). Comportamiento agronómico del cultivar híbrido RC1 de palma de aceite (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) × *Elaeis guineensis*. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8*(1), 5-11. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:77

Benincasa, M. M. P. (1988). *Análise de crescimento de plantas (noções básicas)*. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista (FCAV-UNESP).

Breure, K. (2003). The search for yield in oil palm: Basic principles. In T. Fairhust & R. Hardter (eds.), *Oil palm: Management for large and sustainable yields* (pp. 59-98). Potash & Phosphate Institute (PPI); Oxford.

Bulgarelli, J., Chinchilla, C., & Alvarado, A. (2002). Vegetative growth of a Deli × Avros cross. ASD *Oil Palm Papers*, 24, 24-29.

Bulgarelli, J., Chinchilla, C., Richardson, D. L., & Salas, A. (1993). *Crecimiento en vivero de los materiales Deli × Avros, Deli × Calabar y Deli × Ekona: curvas de referencia*. ASD de Costa Rica.

Cadena, M. C., Devis, D., Málikov, C., Ortiz, J. R., & Pabón, J. D. (2004). En Tumaco: fenómenos del Niño y la Niña: eventos ENOS y su relación con el clima y la producción de palma de aceite. *Revista Palmas, 25*(4), 46-62. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1013

Cantuca, S., Quevedo, E., Peña, E., & Checa, O. (2001). Reconocimiento taxonómico de plantas asociadas con la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en plantaciones de la zona de Tumaco. *Revista Palmas, 22*(1), 27-37. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/862

Cav Dwell, R.W., Hunt, D., Reid, A., Mensah, B. A., & Chinchilla, C. (2003). Insect pollination of oil palm - a comparison of the long-term viability and sustainability of *Elaeidobius kamerunicus* in Papua New Guinea, Indonesia, Costa Rica, and Ghana. ASD *Oil Palm Papers, 25,* 1-16.

Chaimsohn, F. P., Montiel, M., Villalobos, E., & Urpí, J. M. (2008). Anatomía micrográfica del foliolo de la palma neotropical *Bactris gasipaes* (Arecaceae). *Revista de Biología Tropical, 56*(2), 951-959. https://doi.org/10.15517/rbt.v56i2.5636

Chávez, C., Ortiz, L., Salamanca, J., & Peña, E. (2000). Muestreo de Sagalassa válida en plantaciones de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) de la zona de Tumaco (Nariño), Colombia. *Revista Palmas, 21*(número especial, tomo I), 181-184. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/782

Chee, K. H., Chiu, S. B., & Chan, S. M. (1998). Plántulas de previvero cultivadas en bandejas de macetas. *Revista Palmas, 19*(4), 51-54.

Chinchilla, C., & Richardson, D. (1991). Pollinating insects and the pollination of oil palms in Central America. ASD *Oil Palm Papers,* (2), 1-18.

Chinchilla, C., Umaña, C. H., & Richardson, D. L. (1990). Material de desarrollo avanzado en viveros de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.). I. Espaciamiento y volumen de la bolsa. *Turrialba, 40*(4) 428-439. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10545

Corley, R. (1982). Photosynthesis and productivity. In R. H. V. Corley., J. J. Hardon & B. J. Wood (eds.), *Oil palm researches* (pp. 55-86). Elseiver.

Corley, R. (1983). Photosynthesis and age of oil palm leaves. *Photosynthetica, 17,* 97-100.

Corley, R., & Breure, C. J. (1992). Fruiting activity, growth and yield of oil palm. I. Effects of fruit removal. *Experimental Agriculture, 28*(1), 99-109. https://doi.org/10.1017/S0014479700023048

Corley, R.., Hardon, J. J., & Tan, G. Y. (1971). Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). I. Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica, 20,* 307-315. https://doi.org/10.1007/BF00056093

Corley, R., & Tinker, P. B. (2003). *The oil palm.* Oxford Blackwell Science. https://doi.org/10.1002/9780470750971

Cornaire, B., Daniel, C., Zuily-Fodil, Y., & Lamade, E. (1993). Oil palm performance under water stress: Background to the problem, first results and research approaches: In J. Sukaimi (ed.), *Proceedings of* PORIM *International Palm Oil Congress Agriculture* (pp. 159-172). Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica]. (2012). *Informe bancos de germoplasma vegetal*.

Dufrêne, E., Dubos, B., Rey, H., Quencez, P., & Saugier, B. (1992). Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guineensis* Jacq.) exposed to seasonal soil water deficits. *Acta Oecologica, 13*(3), 299-314.

Dufrêne, E., & Saugier, B. (1989). Field studies of leaf gas exchanges in oil palm tree (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Annals of Forest Science, 46,* 439s-442s. https://doi.org/10.1051/forest:19890598

Dufrêne, E., & Saugier, B. (1993). Gas exchange of oil palm in relation to light vapour pressure deficit, temperature y leaf age. *Functional Ecology, 7*(1), 97-104. https://doi.org/10.2307/2389872

Enríquez, C G., Bastidas, L. E., & Bastidas, P. S. (2008). Contrastes cualitativos entre palmas de aceite sin síntomas y con síntomas de pudrición de cogollo en la zona palmera occidental. *Revista Ciencias Agrícolas, 25*(1-2), 11-24.

Gomes, F. P., & Prado, C. H. B. (2007). Ecophysiology of coconut palm under water stress. *Brazilian Journal of Plant Physiology, 19*(4), 377-391. https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400008

Gutiérrez, M. V., & Villalobos, E. (1996). Estado hídrico de siete genotipos contrastantes de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) durante la época seca en Quepos, Puntarenas, Costa Rica. *Boltec, 29*(1), 20-32.

Hanif, M. H. (2006). Gas exchange of excised oil palm (*Elaeis guineensis*) fronds. *Asian Journal of Plant Sciences, 5*(1), 9-13. https://doi.org/10.3923/ajps.2006.9.13

Hartley, C. W. S. (1983). *La palma de aceite* (E. Maldonado, Trad.). Compañía Editorial Continental.

Harun, M. H., & Noor, M. R. (2006). Canopy Temperature Difference (CTD) for detecting stress in oil palm. *MPOB Information Series, 309,* 1.511-7.871.

Henson, I. E. (1990). Photosynthesis and source sink relationships in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Trans Malaysian Society Plant Physiology, 1,* 165-171.

Henson, I. E. (1991). Adaptation to light environment by leaves of oil palm (*Elaeis guineensis*). *Bulletin Palm Oil Research Institute of Malaysia, 22,* 1-8.

Henson, I. E. (1992). Carbon assimilation, respiration and productivity of young palm (*Elaeis guineensis*). *International Journal of Oil Palm Research and Development, 4*(42), 51-59.

Henson, I. E. (1993). Carbon assimilation, water use and energy balance of oil palm plantation assessed using micrometeorological techniques. In J. Sukaimi (ed.), *Proceedings of* PORIM *International Palm Oil Congress Agriculture* (pp.137-158). Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).

Henson, I. E., Noor, M. R., Harun, M. H., Yahya, Z., & Mustakim, S. N. A. (2005). Stress development and its detection in young oil palms in north Kedah, Malaysia. *Journal of Oil Palm Research, 17,* 11-26.

Hong, T. K., & Corley, R. H. V. (1976). Leaf temperature and photosynthesis of a tropical C3 plant, *Elaeis guineensis*. *Malaysian Agriculture Research Development Institute Research Bulletin, 4*(1), 16-20.

Ibarra-Ruales, L. N., & Reyes-Cuesta, R. (2015). Crecimiento en vivero de las palmas aceiteras *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* y *Elaeis guineensis* × *Elaeis guineensis* en Tumaco Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 16*(2), 239-250. https://doi.org/10.21930/rcta.vol16_num2_art:370

Ibrahim, M. H., Jaafar, H. Z. E., Hann, M. H., & Yusop, M. R. (2010). Changes in growth and photosynthetic patterns of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings exposed to short-term CO_2 enrichment in a closed top chamber. *Acta Physiologiae Plantarum, 32,* 305-313. https://doi.org/10.1007/s11738-009-0408-y

Jaafar, H. Z. E., & Ibrahim, M. H. (2012). Photosynthesis and quantum yield of oil palm seedlings to elevated carbon dioxide. In M. M Najafpour (ed.), *Advances in photosynthesis* (pp. 321-340). Intech Open. https://doi.org/10.5772/26167

Kallarackal, J., Jeyakumar, P., & George, S. J. (2004). Water use of irrigated oil palm at three different arid locations in peninsular India. *Journal of Oil Palm Research, 16*(1), 45-53.

Kushairi, A. (2008). Oil palm cultivation and yield production. In *MPOB Selected readings on palm oil and its uses for palm familiarization programme (POFP)* (pp. 22-46).

Kvet, J., Ondock, J. P., Necas, J., & Jarvis, P. G. (1971). Methods of growth analysis. In Z. Sestak, J. Catsky & P. G. Jarvis (eds.), *Plant photosynthetic production: Manual of methods* (pp. 343-391). The Hague, W. Junk.

Lamade, E., & Setiyo, I. (1996). Variation in maximum photosynthesis of oil palm in Indonesia: Comparison of three mosphologically contrasting clones. *Plantaction, Recherche, Développement, 3*, 429-438.

Lamade, E., Setiyo, I., Girard, S., & Ghashghaie, J. (2009). Changes in $^{13}C/^{12}C$ of oil palm leaves to understand carbon use during their passage from heterotrophy to autotrophy. *Rapid Communications in Mass Spectrometry, 23*(16), 2586-2596. https://doi.org/10.1002/rcm.4169

Loaiza, L. O. A., Moreno, C. L. P., & Reyes, C. R. (s. f.). *Evaluación de seis genotipos de palma de aceite en dos condiciones de manejo agronómico en fase de vivero, en Tumaco, Nariño* [Manuscrito en preparación].

Marschner, H. (1986). *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press.

Mite, F., Carrillo, M., & Espinosa, J. (1999). Influencia de la fertilización y el riego sobre el desarrollo, nutrición y rendimiento de la palma africana en Ecuador. *Informaciones agronómicas,* (36). http://www.buecke.com.br/public/upload/arquivo/buecke/Influencia%20de%20la%20Fertilizacion%20y%20el%20Riego%20sobre%20el%20Desarrollo,%20Nutricion%20y%20Rendimento%20de%20la%20Palma%20en%20Ecuador-0ed5d.pdf

Mutert, E. W. (1997). *La palma aceitera, el cultivo dorado de los trópicos* [Informaciones agronómicas n.º 29]. Instituto de la Potasa y el Fósforo (Inpofos).

Ng, S. K. (1972). *The oil palm, its culture, manuring and utilisation*. International Potash Institute. https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/the_oil_palm-its_culture-manuring_and_utilisation.pdf

Noor, M. R., Ismail, M. R., Harun, M. H., & Mahmood, M. (2005). Leaf study and gas exchange of commercial D × P y PS.1 oil palm seedling. In Malasyian Palm Oil Board (ed.), *Proceeding of agriculture, biotechnology and sustainability conference: PIPOC 2005, International Palm Oil Congress* (pp. 833-837).

Owen, B. E. (1996). Palma africana. En R. Guerrero Riascos (ed.), *Fertilización de cultivos de clima cálido* (pp. 178-219). Monómeros.

Paramananthan, S. (2003a). Best practices for oil palm cultivation - land selection and management. *The Planter, 79*(926), 311-323.

Paramananthan, S. (2003b). Land selection for oil palm. In T. Fairhust & R. Hardter (eds.), *Oil palm: Management for large and sustainable yields* (pp. 27-57). Potash and Phosphate Institute (PPI); Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC); International Potash Institute (IPI).

Patiño, V. M. (1977). El corozo o noli (*Elaeis oleifera* [HBK] Cortés ex wessels boer), recurso natural oleaginoso de Colombia. *Cespedesia, 6*(21-22), 7-63. https://www.inciva.gov.co/storage/Clientes/INCIVA/Principal/imagenes/contenidos/13013-CESPEDESIA%20Vol%2006%20No%2021-22%20Ene%20-%20Jun%201977-.pdf

Peña, R. E., Reyes, C. R., & Bastidas, P. S. (1997). Evaluación de prácticas agronómicas para la recuperación de palmas de aceite afectadas por el insecto *Sagalassa valida* Walker. *Revista Palmas, 18*(4), 35-38.

Peña, R. E., Reyes, C. R., & Bastidas, P. S. (2005). Evaluación del comportamiento de la etapa juvenil de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) bajo tres tipos de cultivo de cobertura en Tumaco (Nariño). *Revista Regional Novedades Técnicas, 6*(6), 26-30.

Preciado, C. A. (2010). *Predicción y control de calidad en la cosecha del híbrido interespecífico entre palma nolí* Elaeis oleifera *y palma de aceite* Elaeis guineensis *en la zona palmera occidental* [Tesis de grado]. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.

Preciado, C. A., Bastidas, S., Betancourt, C., Peña, E., & Reyes, R. (2011). Predicción y control de la cosecha en el híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* en la zona palmera occidental de Colombia. I. Determinación del periodo de madurez para obtener racimos con alto contenido de aceite. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 12*(1), 5-12. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num1_art:210

Ramalho, A., Ferreira da Motta, P. E., De Freitas, P. L., & Texeira, W. G. (eds.). (2010). *Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia*. Embrapa Solos.

Reyes, R. (2010). *Proyecto "Respuesta fisiológica y productiva de diferentes genotipos de material comercial Ténera de palma aceitera a variaciones en la disponibilidad de agua: fase I"* [Informe técnico final]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Reyes, R. (2012). *Respuesta fisiológica de la palma aceitera (*Elaeis guineensis *Jacq.) a la disponibilidad de agua en el suelo* [Tesis de doctorado]. Universidad de Costa Rica, San José.

Reyes, R., Bastidas, S., & Peña, E. (1997). Distribución del sistema radical de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Tumaco, Colombia. *Revista Palmas, 18*(3), 49-57.

Reyes, R., Bastidas, S., & Peña, E. (1998). Crecimiento del sistema radical de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Tumaco, Colombia. *Revista Palmas, 19*(3), 31-35.

Reyes, R., Riaño, N., Chinchilla, C., & Ibarra, N. (2013a). Physiological response of young oil palms (*Elaeis guineensis*) to soil drying by evapotranspiration in two soil types under greenhouse conditions and possible implications for spear rot development. *Oil Palm Papers, 40*, 1-15.

Reyes, R., Rodríguez, N., Peña, E., & Bastidas, S. (2008). Crecimiento en vivero de materiales comerciales de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Tumaco, Colombia. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 9*(2), 12-18.

Reyes, R., Rodríguez, N., Peña, E., Bastidas, S., & Ibarra, N. (2009). *Evaluación del crecimiento de cuatro genotipos de palma aceitera (*Elaeis guineensis *Jacq.) en dos tipos de suelo de diferentes características físicas. I. Vivero* [Memorias]. Segundo seminario "Experiencias en la inversión en ciencia y tecnología para el sector agropecuario colombiano", Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), Bogotá.

Reyes, R., Riaño, N., Chinchilla, C, & Ibarra, N. (2013b). Physiological response of young oil palms (*Elaeis guineensis*) to a steady water supply under greenhouse conditions. *Oil Palm Papers, 41*, 1-11.

Reyes, R., Riaño, N., Chinchilla, C., & Ibarra, N. (2014). Physiological response of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) to soil water availability under field conditions in Tumaco, Colombia. *Oil Palm Papers, 42*, 11-20.

Rodríguez, W., & Leihner, D. (2006). *Análisis de crecimiento vegetal: fisiología de la producción de cultivos tropicales*. Editorial Universidad de Costa Rica.

Rodríguez, W., & Villalobos, E. (1998). *Correlación de la fotosíntesis foliar y el coeficiente de extinción de luz con la productividad de siete cruces de palma aceitera (*Elaeis guineensis *Jacq.) con características contrastantes del dosel, el crecimiento y la productividad.* Editorial Universidad de Costa Rica.

Romero, H. M. (2018). Polinización artificial de híbridos O × G para la obtención de frutos partenocárpicos y la producción de aceite (*Elaeis oleifera* Cortés × *Elaeis guineensis* Jacq.) [Nota técnica]. *El Palmicultor,* (558), 15-18.

Romero, H. M., Caicedo, A., & Ayala, I. (2020). Utilización de ácido 1-naftalenacético (ANA) para incrementar la producción de aceite en palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) [Nota técnica]. *El Palmicultor,* (576), 13-15. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/12981

Setyio, I. E., Subronto, & Lamade, E. (1996). Photosynthetic rate of the three different D × P clones: The sensitive to vapor pressure deficit in North Sumatra. In D. Ariffin (Ed.), *Proceedings of the 1996* PORIM *International Palm Oil Congress: Competitiveness for the 21st Century. Agriculture Conference* (pp. 421-426). Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).

Sinisterra, K. X., Caicedo, A., Castillo, C., Ceballos, D., Palacio, M., Cortés, Í., Camperos, J., Ayala, I., & Mosquera, M. (2019). Validación del punto óptimo de cosecha en el cultivar híbrido interespecífico O × G Corpoica (Cereté × Deli y Cereté × Yangambi). *Ceniavances, 189.* https://www.researchgate.net/publication/353691896_Validacion_del_punto_optimo_de_cosecha_en_el_cultivar_hibrido_interespecifico_OxG_Corpoica_Cerete_x_Deli_y_Cerete_x_Yangambi

Suresh, K., & Nagamani, C. (2006). Variation in phosynthetic rate and associated parameters with age of oil palm leaves under irrigation. *Photosynthetica, 44*(2), 309-311. https://doi.org/10.1007/s11099-006-0023-8

Suresh, K., & Reddy, V. M. (2005). Photosynthesis and age of juvenile oil palm leaves under irrigated conditions. *Indian Journal of Oil Palm, 5*(1, 2).

Tomlinson, P. B. (1990). *The structural biology of palms.* Oxford.

Umaña, C. H., Chinchilla, C., & Richardson, D. L. (1990). Material de desarrollo avanzado en viveros de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.). II. Condiciones del sustrato. *Turrialba, 40*(4), 440-451. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10546

Vallejo, G. (1987). El material plantable de palma africana de aceite. *Revista Palmas, 8*(2), 15-29.

Vera, M., Bastidas, S., Peña, E., & Espinosa, N. (1998). Control previo de la calidad de cosecha en palma africana de aceite (*Elaeis guineensis*) en la región de Tumaco. *Revista Palmas, 19*(1), 9-15.

Villalobos, E. (2001). Absorción, transporte y balance hídrico en la planta. En R. E. Villalobos (ed.), *Fisiología de la producción de los cultivos tropicales: procesos fisiológicos básicos* (Fascículo I, pp. 120-157). Editorial Universidad de Costa Rica.

Villalobos, E., Marín, W., & Berninger, F. (2001). Transporte y partición del carbón. En R. E. Villalobos (ed.), *Fisiología de la producción de los cultivos tropicales: procesos fisiológicos básicos* (Fascículo I, pp. 83-117). Editorial Universidad de Costa Rica.

Wescor. (2006a). *Model number L-51(-SF) and L-51A (-SF) leaf hygrometer/psychrometer. Instructions for use with wescor water potential systems* [Document number: Man/L-51]. Wescor Enviromental Products División.

Wescor. (2006b). *PST-55(-SF) and PCT-55(-SF) soil hygrometer/psychrometer: Instructions for use with wescor water potential systems* [Document number Man/PST-55 and PCT-55]. Wescor Enviromental Products Division.

Wood, B. J. (2007). Opportunities for oil palm R & D in further meeting the challenges of the new dynamics. *The Planter, 83*(972), 155-177.


T1



Capítulo 7

Palinología de las palmas de aceite africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) y americana (Elaeis oleifera [Kunth] Cortés)

Vanessa Rendón C., Clara Inés Medina C., Mario Lobo A.,
Silvio Bastidas P., Ramiro Fonnegra G.

La palma de aceite es un cultivo de polinización cruzada. Es una especie monoica, con flores masculinas y femeninas que se producen alternativamente en la misma planta (figura 7.1) (Corley & Tinker, 2003; Fedepalma, 2006; Ho et al., 2016; Sambanthamurthi et al., 2009). La polinización de las palmas en la mayoría de los casos es entomófila (Labarca & Narváez, 2009). Son polinizadas por insectos, pero el viento adquiere un papel preponderante cuando las plantas crecen (Syed, 1979, citado por Bulgarellil et al., 2002; Setiawati et al., 2018; Teo, 2015). La anterior afirmación se basa en características como los colores de las superficies internas de las brácteas y las flores de olor anisado. Algunos investigadores consideran que el polen de *Elaeis oleifera* es de mal olor (Ngando-Ebongue et al., 2012), mientras que otros reportan que varias especies de palma emiten flores fuertemente perfumadas, que son polinizadas por escarabajos (Ervik et al., 1999).

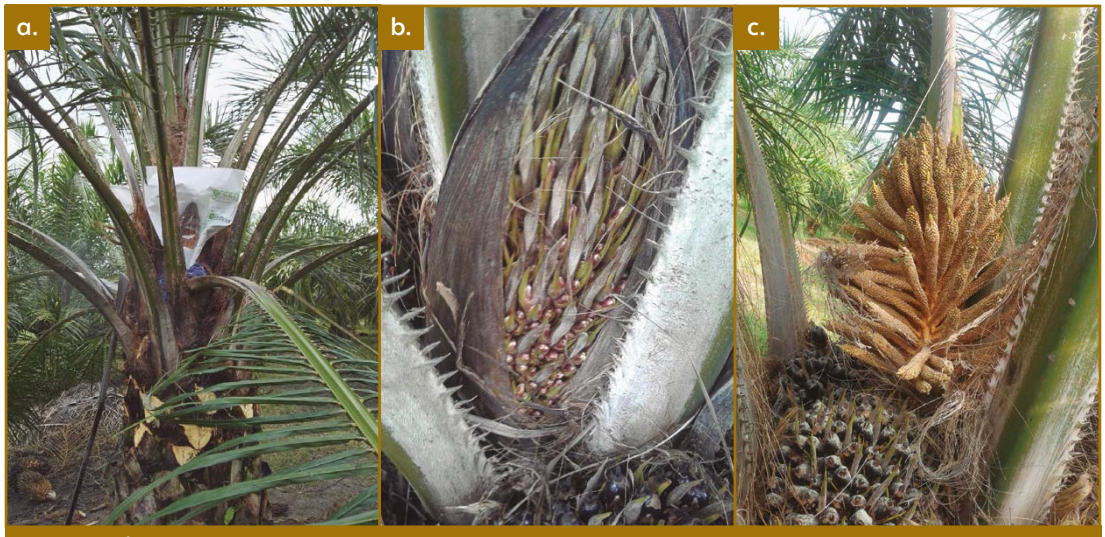


Figura 7.1. Inflorescencias de palma de aceite. a. Aislamiento de inflorescencia; b. Inflorescencia femenina; c. Inflorescencia masculina.
Fotos: Omar Osorio, Leidy Paola Moreno

Una buena producción de los cultivos requiere una polinización efectiva para la formación de frutos y sus semillas. En un racimo normal, se espera que alrededor de 60 % de los frutos sean fértiles (flores que fueron polinizadas); el resto son partenocárpicos (frutos atrofiados, sin desarrollo) (Bulgarellil et al., 2002). En la palma americana y en los híbridos interespecíficos O × G se presentan porcentajes de partenocarpia superiores a 60 % (Corley & Tinker, 2003; Hormaza & Romero, 2012; Moura et al., 2008; Pinto et al., 2019).

La polinización asistida se utiliza para incrementar los rendimientos en plantas jóvenes (Hartley, 1988) y para desarrollar los frutos en los híbridos O × G, los cuales tienen alto grado de esterilidad femenina y masculina (Bastidas et al., 2007; Baudouin al., 1984; Forster et al., 2017; Rosero et al., 2017; Ruiz et al., 2015). Esta rutina consiste en la aspersión de polen sobre las inflorescencias femeninas receptivas (antesis estadio 607, escala fenológica BBCH) (Hormaza & Romero, 2012), con lo cual se obtiene una óptima fecundación y se incrementa la productividad en los primeros años de cosecha (Jácome, 2015). Lo anterior indica que toda la información que se desarrolle sobre el grano de polen (viabilidad, crecimiento del tubo polínico, forma de almacenarlo, entre otros datos) es indispensable para el procedimiento de fecundación de los óvulos (Abdelgadir et al., 2012). Al respecto, cabe anotar

que la polinización no solo se ha llevado a cabo a nivel intraespecífico en la palma africana (*E. guineensis)*, sino también en el nivel interespecífico, en los híbridos *Elaeis oleifera* × *E. guineensis*.

Determinar la morfología polínica de las especies *Elaeis guineensis* y *Elaeis oleifera*

Para describir la forma de los granos de polen de ambas especies, se aplicó la técnica de acetólisis de Erdtman (Fonnegra, 1989). Consiste en una hidrólisis ácida del material polínico, con la cual se degrada la intina y el protoplasma del grano de polen y solo permanece la pared externa de esporopolenina. Con la técnica, la pared se vuelve transparente y permite el paso de la luz, lo que facilita la observación de los detalles de estructura y morfología para posterior descripción (Fonnegra, 1989).

Las mediciones se llevaron a cabo a los dos días de ejecutada la técnica, en un microscopio con aumento de 100x, con aceite de inmersión. Para medir los caracteres morfológicos al azar se tomaron al menos 25 granos de polen, en tres placas, a fin de lograr uniformidad en la muestra. La especie *Elaeis guineensis* (Dura) (figura 7.2) presentó las siguientes características:

- *Unidad polínica:* mónada.
- *Tamaño:* mediano (37,8-45,9), $\bar{x}$ = 41,9 µm.
- *Simetría:* radial.
- *Forma:* triangular, cóncava.
- *Aberturas:* tricótomos, sulcados; sulcos con $\bar{x}$ = 56,4 µm de longitud × 7,2 µm de ancho.
- *Exina:* microrreticulada, retículos nítidos solo con objetivo de inmersión; exina total: $\bar{x}$ = 5,6 µm; nexina: $\bar{x}$ = 1,5 µm; sexina: $\bar{x}$ = 4,3 µm incluido el téctum; téctum: $\bar{x}$ = 1,4 µm de grosor; sexima: semitectada; más nexina que téctum.



Figura 7.2. Forma de los granos de polen *Elaeis guineensis* (Dura).
Foto: Karen Lorena Ballestas

Los granos de polen evaluados de la especie *E. oleifera* (nolí) presentan dos tipos de formas en proporciones relativamente iguales. La primera de ellas tiene las siguientes características (figura 7.3a):

- *Unidad polínica:* mónada.
- *Forma:* dimórfica, con aproximadamente la mitad de los granos rectangulares, prolatos, P/E = 1,47.

- *Tamaño:* mediano, $\bar{x}$ = 47,6 (44,2-50,8) µm de eje polar × 32,3 (27,3-35,6) µm de diámetro ecuatorial.
- *Polaridad:* isopolar, polos obtusos.
- *Aberturas:* trisulcadas, sin margen, sonoaperturadas, $\bar{x}$ = 97,7 µm de longitud × 17,2 µm de ancho.
- *Exina:* $\bar{x}$ = 6,1 µm de grosor; téctum: $\bar{x}$ = 1,8 µm; sexina: $\bar{x}$ = 4,6 µm; nexina: $\bar{x}$ = 1,6 µm.

Las características de aproximadamente la otra mitad de granos de polen de la especie *E. oleifera* evidenciaron las siguientes características (figura 7.3b):

- *Forma:* triangulares, prolatos, P/E = 1,62.
- *Tamaño:* mediano (42,5), $\bar{x}$ = 47,6 (42,5-54,3) µm de polo a polo.
- *Polaridad:* heteropolar, un polo es más ancho, $\bar{x}$ = 37,7 µm, y el otro polo es más estrecho, $\bar{x}$ = 24,4 µm.
- *Diámetro ecuatorial:* $\bar{x}$ = 29,3 µm.
- *Aberturas:* disulcadas, $\bar{x}$ = 98,8 µm de longitud × 18,1 µm de ancho.
- *Exina:* $\bar{x}$ = 5,9 µm de grosor, microrreticulada en ambas formas, con retículos visibles solo con objetivo de inmersión, aunque no son muy nítidos; téctum: $\bar{x}$ = 1,3 µm; sexina: $\bar{x}$ = 4,47 µm; nexina: $\bar{x}$ = 1,5 µm.
- *Simetría:* bilateral.



Figura 7.3. Granos de polen de palma nolí (*Elaeis oleifera*). a. Isopolar; b. Heteropolar.
Foto: Karen Lorena Ballestas

Medios para evaluar la viabilidad del polen de la palma de aceite

Existen diferentes técnicas o métodos para valorar la viabilidad y fertilidad del polen; son *in vitro* e *in vivo*. Entre los más utilizados están la tinción con colorantes y la germinación en medios artificiales.

Germinación de polen de *Elaeis guineensis* y *Elaeis oleifera*

La viabilidad y germinabilidad del grano de polen determinan el porcentaje de cuajado de frutos. Un grano de polen puede ser viable, pero también puede no tener la capacidad de germinar por diferentes factores (genéticos, fisiológicos, ambientales). Estas dos características reflejan el rendimiento del cultivo. La capacidad del polen de germinar y crecer a menudo se denomina "viabilidad", y una alta viabilidad se refleja en un mayor porcentaje de cuajado de frutos y, en última instancia, en un alto rendimiento (Myint et al., 2012). La germinación del grano de polen es un método utilizado para medir la viabilidad del polen fresco o almacenado. Además, la capacidad de fertilización de los granos depende tanto de la germinación como del crecimiento del tubo polínico (Gwata et al., 2003).

Se evaluó la viabilidad del polen mediante germinación en un medio artificial compuesto por 1 % de agar y suplementado con diferentes concentraciones de sacarosa, nitrato de calcio ($Ca\ [NO_3]_2$) y ácido bórico (H_3BO_3) (Tuinstra & Wedel, 2000; Zeng-Yu et al., 2004). La evaluación se llevó a cabo después de la siembra en cajas de Petri e incubación a 35 °C durante dos horas. La germinación fue cuantificada en porcentaje, con la ayuda de un estereoscopio. El polen germinado (figura 7.4) se midió mediante conteo del número total de granos y del número de germinados, en tres campos del estereoscopio, obtenidos al azar en cada caja de Petri. El polen se consideró germinado cuando el largo del tubo polínico fue mayor que el diámetro del grano, de acuerdo con el criterio propuesto por Kakani (2002).



Figura 7.4. Granos de polen germinados en un medio con agar al 1 % y diferentes concentraciones de sacarosa, nitrato de calcio ($Ca[NO_3]_2$) y ácido bórico (H_3BO_3).
Foto: Leidy Paola Moreno Caicedo

Como ocurre con otras especies, el polen de las dos palmas no es fotosensible (Tuinstra & Wedel, 2000; Zeng-Yu et al., 2004). En los seis medios evaluados (tabla 7.1), se encontró que el polen de *E. oleifera* es sensible a concentraciones de ácido bórico superiores a 0,64 µmol/L, y que el de *E. guineensis* no germina con la dosis más alta de nitrato de calcio (1,27 µmol/L) y con la más baja de ácido bórico (0,64 µmol/L). En cambio, con estas dosis se logró la segunda germinación total de *E. oleifera* (tabla 7.1).

Además, la germinación se redujo con altas concentraciones de sacarosa (datos no presentados), y este patrón fue consistente con los resultados obtenidos con el polen de otras especies (Tuinstra & Wedel, 2000; Zeng-Yu et al., 2004).

Tabla 7.1. Porcentaje de germinación del polen de *E. guineensis* y *E. oleifera* en seis medios de crecimiento, con variación de dos de sus componentes y porcentajes de germinación para las especies

Medio	Concentraciones			Germinación *E. guineensis* (%)	Germinación *E. oleifera* (%)
	$Ca(NO_3)_2$ (nitrato de calcio)	H_3BO_3 (ácido bórico)	Sacarosa		
1	0,63 µmol/L	0,64 µmol/L	0,7 mol/L	79,30a	75,73a
2	0,63 µmol/L	1,28 µmol/L	0,7 mol/L	80,56a	57,11c
3	0,63 µmol/L	2,56 µmol/L	0,7 mol/L	80,06a	58,61c
4	0,63 µmol/L	5,12 µmol/L	0,7 mol/L	84,20a	–
5	1,27 µmol/L	0,64 µmol/L	0,7 mol/L	–	66,33b
6	1,27 µmol/L	1,28 µmol/L	0,7 mol/L	77,28a	56,88c

Nota: Entre promedios marcados con la misma letra no hay diferencias estadísticas significativas en cada variable (prueba de comparación de medias de Duncan).
Fuente: Elaboración propia

Para evaluar la interacción del genotipo con el medio de germinación se seleccionaron cuatro materiales de *E. guineensis* (uno Ténera y tres Dura) y uno de *E. oleifera*. En los genotipos Dura y Ténera no se detectaron diferencias entre tratamientos. La germinación del polen de dos genotipos tipo Dura fue de 60,2 y 79,8 %, mientras que la del tercer genotipo Dura varió entre 38,71 y 63,78 %. Por su parte, el genotipo Ténera exhibió una germinación de 13,1 a 26,5 %, considerada baja para este tipo de material.

El polen evaluado de la palma nolí (*E. oleifera*) exhibió germinaciones entre 38,21 y 51,39 % en los tratamientos uno a seis, mientras que en el testigo, con agua y agar, fue de 27,01 %. Estos porcentajes de germinación son inferiores al 94 % del tipo Taisha de la especie *E. oleifera* reportado en la plantación Palmar del Río, Ecuador (Mantilla, 2015).

Medición de la viabilidad del polen, evaluada con sal de tetrazolium y sacarosa

Para la preparación de la solución de tetrazolium se siguieron los procedimientos recomendados por Ista (1999). Cada genotipo se evaluó en una concentración de tetrazolium al 1 y 2 % y con sacarosa al 5 % (Kubilay & Sinan, 1999; Vara Prasad et al., 2006; Zeng-Yu et al., 2004). En un vial se dispusieron 0,25 mL de la solución de tetrazolium y 0,25 mL de la solución de sacarosa al 5 %; posteriormente, se depositó el polen, el cual se mantuvo a una temperatura de 35 °C durante dos horas. Se consideró viable cuando el grano se teñía de rojo-púrpura (Zeng-Yu et al., 2004). El porcentaje de viabilidad del polen teñido fue estimado como porcentaje del polen total (Prasad et al., 2006).

De los tratamientos aplicados, el único en el que se lograron respuestas de tinción fue el de la solución de tetrazolium al 2 % y sacarosa al 5 %, lo cual fue reportado previamente por Zeng-Yu et al. (2004). Al aplicar este tratamiento a genotipos evaluados, se detectaron porcentajes de viabilidad de 34,27, 25,79 y 17,22 % en el polen de los tres tipos Dura, y de 19,30 % en el tipo Ténera. En los granos de polen de la palma nolí, el porcentaje de viabilidad se consideró extremadamente bajo, de 3,43 %, en especial si se compara con la viabilidad obtenida en Costa Rica en palmas de las especies *E. guineensis* y *E. oleifera,* con 61,8 % y 66,9 % respectivamente (Alvarado et al., 1998).

Referencias

Abdelgadir, H. A., Johnson, S. D., & Van Staden, J. (2012). Pollen viability, pollen germination and pollen tube growth in the biofuel seed crop *Jatropha curcas* (Euphorbiaceae). *South African Journal of Botany, 79,* 132-139. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2011.10.005

Alvarado, A., Bulgarelli, J., & Moya, B. (1998). Germinación del polen en poblaciones derivadas de un híbrido entre *Elaeis guineensis* Jacq. y *E. oleifera* H. B. K., Cortés. *ASD Oil Palm Papers, 20,* 35-36.

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Pérez, J., & Tolosa, W. (2007). Comportamiento agronómico del cultivar híbrido RC1 de palma de aceite (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) × *Elaeis guineensis*. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8*(1), 5-11. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:77

Baudouin, L., Schwendiman, J., De Reffye, P., & Pallares, P. (1984). Principes de l'analyse de la fertilité femelle chez l'hybride F1 de palmier à huile *Elaeis melanococca* × *Elaeis guineensis* et chez les espèces parentales: modèle probabiliste et interprétation biologique. *Agronomie, 4*(9), 861-869. https://doi.org/10.1051/agro:19840908

Bulgarellil, J., Chinchilla, C., & Rodríguez, R. (2002). Inflorescencias masculinas, población de *Elaeidobious kamerunicus* (Curculionidae) y calidad de la polinización en una plantación comercial joven de palma aceitera en Costa Rica. *ASD Oil Palm Papers, 24*, 38-41.

Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2003). *The oil palm*. Blackwell Science. https://doi.org/10.1002/9780470750971

Ervik, F., Tollsten, L., & Knudsen, J. T. (1999). Floral scent chemistry and pollination ecology in phytelephantoid palms (Arecaceae). *Plant Systematics and Evolution, 217*, 279-297. https://doi.org/10.1007/BF00984371

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [Fedepalma]. (2006). *La agroindustria de la palma de aceite en Colombia* (2.ª Ed.).

Fonnegra, R. (1989). *Introducción a la palinología*. Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Forster, B. P., Sitepu, B., Setiawati, U., Kelanaputra, E. S., Nur, F., Rusfiandi, H., Rahmah, S., Ciomas, J., Anwar, Y., Bahri, S., & Caligari, P. D. S. (2017). Oil palm (*Elaeis guineensis*). In *Genetic improvement of tropical crops* (pp. 241-290). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59819-2_8

Gwata, E. T., Wofford, D. S., Pfahler, P.L., & Boote, K. J. (2003). Pollen morphology and *in vitro* germination characteristics of nodulating and nonnodulating soybean (*Glycine max* L.) genotype. *Theoretical Applied Genetics, 106*, 837-839. https://doi.org/10.1007/s00122-002-1097-8

Hartley, C. (1988). *The oil palm*. Editorial Longman.

Ho, H., Low, J. Z., Gudimella, R., Tammi, M. T., & Harikrishna, J. A. (2016). Expression patterns of inflorescence- and sex-specific transcripts in male and female inflorescences of African oil palm (*Elaeis guineensis*). *Annals of Applied Biology, 168*(2), 274-289. https://doi.org/10.1111/aab.12263

Hormaza, M. P. A., & Romero, A. H. M. (2012). Escala BBCH para la descripción del desarrollo reproductivo del híbrido O × G. En H. M. Romero Angulo (ed.), *Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite* (pp. 105-120). Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma). https://repositorio.fedepalma.org/bitstream/handle/123456789/107644/Generalidades%20sobre%20la%20morfolog%C3%ADa%20y%20fenolog%C3%ADa%20de%20la%20palma%20de%20aceite.pdf?sequence=1

Ista. (1999). *Reglas internacionales para ensayos de semillas: ensayo topográfico al tetrazolio.* Secretaría de Estado de Agricultura y Ganadería de España.

Jácome, M. (2015). *Cuantificar la polinización asistida en el híbrido interespecifico O × G (*Elaeis oleifera × Elaeis guineensis*) palma de aceite, en la plantación Salamanca Oleaginosas S. A., Tumaco, departamento de Nariño* [Tesis de grado, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño]. http://sired.udenar.edu.co/id/eprint/434

Kakani, V. G., Prasad, P. V. V., Craufurd, P. Q., & Wheeler, T. R. (2002). Response of *in vitro* pollen germination and pollen tube growth of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) genotypes to temperature. *Plant, Cell and Environment, 25*(12), 1651-1661. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00943.x

Kubílay, D., & Sinan, E. (1999). Determination of pollen quality, quantity and effect of cross pollination on the fruit set and quality in the pomegranate. *Turkish Journal of Agriculture and Foresty, 25*, 169-173. https://journals.tubitak.gov.tr/cgi/viewcontent.cgi?article=2333&context=agriculture

Labarca, M, & Narváez, Z. (2009). Identificación y fluctuación poblacional de insectos polinizadores en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el sur del lago de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *Revista Facultad de Agronomía, 26*(3), 305-324. http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-78182009000300001&script=sci_abstract

Mantilla, E. P. (2015). *Evaluación de viabilidad y compatibilidad de polen de distintos materiales híbridos de palma aceitera (*Elaeis oleifera × Elaeis guineensis*)* [Trabajo de grado, Universidad de las Américas, Quito]. http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/4548

Moura, J. I. L., Cividanes, F. J., Santos Filho, L. P., & Valle, R. R. (2008). Polinização do dendezeiro por besouros no sul da Bahia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, 43*(3), 289-294. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000300001

Myint, K. A., Rafii, M. Y., Sheikh-Abdullah, S. A., Lwin, M., Mohd Din, A., & Latif, M. A. (2012). Determination of the optimum pollen germination medium for different fruit form of oil palm (*Elaeis guineensis*). *Journal of Animal & Plant Sciences, 14*(1), 1855-1865.

Ngando-Ebongue, G. F., Ajambang, W. N., Koona, P., Lalu Firman, B., & Arondel, V. (2012). Oil palm. In S. Gupta (ed.), *Technological innovations in major world oil crops* (Vol. 1, pp. 165-200). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0356-2_7

Pinto, S. S., Lopes, R., Da Cunha, R. N. V., Santos Filho, L. P., & Moura, J. I. L. (2019). Produção e composição de cachos e incidência do anel vermelho em híbridos interespecíficos de caiaué com dendezeiro no sul da Bahia. *Agrotópica, 31*(1), 5-16. http://www.abrapalma.org/pt/producao-e-composicao-de-cachos-e-incidencia-do-anel-vermelho-em-hibridos-interespecificos-de-caiaue/

Rosero, G., Santacruz, L., Ríos, A., & Carvajal. S. (2017). Influencia del destape de la inflorescencia en la polinización asistida del híbrido O×G. *Revista Palmas, 38*(1), 49-62. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12044

Ruiz, E., Fontanilla, C. A., Mesa, E., Mosquera, M., Molina, D. L., & Rincón, A. (2015). Prácticas de manejo y costos de producción de la palma de aceite híbrido O × G en plantaciones de la zona oriental y suroccidental de Colombia. *Revista Palmas, 36*(4), 11-29. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11642

Sambanthamurthi, R., Singh, R., Kadir, A. P. G., Abdullah, M. O., & Kushairi, A. (2009). Opportunities for the oil palm via breeding and biotechnology. In S. M. Jain & P. M. Priyadarshan (ed.), *Breeding plantation tree crops: Tropical species* (pp. 377-421). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_11

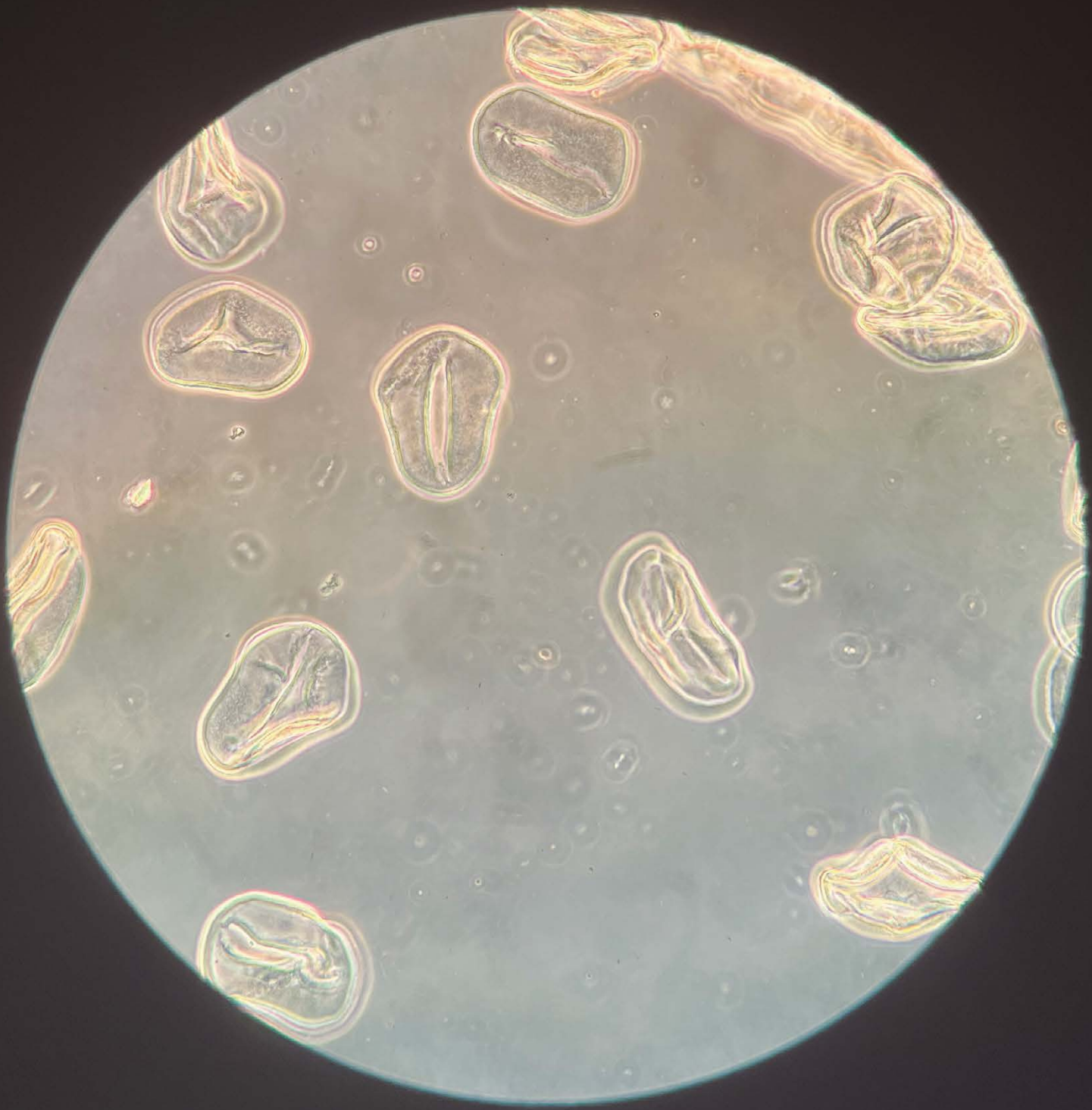
Setiawati, U., Sitepu, B., Nur, F., Forster, B. P., & Dery, S. (2018). *Crossing in oil palm: A manual* (Vol. 6). Centre for Agricultural Bioscience International (CABI). https://doi.org/10.1079/9781786395917.0000

Teo, T. M. (2015). Effectiveness of the oil palm pollinating weevil, *Elaeidobius kamerunicus,* in Malaysia. *Utar Agriculture Science Journa, 1*(4), 41-42. http://eprints.utar.edu.my/1987/1/Effectiveness_of_the_oil_palm_pollinating_weevil%2C_Elaeidobius_kamerunicus%2C_in_Malaysia_-_T.M._Teo.pdf

Tuinstra, M. R., & Wedel, J. (2000). Estimation of pollen viability in grain sorghum. *Crop Science, 40*(4), 968-970. https://doi.org/10.2135/cropsci2000.404968x

Vara Prasad, P. V., Boote, K. J., & Hatwell Allen, L. (2006). Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield and harvest index of grain-sorghum (*Sorghum bicolour* [L.] Moench) are more severe at elevated carbon dioxide due to higher tissue temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology, 139*(3-4), 237-251. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.07.003

Zeng-Yu, W., Ge, Y., Scott, M., & Spangenberg, G. (2004). Viability and longevity of pollen from transgenic and nontransgenic tall fescue (*Festuca arundinacea*) (Poaceae) plants. *American Journal of Botany, 91*(4), 523-530. https://doi.org/10.3732/ajb.91.4.523





Capítulo 8

Papel del mejoramiento genético en el manejo de disturbios fitosanitarios que afectan a las palmas de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. y *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés

Eduardo A. Peña Rojas, Silvio Bastidas Pérez, Rafael Reyes Cuesta

Desde inicios del siglo xx, el objetivo principal del mejoramiento genético en palma de aceite africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) estuvo estrechamente relacionado con el incremento del potencial genético para obtener la máxima productividad en aceite de mesocarpio y de almendra (Hartley, 1983). Al consolidarse esta especie como cultivo comercial en áreas específicas de Asia, África y América, el material genético utilizado fue la variedad Dura, reemplazada luego por el híbrido Dura × Pisífera (conocido como Ténera), con niveles superiores de rendimiento en racimos de fruta fresca, y en cantidad y calidad de aceite. Sin embargo, la presencia de enfermedades y complejos fitosanitarios (EyCF) de difícil diagnosis y manejo en algunas de las regiones donde se establecieron extensivas plantaciones, hizo que tomaran relevancia factores genéticos relacionados con resistencia, tolerancia o susceptibilidad a las principales EyCF, así como otros factores complementarios inherentes a la procedencia u origen del genotipo de cada uno de los nuevos cultivares comerciales de siembra.

A nivel mundial, se registran cerca de 30 EyCF que afectan a las palmas de *E. guineensis* en todos los estados de su crecimiento y desarrollo vegetativo (semilla, vivero, juvenil y adulta en campo). Se destacan aquellas EyCF que ocasionan severas pérdidas económicas y para las cuales, ante la escasa efectividad de prácticas de manejo y control, se ha recurrido al mejoramiento genético para identificar materiales con genes de resistencia o tolerancia. En

América, se han reportado siete EyCF que afectan a la palma de aceite y la principal es el denominado complejo de la pudrición de cogollo (PC), cuyos niveles de incidencia y mortalidad en plantaciones pueden llegar a 100 %. En contraste, tanto en Asia como en África, se han evaluado diferentes materiales *E. guineensis* de diferente procedencia con el objetivo de establecer su comportamiento frente a EyCF presentes en esas regiones y el nivel de respuesta se ha reflejado en niveles de incidencia por debajo del umbral económico. Los programas de mejoramiento genético desarrollados en América se han enfocado en el cruzamiento interespecífico entre *E. guineensis* y la especie de origen americano *Elaeis oleifera* (o nolí, como se denomina comúnmente), presente en diversas regiones del continente y de manifiesta resistencia a la PC. En Colombia, ante los severos brotes de PC ocurridos en diferentes zonas palmeras, se está evaluando el comportamiento de *E. oleifera* y de los híbridos resultantes de los cruzamientos con *E. guineensis* (conocidos como híbridos O × G) frente a la enfermedad. En este capítulo, se describen las principales EyCF que afectan a la palma de aceite en el país, los resultados obtenidos hasta el presente en relación con el comportamiento de los diferentes materiales de palma evaluados y se discute la necesidad de que los programas de mejoramiento genético generen nuevos materiales para afrontar el manejo de los disturbios sanitarios, puesto que su impacto económico amenaza la palmicultura en Colombia y en los demás países de América Latina.

Enfermedades y complejos fitosanitarios (EyCF) que afectan a la palma de aceite en Colombia

En Colombia, las plantaciones de palma de aceite se ven afectadas por siete EyCF principales, conocidas como pudrición de cogollo (PC) (flecha seca en Costa Rica), anillo rojo (AR), marchitez sorpresiva (MS), marchitez letal (ML), mancha anular (MA), anillo clorótico (AC) y pudrición basal del estípite (PBE). Desde su aparición en el país, la PC ha sido la de mayor importancia económica debido a los altos niveles de incidencia registrados por lote o área de cultivo (70-100 %), que se reflejan en una alta mortalidad (hasta 100 %) de las palmas sembradas, lo que ha ocasionado la pérdida total de plantaciones en las zonas afectadas. En la tabla 8.1 se presentan estos disturbios, sus agentes causales y transmisores identificados y las zonas palmeras de Colombia en las cuales se encuentran reportados.

Cabe señalar que la PC, así como el AR, la ML y la MS, se encuentran dentro de las enfermedades declaradas en 2014, mediante Resolución ICA, como de control oficial en el cultivo de palma de aceite dentro del territorio nacional, y para las cuales se establecen medidas fitosanitarias de manejo y control (ICA, 2014).

Tabla 8.1. Enfermedades y complejos fitosanitarios (EyCF) que afectan a las plantaciones de palma de aceite en Colombia (*Elaeis guineensis*, *Elaeis oleifera* e híbridos *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*)

Disturbio sanitario	Agente causal	Agente transmisor reportado	Palma de aceite afectada	Zona palmera con reporte
Pudrición del cogollo (PC)	Más de 25 microorganismos propuestos (*Phytophthora palmivora* propuesto en 2008*)	No identificado	*E. guineensis*, híbrido O × G	Central, oriental, occidental, norte
Marchitez sorpresiva (MS)	*Phytomonas staheli*	*Lincus* spp. (Homoptera: Pentatomidae, Discocephalinae)	*E. guineensis*, híbrido O × G	Central, oriental, occidental, norte
Anillo rojo (AR)	*Bursaphelenchus cocophilus*	*Rhynchophorus palmarum* (Coleoptera: Curculionidae)	*E. guineensis*	Norte, central, oriental, occidental
Marchitez letal (ML)	Posible fitoplasma	Insecto asociado: *Haplaxius crudus*	*E. guineensis*	Oriental, central
Mancha anular (MA)	Posible virus del género *Foveavirus*	No identificado	*E. guineensis*, híbrido O × G	Occidental
Anillo clorótico (AC)	Posible virus del género *Potyvirus*	No identificado	*E. guineensis*, híbrido O × G	Occidental
Pudrición basal del estípite (PBE)	*Ganoderma* spp.	No identificado	*E. guineensis*	Norte, central

* *Phytophthora palmivora* se reporta como responsable en Colombia de las lesiones iniciales de la PC en la palma de aceite (Sarria et al., 2008).
Fuente: Elaboración propia

Pudrición del cogollo (PC)

Reportada en Colombia por primera vez en 1964, en la plantación La Arenosa, zona de Urabá, departamento de Antioquia, donde ocasionó la pérdida de 2.800 hectáreas (Rojas, 1972). En 1970 se registró en la zona palmera oriental, y reapareció en el mismo lugar en 1988, donde ocasionó la erradicación de 18 % de palmas de la plantación La Cabaña. En 1996, en esta zona, se reportaron incidencias de hasta 35 % del área sembrada en 50 % de las plantaciones establecidas en los departamentos de Meta y Casanare (Gómez et al., 1990; Sanchéz, 1990; Santacruz et al., 2004).

En la zona palmera occidental y en plantaciones establecidas en el municipio de Tumaco, el disturbio fue registrado por primera vez en 1986 como un amarillamiento de hojas jóvenes (Jiménez & Peña, 1986), reconocido posteriormente como PC (Goméz et al., 1990; Jimenez, 1991). Durante el periodo 1986-2004 se consideró la PC como un disturbio de bajo impacto económico, porque su incidencia letal fue inferior a 0,1 % en las palmas plantadas. El manejo consistía en erradicar las plantas afectadas y realizar aspersiones de agroquímicos (fungicidas e insecticidas) a las circundantes, acción que contribuía a disminuir el número de nuevos casos, por cuanto se consideraba que se eliminaba la fuente de inóculo o transmisión. Sin embargo, hacia finales de 2005 la incidencia de PC alcanzó niveles de 100 % en algunos lotes de la zona occidental[1], y entre los años 2007 y 2009 alcanzó niveles exponenciales superiores a 55 % en la zona, lo que obligó a la erradicación de las 32.416 ha registradas ante el gremio palmicultor (Fedepalma, 2006; Fontanilla et al., 2014; Hurtado & Rincón, 2009).

En 2006, el equipo de investigación de palmáceas del C. I. El Mira planteó varias hipótesis sobre las causas o factores que contribuían a incrementar la incidencia en la región de Tumaco, hipótesis que se convirtieron en áreas de investigación para desarrollar estrategias que permitieran el manejo y prevención del problema en las plantaciones ya establecidas y en las futuras. Dichas áreas correspondieron a los siguientes factores, posiblemente involucrados en

1 En algunas plantaciones, el umbral de daño económico o punto de quiebra se estableció en 40-50 % de palmas afectadas, y otras soportaron hasta cerca de 60 %. Estos niveles de afectación propiciaron la erradicación del 100 % de las palmas en las plantaciones.

la manifestación de la PC en esa zona del país: 1) agente(s) asociado(s) con la expresión del complejo; 2) susceptibilidad del cultivar sembrado; 3) condiciones climáticas variables; 4) sistema de renovación de plantaciones; 5) inadecuado manejo sanitario de los casos de PC presentados en las plantaciones; 6) inadecuado manejo nutricional del cultivo, y 7) presencia de plantas hospederas e insectos transportadores de organismos asociados con la PC (Peña et al., 2006). Lo anterior contribuyó a orientar las investigaciones sobre la PC que posteriormente se llevaron a cabo en la región y el país.

Para 2019, la PC ya existía en todas las zonas palmeras del país (Tumaco, Puerto Wilches, Llanos Orientales; departamentos de Magdalena, Bolívar, Cesar y La Guajira) y había afectado más de 150.000 ha de cultivo en los últimos 20 años. Se estima que en la última década y media ha ocasionado pérdidas por un valor de 2.476 millones de dólares (Cenipalma, 2018b; Cooman, 2019a, 2019b).

A nivel de Suramérica, la PC es el disturbio sanitario más grave que se ha presentado en las plantaciones de palma de aceite. Su presencia fue reportada en 1974 en Brasil, Ecuador y Surinam y en 1988 en Venezuela. En Surinam, hacia 1992, ocasionó la desaparición de 1.440 ha de cultivo, mientras que en Ecuador, para el año 2000, se registraba la muerte de 5.000 ha en la plantación Palmoriente (Chávez, 1986; Dzido et al., 1978; Franqueville, 2001; Renard & Quillec, 1984; Van de Lande, 1991; Van Slobbe & Rocha de Souza, 1991). Para el año 2017, ya había afectado alrededor de 148.434 ha de las 257.120 sembradas en ese país y ocasionado la pérdida de alrededor de 49.000 ha (Mendoza, 2019).

En Centroamérica se ha presentado en Costa Rica, Nicaragua, Honduras, Guatemala y Panamá. El nombre local en Costa Rica es el de “flecha seca”, en alusión al síntoma más evidente, el secamiento de las flechas, y no a su pudrición (Chinchilla, 2010).

De acuerdo con una revisión de Alegría et al. (2015) sobre anotaciones realizadas por diferentes autores, la PC afectó y continúa afectando plantaciones establecidas en las zonas palmeras de América tropical. Además, su presencia ha sido reportada en plantaciones de Malasia y África occidental.

La PC afecta el cultivo de diferentes formas. Una es letal y predomina en la Amazonía ecuatoriana y brasileña y en algunas zonas palmeras de Colombia y Surinam; la otra no es letal, pero sí es recurrente y tiene una alta tasa de recuperación, y está presente en los Llanos Orientales de Colombia. Al respecto, se resalta la pertinencia de iniciar estudios que permitan comprobar si son expresiones diferentes del mismo disturbio o si se trata de fenómenos patológicos o fisiológicos diferentes (Franqueville, 2001; Rocha et al., 2004).

Agente causal

Entre 1970 y 2010, varios microorganismos han sido reportados como agentes causales o asociados. Se destacan los hongos *Phytophthora palmivora*, *Fusarium* sp., *Thielaviopsis paradoxa*, *Pythium* sp. y la bacteria *Erwinia* sp. (Álvarez et al., 2007; Ayala & Gómez, 2000; Franqueville, 2001; Laing, 2011; Nieto, 1996; Nieto et al., 1996; Ochoa & Bustamante, 1974; Torres et al., 2000, 2010; Vargas, 1992).

Laing (2011) enumera un total de 27 especies de microorganismos, entre ellos 21 hongos y seis bacterias, aislados en Brasil sobre tejidos apicales de palmas afectadas. Otros investigadores han explorado la hipótesis de un virus o micoplasma como agente causal (Dollet, 1991; Perthuis, 1991). Algunos autores cuestionan el hecho de que con ninguno de los microorganismos identificados o propuestos como agentes causales han satisfecho los postulados de Koch (Franqueville, 2001; Laing, 2011).

Investigaciones llevadas a cabo en Colombia indican que el oomiceto *P. palmivora* es el patógeno asociado a la PC en todo el país. Esta especie sería la responsable de las lesiones iniciales, las cuales degradan el tejido y permiten la posterior llegada de otros microrganismos oportunistas, con el resultado de que una amplia gama de microorganismos quedan asociados a la PC (Cenipalma, 2018c; Drenth et al., 2013; Sarria et al., 2008). El nivel de importancia adquirido en Colombia por *P. palmivora* se basa en que su registro ha sido continuo como agente asociado al disturbio en las diferentes regiones palmeras del país. Según Cenipalma (2018c), la detección del microorganismo se hace por aislamiento al procesar tejidos de palmas afectadas procedentes de las zonas palmeras del país. Además, se ha determinado que este patógeno invade los tejidos de las palmas mediante la codificación de proteínas que

son secretadas sobre el tejido vegetal para suprimir la inmunidad de la planta y favorecer la infección (Schornack, 2016). Sin embargo, se requiere un mayor conocimiento del comportamiento de *P. palmivora* para evaluar la efectividad de prácticas de manejo y su aplicabilidad por parte de los productores.

Se ha avanzado en la búsqueda de reguladores biológicos antagónicos de *P. palmivora* en la zona central mediante estudios *in vitro*. Se obtuvieron ocho bacterias nativas, con potenciales de inhibición del patógeno hasta de 54,6 %, y se hizo un aislamiento nativo de *Trichoderma* sp., que presentó una capacidad inhibitoria de 92 % por metabolitos. Adicional a esto, se identificaron como promisorias dos moléculas químicas de fungicidas, *in vitro* e *in vivo* y en condiciones controladas, para incluir dentro del plan de manejo integrado de la PC (Cenipalma, 2018b).

Por otra parte, se identificaron insectos asociados al disturbio, como aquellos que contribuyen a agravar el estado de la palma afectada al ser atraídos por la fermentación de los tejidos de las hojas jóvenes. Es el caso de *Rhynchophorus palmarum* (Coleoptera: Curculionidae), *Herminodes insulsa* (Lepidoptera: Noctuidae) y una especie de la familia Tettigoniidae (Dzido et al., 1978; Torres et al., 2008). Otros insectos, sobre todo especies de Homoptera y Auchenorrhyncha, se consideran sospechosos de estar involucrados en la transmisión de la PC, en especial si se tiene en cuenta que este disturbio es ocasionado por un virus (Perthuis, 1991).

Sobre la relación específica entre la PC y *R. palmarum*, cabe resaltar que este insecto se encuentra en todas las zonas palmeras de Colombia, con mayor presencia en regiones con focos de PC y AR, y que su control disminuye las probabilidades de infestación con estas enfermedades en las plantaciones (Cenipalma, 2018c). Su presencia y daño se incrementan por la fermentación de los tejidos afectados por los diferentes microrganismos, lo que convierte a la palma afectada en una fuente de atracción. Se considera que este artrópodo ocasiona la muerte de la palma mediante daño directo del tejido meristemático, resultado de la alimentación de sus larvas, cuyo sitio de entrada es el área del cogollo afectada por la PC (Cenipama, 2018c).

En cuanto a la asociación entre el picudo y la muerte de las palmas, Chinchilla (2008, 2010) señala que no se puede separar el efecto de la PC del daño que causa el picudo negro. Dadas las condiciones de fermentación existentes en los tejidos y la presencia natural del insecto en las zonas de cultivo, las palmas afectadas por PC son invadidas por el picudo *R. palmarum,* y esto fácilmente puede conducir a la muerte de las plantas. Además, el autor se refiere a la PC como "el complejo pudrición del cogollo", y con ello acepta que la enfermedad no obedece a un modelo simple, sino a un complejo en el que están involucradas otras especies de artrópodos que pueden aumentar el daño en una planta enferma. En Ecuador, se ha reportado que el ataque del barrenador de las raíces *Sagalassa valida* puede debilitar el sistema radical e impedir la toma de nutrientes del suelo, lo que incrementa la susceptibilidad a la PC. En Brasil, el barrenador del estípite *Cyparissius daedalus (Castnia daedalus)* —ahora *Eupalamides guyanensis*— está ligado a la muerte final de las plantas, debido a los daños causados en la corona de la palma, que comprometen el meristemo (Chinchilla, 2010).

La incidencia, severidad y recuperación de individuos afectados por PC se asocian a factores predisponentes como los siguientes: 1) factores del ambiente (ejemplo, afectaciones del sistema radical); 2) prácticas de manejo agronómico, y 3) patógenos oportunistas o insectos (ejemplo, hongos, bacterias, *R. palmarum*). Todas estas variables generan cambios en el desarrollo del problema y en los daños de la plantación (Chinchilla, 2008).

Sin embargo, pese a las evidencias antes descritas sobre los factores bióticos inherentes a la aparición de la PC, los microorganismos e insectos anotados han sido reportados como agentes causales o asociados. Por lo tanto, la PC debe considerarse como un complejo, ya que su manifestación en palmas adultas depende de la confluencia de varios factores que requieren ser evaluados. Entre estos se destacan la susceptibilidad del material sembrado, las condiciones edáficas del lote de siembra, el estado nutricional de las palmas y la interacción del cultivo con las condiciones agroecológicas de la región.

Por otro lado, entre los factores abióticos, la deficiencia de calcio ha sido señalada como causa primordial de la PC. Esta hipótesis indica que la deficiencia transitoria de calcio desempeña un papel importante como agente predisponente causal (Laing, 2011).

También se ha planteado que la PC se origina por el deterioro progresivo de las palmas, condición conocida como "decline" (Chinchilla, 2008; Franqueville, 2001). Las siguientes son algunas características que las pudriciones de flecha y cogollo comparten con los declines: incremento con tendencia lineal de la incidencia en el tiempo, recuperación parcial o total de una proporción de las plantas afectadas, fuerte efecto sobre la incidencia y la severidad en el sitio donde crece la planta y ausencia de un único patógeno o factor ambiental asociado a todos los síntomas observados (Chinchilla, 2008).

Otros investigadores plantean una relación entre la PC y factores como el estrés hídrico. Se sabe que el suministro adecuado del agua es determinante para el crecimiento y productividad de la palma de aceite (Henson et al., 2005; Kallarackal et al., 2004), y que su inadecuada disponibilidad, por exceso o déficit (estrés hídrico), tiene relación con disturbios limitantes del crecimiento, la producción y el cultivo, como la PC en América. Varios estudios aportan evidencias positivas de esta hipótesis (Albertazzi et al., 2005, 2009a, 2009b; Alvarado et al., 2014; Boari, 2008; Chinchilla, 2010; Jeremy et al., 2015; Torres et al., 2014, 2015; Venturieri et al., 2009). En la palma *E. guineensis* se han encontrado fuentes de tolerancia a cambios de temperatura y déficit hídrico y respuesta a pudrición de cogollo (Alvarado & Sterling, 2005; Chinchilla et al., 2007). Un estudio fisiológico llevado a cabo en el C. I. El Mira, Tumaco, sobre el comportamiento de cuatro cultivares *E. guineensis* en etapa de vivero frente al secamiento del suelo por evapotranspiración, mostró que la respuesta de tolerancia en las palmas jóvenes se corresponde con las siguientes observaciones de campo: Bamenda × Ekona y Tanzania × Ekona, mayor tolerancia; Deli × Yangambi (Ténera Corpoica Elmira Colombia) (ICA, 2004), tolerancia intermedia, y Deli × Avros, mayor susceptibilidad (Reyes, 2012; Reyes et al., 2013). La tolerancia de Ténera Corpoica Elmira al estrés hídrico la comprobaron Bayona-Rodríguez y Romero (2019). Existe, por tanto, la posibilidad de hacer una selección temprana (vivero) de genotipos con tolerancia a déficit hídrico y a disturbios como PC, si se comprueba la relación observada en palmas adultas entre susceptibilidad al déficit e incidencia de la enfermedad (Alvarado & Sterling, 2005; Chinchilla et al., 2007; Reyes, 2012; Reyes et al., 2013). Al respecto, se cuenta con evidencia de que los cruces Bamenda × Ekona y Tanzania × Ekona, tolerantes a déficit hídrico, también han mostrado tolerancia a PC (Agricultural Services & Development [ASD], 2005; Chinchilla, 2010).

Síntomas

Las diferentes denominaciones de la enfermedad han ocasionado confusión en la descripción de los síntomas. Para Van de Lande (1993), la sintomatología depende de la edad de las palmas y de la localización de las plantaciones. Sin embargo, los síntomas generales de carácter letal son los siguientes (Arias & Rocha, 2004; Franqueville, 2001; Mariau et al., 1992; Van de Lande, 1993):

- Cambio de coloración en hojas de la corona, de verde a verde amarillento, con afectación ocasional de las flechas, las cuales pueden presentar doblamiento.
- En ocasiones se presenta pudrición húmeda y fétida de los foliolos de las hojas sin abrir (hoja flecha), lo cual afecta los foliolos superiores y medios del raquis cerca de la base de las flechas afectadas.
- Los síntomas avanzan rápido y causan pudrición del meristemo apical de la palma.
- Los racimos de palmas afectadas continúan su proceso de madurez normal, y en algunos casos se puede presentar secamiento y pudrición de frutos.
- El periodo entre la aparición de los primeros síntomas y la muerte de la palma es variable, desde 2-3 meses a un año.

La descripción de síntomas efectuada por los investigadores citados concuerda con la que se llevó a cabo en 1978, en el Programa de Oleaginosas Perennes del ICA (POP-ICA) El programa relacionó las pudriciones de la flecha y el cogollo en Colombia con un complejo sanitario (y como tal debería efectuarse el manejo), e indicó que el complejo pudrición flecha y cogollo afecta tanto a palmas adultas como a jóvenes. Los síntomas anotados por POP-ICA son los siguientes:

- El primer síntoma es la pudrición de la flecha en toda su longitud, la cual se puede retirar fácilmente y en su interior se encuentra el tejido necrosado de color marrón oscuro y con una pudrición húmeda.
- La flecha afectada se desgaja y cuelga en medio de las hojas centrales sanas de la corona. La pudrición en la base avanza y puede destruir la yema terminal. Los tejidos del ápice del tronco presentan una pudrición acuosa maloliente, como consecuencia de su invasión por una gran cantidad de organismos saprofitos, principalmente bacterias, que causan una diálisis total.

- A raíz de la destrucción del meristemo apical, la palma muere finalmente, aunque las hojas inferiores pueden sobrevivir durante algún tiempo.
- En algunos casos, la pudrición de los tejidos internos progresa hasta afectar la mayor parte del tronco. Si la pudrición se detiene antes de que la yema terminal se destruya, la producción de nuevas hojas cesa durante algún tiempo, según la magnitud del daño sufrido por el tejido meristemático. La enfermedad entra entonces en la fase de hoja pequeña, que es un indicio de recuperación de la palma.
- Las primeras hojas que emergen en etapa posrecuperación son cortas, retorcidas, con foliolos escasos y mal formados. Las hojas siguientes se forman más largas, pero con foliolos cortos, corrugados o mal formados hacia las puntas. El raquis a veces se deforma, en especial cuando el daño a la yema terminal ha sido grave. Las hojas siguientes exhiben poco a poco una longitud y unos foliolos normales, señal de que ha iniciado la recuperación.
- La enfermedad se asocia al ataque de insectos como *R. palmarum* que afectan el cogollo. Varios microorganismos se han aislado de tejidos afectados por la pudrición del cogollo.
- La incidencia de la enfermedad, al igual que su severidad, se ve favorecida por factores climáticos como elevada temperatura, alta humedad ambiental y baja luminosidad. Además, otros factores como los siguientes se consideran predisponentes de la PC: características físicas inadecuadas del suelo, mal drenaje natural y baja rata de absorción de elementos nutritivos. Los anteriores factores ecológicos modifican la morfología y fisiología normales de la palma y la hacen más susceptible a la infección.

En el proceso de identificar materiales genéticos que pudieran presentar resistencia a la PC, el POP-ICA impulsó la línea de mejoramiento genético mediante el inicio de estudios relacionados con la palma americana de aceite o nolí (*Elaeis oleifera*) y los híbridos resultantes del cruzamiento interespecífico *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* (identificados como O × G). En general, la palma de nolí es más rústica y se adapta bien a condiciones que no resiste la palma africana. Los híbridos O × G tienen las características relevantes de este progenitor y exhiben muy buena resistencia a la PC. En áreas afectadas severamente por esta enfermedad se están usando para reemplazar a la palma africana.

Medidas de manejo

A pesar de los reportes sobre los diferentes microorganismos como agentes causales de la PC, en la actualidad es válida la apreciación de Franqueville (2001) de que ninguna medida de control basada en métodos de erradicación de palmas afectadas, aplicación de sustancias biocidas y eliminación del tejido enfermo, ha logrado el control o coadyuvado a un eficiente manejo integrado de la enfermedad en su forma letal. El enfoque actual de manejo de la PC se basa en la prevención mediante medidas culturales orientadas a reducir los factores predisponentes, ya que la incidencia y severidad de los síntomas estarían asociadas a condiciones de estrés, adversas al desarrollo radicular, como compactación, mal drenaje o suelos pobres (Alvarado et al., 2014; Chinchilla, 2008; Torres et al., 2008, 2014).

Mejorar las condiciones del suelo (compactación, drenaje y riego) y seguir un adecuado manejo agronómico se asocian con una reducción de la incidencia de la enfermedad, la severidad de los síntomas y la recuperación de la plantación afectada, en zonas de baja incidencia y en las que se enfatiza en la detección temprana. Estas medidas brindan a las palmas la capacidad de emitir tejido sano con mayor velocidad (Cenipalma, 2018b; Chinchilla, 2008; Torres et al., 2015).

La medida de manejo más común contra la PC de carácter letal continúa siendo la detección temprana y la eliminación de las palmas afectadas, todo ello complementado con la eliminación de los residuos vegetales de la corona mediante su quema o carbonización (Arias et al., 2014; Cenipalma, 2017a, 2018c). Sin embargo, recientemente se ha aceptado que el insecto *R. palmarum* es determinante para la muerte de las palmas afectadas por PC en Colombia (Cenipalma, 2018c). Se considera que tres larvas son suficientes para matar una palma de seis meses de sembrada en sitio definitivo (Aldana et al., 2011). Se recomienda poner trampas con cebos atractivos (por ejemplo, trozos de caña de azúcar) y utilizar la feromona de agregación para atraer y capturar a los adultos de *R. palmarum* (Aldana et al., 2011; Amblard et al., 2004; Chinchilla, 2003; Lohr & Parra, 2014; Moura, 2017; Peña et al., 2001; Peña & Reyes, 1997; Rodríguez et al., 2016). Esta clase de manejo integrado (eliminación de palmas enfermas + captura de

poblaciones del insecto) permite reducir la incidencia de la enfermedad en más de 90 % en menos de dos años (Chinchilla, 2003).

Desde la aparición de la PC en la región de Urabá en 1964 y ante los resultados negativos de las diferentes medidas adoptadas para manejo del disturbio conducentes a reducir los niveles de incidencia y mortalidad, los investigadores han coincidido en que la incorporación de genes de resistencia o tolerancia desde *E. oleifera* a la especie *E. guineensis* es la mejor herramienta para el manejo y control de esta enfermedad (Adjé, 2004; Meunier, 1991; Meunier et al., 1976; Moretzsohn et al., 2002; Sinisterra et al., 2019). Por el momento no se han identificado fuentes de resistencia a la PC entre las poblaciones puras de *E. guineensis,* pese a las diferencias en el grado de expresión entre palmas de diferentes orígenes (Franqueville, 2001).

La palma americana *E. oleifera* se ha identificado como la fuente de genes de resistencia más idónea por cuanto es evidente la tolerancia de los híbridos interespecíficos obtenidos por cruzamiento con palmas de *E. guineensis,* conocidos como O × G. Este comportamiento de los híbridos ha sido registrado desde la aparición de la PC en Colombia en 1964 y ha sido documentado por diferentes investigadores (Bastidas, 2013; Bastidas et al., 2010; Cenipalma, 2018b; Le Guen et al., 1991; Meunier, 1975; Meunier et al., 1976). La exploración de esta resistencia a la fecha constituye la única solución eficiente para contrarrestar la presencia de la PC en plantaciones establecidas con cultivares *E. guineensis* susceptibles a este complejo, las cuales deben ser renovadas (Ayala & Romero, 2019; Meunier, 1991). Franqueville (2001) recomienda buscar marcadores moleculares de resistencia en cultivos *in vitro* de embriones obtenidos por retrocruzamiento, para plantar en áreas atacadas con más fuerza en Ecuador, Colombia y Brasil, y como medio para introducir resistencia en los genotipos más destacados.

E. oleifera es originaria de América y está dispersa en poblaciones espontáneas de Centroamérica y el norte de Suramérica hasta la Amazonía (Hardon & Tan, 1969; Meunier & Boutin, 1975; Moreno & Bastidas, 2016). Es considerada una fuente de resistencia a enfermedades como la PC (Amblard et al., 2004; Chinchilla et al., 2007; Rajanaidu, 1994) y el AR (Moura, 2017), y en la actualidad, una alternativa que tienen los palmicultores de zonas afectadas por la PC es sembrar cultivares resistentes O × G, resultado de cruzamientos *E.*

oleifera × *E. guineensis,* los cuales ya se encuentran plantados en 68.000 ha de Colombia (Fedepalma, 2021), y cuya siembra se incrementó a partir de 2007 (Kushairi, 2019; Romero, 2018; Romero et al., 2020; Sinisterra et al., 2019). Las principales cualidades de *E. oleifera* son bien conocidas: resistencia a la PC en América Latina, calidad de su aceite y baja tasa de crecimiento de su estípite. Estas características son heredables, por tanto, aditivas a sus descendencias, en este caso a los cruces interespecíficos con *E. guineensis*. Sin embargo, para el caso de la PC, aún queda por determinar la amplitud del grado de resistencia de los diferentes ecotipos de *E. oleifera* originarios de Colombia, Costa Rica, Ecuador, Venezuela, Surinam, Perú y Brasil, y el grado de heredabilidad de esta resistencia en sus descendencias híbridas interespecíficas O × G. Aun así, cabe resaltar que la colección de *E. oleifera* colombiana de origen Cereté, establecida hace más de 40 años por el ICA en el C. I. El Mira (1977) y manejada por AGROSAVIA, hasta la fecha se ha mostrado resistente a la PC y es la fuente de los materiales *E. oleifera* de la colección de trabajo del programa de mejoramiento genético de la palma de aceite de AGROSAVIA. La colección se ha incrementado recientemente con colectas de materiales *E. oleifera* realizadas en diferentes localidades de los departamentos de La Guajira (zona seca) y del Chocó (zona húmeda), materiales que fueron caracterizados con base en trece variables de los frutos y semillas. Esta colección se complementa con el germoplasma de *E. guineensis* originario de África y Asia, establecido en los C. I. Nataima (Espinal, Tolima), Palmira (Valle del Cauca) y La Libertad (Villavicencio, Meta) (AGROSAVIA & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), 2019, 2018a; Bastidas et al., 1993;).

En Colombia, la investigación estatal sobre híbridos O × G fue iniciada por el ICA en la década del setenta y continuada por Corpoica (AGROSAVIA & MADR, 2018a, 2019; Bastidas et al., 1993, 2010).

Comportamiento de genotipos de *Elaeis guineensis*, *Elaeis oleifera* y del híbrido *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* (O × G) frente a la PC

La mayoría de cultivares comerciales de *E. guineensis* tienen una base genética relativamente estrecha. Sin embargo, existe una variabilidad dentro de esta especie que requiere ser explorada, ya que aún quedan fuentes de germoplasma que deben evaluarse y en las que podría encontrarse la solución a la PC (Chinchilla, 2010).

Desde su registro en 1964, la presencia y presión de la PC ha sido una prueba permanente para la susceptibilidad de los diferentes materiales genéticos de la palma *E. guineensis*. Esto se debe a que en las plantaciones devastadas por el disturbio se encontraban cultivares de diverso origen genético, todos susceptibles, entre los cuales se destacaban materiales Dura y Pisífera y sus descendencias Ténera, resultado de cruzamientos D × P, así como cruzamientos D × D, T × T y T × D, cuyos orígenes se remontan a diferentes regiones de Asia y África (Bastidas et al., 2003; Chinchilla, 2010).

Como se mencionó antes, la presencia de la PC en Tumaco afectó más de 32.000 ha., lo cual permitió corroborar la susceptibilidad de varios genotipos de *E. guineensis* de reciente introducción a la región. Así sucedió en el C. I. El Mira, donde se documentó susceptibilidad a la PC en cinco genotipos Ténera (dos de origen nacional y tres introducidos de Malasia en 2002) durante el periodo 2003-2007, y se encontró un 29,3 % de incidencia acumulada de la enfermedad (tabla 8.2), con diferentes grados de susceptibilidad entre los cinco materiales (MADR et al., 2007).

Tras evaluar en Tumaco catorce materiales de *E. guineensis* y dos del híbrido O × G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) frente a la PC en condiciones de campo en fase juvenil (0-24 meses), Peña (2010) encontró que los genotipos *E. guineensis* eran susceptibles, mientras que los dos híbridos eran resistentes puesto que el disturbio no se manifestó en ninguna de sus palmas (tabla 8.3).

Tabla 8.2. Comportamiento de materiales genéticos frente a pudrición del cogollo (PC) en Tumaco, Colombia, 2007

Material	Genotipo	Origen	Porcentaje de incidencia de PC en un periodo de 36 meses
Dura × Pisífera 1	*Eg* × *Eg*	Malasia	34,2
Dura × Pisífera 2	*Eg* × *Eg*	Malasia	30,0
Dura × Pisífera 3	*Eg* × *Eg*	Malasia	24,1
Dura × Pisífera Cruzamiento específico	*Eg* × *Eg*	Colombia	18,3
Dura × Pisífera Mezcla de varios cruzamientos	*Eg* × *Eg*	Colombia	40,0
Promedio			29,3

Eg: Elaeis guineensis.
Fuente: MADR et al. (2007a)

La heredabilidad de la resistencia a la PC por parte de los híbridos O × G es variable; en Ecuador se observaron niveles de susceptibilidad de 0 a 10 % según el tipo de cruzamiento O × G, sobre todo en cuanto al progenitor *E. oleifera,* fuente de resistencia, por lo cual se requiere mayor conocimiento de las diferentes fuentes de esta especie (Rocha et al., 2004).

En Colombia, los brotes de PC que afectaron con severidad plantaciones de *E. guineensis* establecidas en los Llanos Orientales (no letal) y en Tumaco (letal) durante los periodos 1988-1994 y 2004-2010 respectivamente, reactivaron los estudios sobre el comportamiento de los híbridos O × G en ambientes de fuerte presión del disturbio. En la actualidad, se evalúa la incidencia de la PC sobre diferentes híbridos O × G descendientes de *oleiferas* originarias de Colombia, Brasil, Costa Rica y Ecuador. Al respecto, cabe señalar que los descendientes híbridos O × G de dos selecciones de *E. oleifera* originarias de Colombia y en evaluación por parte de AGROSAVIA, presentaron 0,7 % de incidencia en las progenies de una de las selecciones, y 2,1 % en las progenies de la otra selección (Bastidas et al., 2010). En Ecuador, el menor nivel de incidencia registrado en los híbridos O × G obtenidos con progenitores *E. oleifera* originarios de Brasil, fue de 2 % (Rocha et al., 2004). Estas observaciones comprueban que el mejoramiento genético es clave para el manejo de la PC. Al respecto, AGROSAVIA ya generó el cultivar híbrido

O × G Corpoica Elmira, que ha mostrado resistencia a la PC, tiene registro ICA para las zonas palmeras occidental y norte del país (ICA, 2011, 2019a) y en pruebas de evaluación agronómica cuenta con materiales híbridos O × G RC1 (AGROSAVIA, 2019a, 2019b; Corpoica, 2013, 2018b). Además, AGROSAVIA posee registros ICA para la producción de semillas de cultivares mejorados de palma de aceite (ICA, 2005, 2019a, 2019b).

Tabla 8.3. Comportamiento de catorce materiales de palma de aceite *Elaeis guineensis* y dos del híbrido interespecífico O × G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) frente al disturbio de la pudrición de cogollo (PC) bajo condiciones de campo y en fase juvenil (0-24 meses), Tumaco, Colombia

Material	Genotipo	Comportamiento en campo frente a PC
Deli × Yangambi	*Eg* × *Eg*	Susceptible
Deli × Pobé	*Eg* × *Eg*	Susceptible
Deli × La Mé	*Eg* × *Eg*	Susceptible
Deli × Avros	*Eg* × *Eg*	Susceptible
Deli × Ekona	*Eg* × *Eg*	Susceptible
Compacta × Ghana	*Eg* × *Eg*	Susceptible
Bamenda × Ekona	*Eg* × *Eg*	Susceptible
Tanzania × Ekona	*Eg* × *Eg*	Susceptible
E. oleifera tipo Cereté rojo × Deli	*Eo* × *Eg*	Tolerante
E. oleifera tipo Cereté verde × Deli	*Eo* × *Eg*	Tolerante

Eo: Elaeis oleifera; Eg: Elaeis guineensis
Fuente: Peña (2010)

En una primera fase de evaluación agronómica de híbridos O × G de primera generación de retrocruzamiento (RC1)[2] llevada a cabo en Tumaco por AGROSAVIA, después de 7,5 años de plantados en sitio definitivo, se encontró que los segregantes afines al genotipo *E. guineensis* presentaban una incidencia acumulada de la PC de 6 %, mientras que en los segregantes híbridos O × G no se registraron palmas con síntomas de las enfermedades PC, MA y MS (Bastidas et al., 2007). Los resultados obtenidos indican que existen probabilidades de obtener respuesta genética favorable contra la PC.

2 RC1: ([O × G] × G).

Enfermedades y complejos fitosanitarios (EyCF) relacionados con los virus de mancha anular (MA) y anillo clorótico (AC)

La MA se observó por primera vez en Perú (1969) y posteriormente en Ecuador (1974) y Colombia (1985) (Arévalo, 1988; Caicedo, 2003; Chávez, 1986; Dzido et al., 1978; Genty, 1996; Jiménez, 1988; Morales et al., 2003; Morales, Lozano, Arroyave et al., 2002; Morales, Lozano, Velasco & Arroyave, 2002; Morales, 1999, 2000; Peña et al., 1991; Sánchez, 1990). La enfermedad no ha sido registrada en plantaciones establecidas en países de Centroamérica (Chinchilla & Umaña, 1996). En Costa de Marfil se ha reportado una enfermedad similar, conocida como "pudrición basal seca", y se han identificado los insectos *Sogatella kolophon* y *S. cubana* (Homiptera: Delphacidae) como sus agentes transmisores (Chinchilla, 2001; Chinchilla & Umaña, 1996; Renard & Quillec, 1984).

Se sabe que la MA ataca a las especies *E. guineensis* y *E. oleifera* y a sus híbridos interespecíficos O × G. Las palmas afectadas presentan secamiento rápido de la flecha y pudrición seca a nivel de cogollo (Dzido et al., 1978). La enfermedad ha sido asociada a un virus del género *Foveavirus* y se ha propuesto llamarla "virus de la palma africana de aceite", identificada como AOPRV (por la sigla en inglés de *african oil palm ringspot virus*) (Lozano et al., 2010; Morales, Lozano, Velasco & Arroyave, 2002).

En Colombia, la MA se ha reportado en Tumaco y la zona oriental. Los niveles de incidencia en las plantaciones afectadas de Tumaco varían entre 2 y 45 % (Jiménez, 1988; Morales, Lozano, Arroyave, Castaño, et al., 2002; Morales, 1999; Sánchez, 1990). Asimismo, existe el reporte de que algunos viveros y cultivos menores de tres años han sufrido pérdidas de hasta 100 % de las palmas (Morales, 2000). Al parecer, la tolerancia a la enfermedad se desarrolla con la edad, puesto que las palmas de cinco años o más en apariencia son resistentes (Chinchilla, 2001).

Entre los factores que favorecen la aparición de la enfermedad, se menciona el establecimiento de plantaciones en áreas bajas con inadecuado sistema de drenajes y fuerte infestación de plantas arvenses, sobre todo gramíneas como *Panicum* sp. (Chinchilla, 2001; Morales, 2000; Peña et al., 1991). La expresión de los síntomas parece variar con la localización geográfica y las condiciones ambientales (Morales, 2000). Intentos de reproducción de la MA mediante inoculaciones mecánicas y transmisión por insectos de hábito chupador (como áfidos) han resultado infructuosos (Chinchilla, 2001; Morales, 2000).

El AC afecta a la palma de aceite en estados de vivero y fase juvenil en campo. Inicialmente se reportó en Ecuador (1995), y luego en Colombia (1996), en la zona de Tumaco (Chinchilla, 2001; Chinchilla & Umaña, 1996; Genty, 1996; Morales, 2000). En ambos países, se ha demostrado que el AC se asocia a una cepa del virus del mosaico de la caña de azúcar (SCMV), perteneciente al género *Potyvirus* (Chinchilla & Umaña, 1996; Morales, Lozano, Arroyave, Castaño et al., 2002; Morales, 2000). Aunque el AC no se considera letal, su incidencia en vivero puede alcanzar niveles superiores a 80 % y las palmas afectadas deben ser eliminadas, con las consecuentes pérdidas económicas para el productor (Chinchilla, 2001; Chinchilla & Umaña, 1996; Genty, 1996; Morales, 2000).

Medidas de manejo

Hasta el presente, ninguna medida de manejo ha sido efectiva para contrarrestar el efecto de la MA y el AC en palmas afectadas, por lo cual sigue vigente la conclusión de Dollet et al. (1987), quienes indican que es necesario determinar la tolerancia de los materiales genéticos de la palma de aceite a las EyDF de importancia económica.

El manejo en plantaciones comerciales se enfoca en la erradicación de las palmas afectadas por la MA o el AC (figura 8.1). Esta medida se complementa con la aplicación de mezclas de agroquímicos a las palmas vecinas, para prevenir la aparición de un posible insecto que esté involucrado en la transmisión.



Figura 8.1. Manejo de mancha anular (MA) y anillo clorótico (AC). a. y b. Erradicación de planta; c. Aplicación de insecticida.
Fotos: Eduardo Peña

Comportamiento de genotipos de *Elaeis guineensis*, *Elaeis oleifera* y del híbrido *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* (O × G) frente a MA y AC

Las únicas investigaciones adelantadas en Colombia para determinar el comportamiento de diferentes materiales genéticos frente a la MA y el AC son las realizadas en Corpoica (Peña, Cadena et al, 2010; Peña, Reyes et al., 2010). Estos trabajos evaluaron el comportamiento en condiciones de campo en Tumaco, con alta presión de inóculo, en plantas de vivero pertenecientes a 16 materiales genéticos de palma de aceite, catroce correspondientes a *E. guineensis* (*EG*) y dos a híbridos interespecíficos *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*, conocidos como híbridos O × G (tabla 8.4).

Tabla 8.4. Identificación de los genotipos de palma de aceite *Elaeis guineensis* e híbridos O × G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) sometidos a prueba de susceptibilidad en vivero a las enfermedades mancha anular (MA) y anillo clorótico (AC), Tumaco, Colombia

Material	Genotipo	Origen
1. Dura Deli 1 × Pisífera origen Yangambi	*E. guineensis*	Colombia
2. Dura Deli 1 × Pisífera origen La Mé	*E. guineensis*	Colombia
3. Dura Deli 1 × Pisífera origen Pobé	*E. guineensis*	Colombia
4. Dura Deli 2 × Pisífera origen Yangambi	*E. guineensis*	Colombia
5. Dura Deli 2 × Pisífera origen La Mé	*E. guineensis*	Colombia
6. Dura Deli 2 × Pisífera origen Pobé	*E. guineensis*	Colombia
7. Dura Deli 3 × Pisífera origen Yangambi	*E. guineensis*	Colombia
8. Dura Deli 3 × Pisífera origen La Mé	*E. guineensis*	Colombia
9. Dura Deli 3 × Pisífera origen Pobé	*E. guineensis*	Colombia
10. Dura Deli × Avros	*E. guineensis*	Costa Rica
11. Dura Deli × Ekona	*E. guineensis*	Costa Rica
12. Compacta × Ghana	*E. guineensis*	Costa Rica
13. Bamenda × Ekona	*E. guineensis*	Costa Rica
14. Tanzania × Ekona	*E. guineensis*	Costa Rica
15. Nolí 1 × Dura Deli	*E. oleifera* ecotipo Cereté × *E. guineensis*	Colombia
16. Nolí 2 × Dura Deli	*E. oleifera* ecotipo Cereté × *E. guineensis*	Colombia

Fuente: Peña, Cadena et al. (2010), Peña, Reyes et al., (2010)

Los resultados obtenidos determinaron la susceptibilidad a la MA de todos los genotipos *Eg*, ya que evidenciaron palmas con síntomas, con variaciones en su incidencia y frecuencia entre ellos, mientras que solo un genotipo O × G presentó palmas con síntomas. Mediante pruebas moleculares RT-PCR realizadas a tejido foliar se confirmó la presencia del virus AOPRV de la MA en las palmas *EG* y O × G con síntomas. Los resultados de estas pruebas fueron reportados por Lozano et al. (2010). Adicionalmente, mediante la prueba serológica ELISA, se confirmó la presencia de partículas del *Potyvirus* del AC, lo que constituyó la primera identificación documentada de la coexistencia de estos dos tipos de virus en palmas de los genotipos *EG* y OxG. Además, para Colombia es la primera identificación comprobada de AC en palmas del

genotipo O × G, lo cual ratifica la susceptibilidad de materiales *Eg* y O × G a la MA y el AC, y la necesidad de adelantar estudios complementarios que involucren otros materiales de las especies estudiadas.

Otras enfermedades y complejos fitosanitarios (EyCF) de importancia económica en Colombia: anillo rojo (AR), marchitez sorpresiva (MS) y marchitez letal (ML)

Las plantaciones de palma de aceite establecidas en las diferentes zonas palmeras de Colombia con genotipos comerciales de *Elaeis guineensis* (Dura y Ténera) de diversa procedencia y origen, han sido afectadas por otros disturbios fitosanitarios, que han ocasionado pérdidas de importancia económica. Por ejemplo, en la década del setenta causaron la muerte de 57% del área de cultivo en una plantación de 2.500 ha establecida en el valle del río Zulia, Norte de Santander. Estos disturbios tienen en común que en su diseminación se encuentra involucrado un insecto (transmisor o con fuertes indicios de serlo), factor que ha permitido evaluar medidas de manejo enfocadas a disminuir sus poblaciones.

Anillo rojo (AR)

Es una enfermedad destructiva presente en casi todas las áreas palmeras de Centro y Sudamérica. En Colombia ha sido reportada en Magdalena, Meta, Casanare, Nariño (Tumaco) y Valle del Cauca (bajo Calima-Buenaventura). El organismo causal es el nematodo *Bursaphelenchus cocophilus* y su principal agente transmisor, el insecto picudo negro americano *R. palmarum* (Coleoptera: Curculionidae).

Los síntomas iniciales son acumulación de flechas, acortamiento de hojas y cambio de coloración del follaje de verde a amarillo. Las hojas bajeras presentan clorosis o amarillamientos, luego toman una coloración marrón bronce y posteriormente inician su secamiento y quedan adheridas al tronco. Durante el avance del disturbio, hay secamiento de frutos y aborto de inflorescencias. El síntoma característico interno es el taponamiento de los

haces vasculares. Al efectuar un corte transversal del tronco, se observa un anillo de 3 a 5 cm de ancho, cuya coloración varía de rojo pardo a pardo oscuro. En esos tejidos decolorados se localizan nematodos microscópicos, de cuerpo filiforme, translúcido y de gran movilidad. Adicionalmente, se observan punteaduras color pardo oscuro en los pecíolos de las hojas jóvenes.

Existe una variante de la acción del nematodo sobre la palma. En apariencia, este puede actuar como ectoparásito cuando se aloja en los tejidos de las hojas en desarrollo que aún no han abierto, lo que da lugar a una alteración fisiológica que incide en el desarrollo normal de estas hojas y estas se emiten de tamaño corto. Este desorden se denomina "síndrome de hoja corta" (Menjivar et al., 1988; Peña & Jiménez, 1993; Van Hoff & Seinhorst, 1962).

El insecto *R. palmarum*, además del daño indirecto como transmisor del nematodo *B. cocophilus*, ocasiona un daño directo como barrenador del estípite. En muchas ocasiones produce la muerte de la palma ya que sus larvas prefieren para su alimentación los tejidos tiernos cercanos al meristemo. El insecto entra a las palmas por cualquier herida, y en ella la hembra pone los huevos por medio de su ovipositor (Cenipalma, 2018c; Morales et al., 2017).

Medidas de manejo

Se deben priorizar medidas preventivas, dado que la planta no puede recuperarse una vez ha sido atacada por el nematodo. Es necesaria la erradicación química con herbicidas sistémicos, con el fin de acelerar la muerte de la palma afectada y de los nematodos alojados en los tejidos internos del estípite. En lo posible, se deben evitar heridas innecesarias en las palmas ya que forman puertas de entrada para la inoculación del nematodo mediante el insecto *R. palmarum*. Se recomienda el uso de trampas con cebos atractivos (por ejemplo, trozos de caña de azúcar) y emplear la feromona de agregación para atraer y capturar a *R. palmarum* (Aldana et al., 2011; Amblard et al., 2004; Chinchilla, 2003; Lohr & Parra, 2014; Peña et al., 2001; Peña & Reyes, 1997; Rodríguez, 2016). Esta clase de manejo integrado (eliminación de palmas enfermas + captura de poblaciones del insecto) reduce la incidencia de la enfermedad en más de 90 % en menos de dos años (Chinchilla, 2003).

En cuanto a la reacción de los materiales genéticos al AR, en el banco de germoplasma de la Estación Experimental Lemos Maia (ESMAI), de la Comisión Ejecutiva del Plan de la Labora Cacaotera (sur de Bahia, Brasil), se verificó que el material *E. guineensis* tipo Ténera es altamente susceptible, mientras que palmas tipo Dura Deli y Dura Cepec mostraron más tolerancia que las Ténera (Moura, 2017). Por su parte, la palma *E. oleifera* ha presentado resistencia y poco daño mecánico por *R. palmarum, m*ientras que el híbrido interespecífico BRS Manicoré (RNC 26031) (*E. oleifera* × *E. guineensis*) presentó resistencia moderada al AR y resistencia a la PC, por lo cual su siembra se recomienda para el estado de Pará, donde la limitante es la PC, y para el sur del estado de Bahía, donde la limitante es el AR (Moura, 2017).

Marchitez sorpresiva (MS)

La MS es uno de los disturbios más devastadores del cultivo de la palma de aceite. Ha sido registrada en Ecuador, Perú, Surinam y Brasil (Arévalo, 1988; Realpe Aranda et al., 2007). En Colombia se ha registrado en varias regiones: Meta, Santander, Cesar y Nariño. La MS ha sido declarada enfermedad de control oficial en el cultivo de palma de aceite en el territorio nacional (ICA, 2014). La MS se asocia a protozoarios flagelados de la especie *Phytomonas staheli,* los cuales sobreviven en los haces vasculares de las palmas afectadas. El protozoario se detecta con facilidad al observar bajo el microscopio de luz una gota de savia de las palmas enfermas; es abundante en los tejidos del meristemo siempre que este aún no esté necrosado. En Ecuador, el insecto *Lincus* sp. ha sido señalado como transmisor de la enfermedad (Desmier de Chenon, 1984), y en Colombia se atribuye a *Lincus tumidifrons* la transmisión de la enfermedad en plantaciones establecidas en las zonas palmeras oriental, central (Puerto Wilches) y norte (Cesar y Magdalena). La enfermedad se ha registrado en las cuatro zonas palmeras de Colombia, pero su mayor incidencia está en las zonas norte y central (Alvañil, 1994, 1996; Arango, Ospina et al., 2011; Arias, 2014; Rojas, 2013; Sánchez, 1968). No obstante, siguen sin conocerse las relaciones insecto-patógeno-planta (Arango, Ospina et al., 2011).

Una enfermedad similar a la MS se presentó en la década 1965-1975, en la plantación Oleaginosas Risaralda, localizada en el valle del río Zulia, Norte de Santander, donde causó la pérdida de alrededor de 288.000 palmas (Mena & Martínez, 1977; Mena et al., 1975; Sánchez & Patiño, 1964). Sin embargo, la

desaparición de la plantación y la no continuidad de los estudios iniciales impidieron determinar si el disturbio era realmente MS.

Los síntomas asociados a MS son claramente reconocibles en los foliolos, en las inflorescencias y en el sistema de raíces de las palmas afectadas. En muestras de tejidos de estas palmas, bajo microscopio, se observan protozoarios flagelados, considerados responsables de la enfermedad (Mena et al., 1975; Torrecilla, 2013).

El primer síntoma visible de MS es una clorosis foliar generalizada unida a un secamiento de los ápices de los foliolos de las hojas del tercio inferior de la palma (figura 8.2). Luego el secamiento se extiende a toda el área foliar de estas hojas y a las puntas de los foliolos de las hojas del tercio medio. Simultáneamente se presenta aborto de inflorescencias, así como pudrición de flechas y raíces. Los frutos de los racimos pierden su brillo normal y se desprenden con facilidad cuando aún están verdes. En estados avanzados, se presenta secamiento total del área foliar; internamente la zona del meristemo se pudre y se forma una masa líquida de olor característico. De esta última condición se origina el nombre en inglés de la MS: *hartrot* (podredumbre amoniacal).



Figura 8.2. Síntomas de marchitez sorpresiva a. Síntomas palma; b. Síntomas hoja.
Fotos: Leidy Moreno

La diferencia de síntomas de la MS entre los cultivares híbridos O × G y *E. guineensis* son poco notables, excepto la forma como sucede el secamiento en los foliolos. En palmas *E. guineensis* es de color marrón y en el híbrido O × G es pardo oscuro (Arango, Pineda et al., 2011; Mena et al., 1975; Torrecilla, 2013).

Medidas de manejo

Si aparecen síntomas asociados a la enfermedad, la planta debe ser erradicada, dado que la MS es de carácter letal. Además, tanto en la planta erradicada como en el círculo de palmas cercanas se debe aplicar una solución de insecticida cuya efectividad haya sido probada contra el vector de la enfermedad. Adicionalmente, se deben realizar monitoreos continuos de los lotes con el fin de identificar de forma temprana las plantas afectadas. Se recomienda que las rondas sanitarias no sean mayores de 30 días.

A nivel de plantaciones y para reducir la incidencia de la enfermedad, se debe efectuar un manejo integral basado en lo siguiente: 1) conocimiento pleno de las condiciones agroecológicas de la región, e 2) implementación de buenas prácticas agrícolas orientadas al manejo integrado de plagas. Este manejo incluye control de plantas arvenses, sobre todo gramíneas; recuperación y establecimiento de cultivos de coberturas vegetales con plantas leguminosas (*Pueraria phaseoloides* o kudzu, al igual que *Desmodium* sp.), de modo que se eviten plantas hospederas del posible vector, y aplicación de insecticida en los lotes con alta incidencia. Estas medidas son complementarias a un adecuado manejo nutricional de la plantación de acuerdo con estudios edáficos y foliares efectuados para cada lote (Mena et al., 1975; Torrecilla, 2013).

En cuanto al comportamiento de genotipos específicos de palma de aceite y su relación con la MS, la variedad Bamenda de la especie *E. guineensis* ha mostrado buena tolerancia a la enfermedad. Su genética corresponde a generaciones avanzadas de la variedad anteriormente conocida como Bamenda × Ekona, cuyas líneas maternas fueron desarrolladas en Costa Rica a partir de materiales provenientes de las tierras altas (1.200 m s. n. m.) de Bamenda, región de Camerún (ASD, 2015).

Marchitez letal (ML)

- Debido a los niveles de incidencia y mortalidad que puede alcanzar, la ML es considerada de importancia económica. Además, es una de las enfermedades declaradas como de control oficial en el cultivo de palma de aceite en el territorio nacional (ICA, 2014).
- Este disturbio, reportado en 1994, se registró por primera vez en la zona oriental (bajo Upía) (Torres & Tovar, 2004). Esta enfermedad es la responsable de la erradicación de por lo menos 806.105 plantas afectadas entre 2010 y 2018 (Cenipalma, 2018b), en plantaciones establecidas en los departamentos de Casanare y Meta. La ML se ha propagado muy rápidamente y en la actualidad se cataloga como uno de los principales riesgos fitosanitarios para la palmicultura en los Llanos Orientales de Colombia (Murillo et al., 2012). Se estima que en la zona palmera oriental ha afectado 5.636 ha, con pérdidas de 146 millones de dólares (Cooman, 2019b).

Duarte (2007) registró la erradicación de 51.678 palmas, equivalentes a 361 ha, en cinco plantaciones afectadas del Casanare, Colombia, durante un periodo de trece años. Con base en información de Fedepalma, Murillo et al. (2012) anotan que el área afectada registrada en el primer trimestre de 2010 ascendía a 690 ha. Todas estas cifras reflejan la severidad que puede alcanzar el daño de la ML.

El lento progreso de su diseminación es explicado en un estudio epidemiológico de Torres y Tovar (2004). Para estos autores, tanto el progreso temporal como el patrón espacial sugieren que la ML es incapaz de dispersarse a largas distancias en periodos cortos de tiempo y que se requiere un estrecho contacto entre palmas sanas y enfermas para que se dé el contagio.

Las investigaciones dirigidas a identificar el agente causal descartan que la ML esté relacionada con hongos (*Thielaviopsis* sp., *Cephalosporium* sp., *Fusarium oxysporum* f. e. *elaeidis*), bacterias o protozoarios flagelados (Duarte, 2007; Sánchez et al., 2003; Torres et al., 2006). Informes de los investigadores Álvarez (2004) y Elliot (2007), citados por Morillo et al. (2012), señalan la presencia de un fitoplasma del tipo *Candidatus Phytoplasma asteris* en palmas con síntomas de ML. Sin embargo, en los estudios llevados a cabo no ha sido posible encontrar el agente causal o el grupo de microorganismos asociados a las palmas afectadas (o no) por la enfermedad (Cenipalma,

2018b). A su vez, *Haplaxius crudus* o el saltahojas de la palma se señala como uno de los insectos involucrados en la transmisión de este disturbio (Arango, Ospina et al., 2011; Cardona, 2009; Castillo et al., 2019; Mena & Martínez, 1977; Zúñiga et al., 2009).

Por su parte, los cultivares híbridos O × G tienen similar sintomatología que los *E. guineensis* (Cenipalma, 2019b; Erazo, 2019). A nivel externo, las palmas afectadas presentan un secamiento apical irregular de los foliolos, mientras que las hojas nuevas e incluso las intermedias adquieren una tonalidad amarillo tenue que se torna rojiza hasta finalizar en necrosis foliar. Hay también acortamiento de hojas nuevas, fractura peciolar en hojas de diverso rango, tonalidad rojiza en los tejidos internos de las raíces, y pudrición de racimos con pérdida inicial de brillo, seguida de desprendimiento y secamiento. En inflorescencias se presenta pudrición húmeda y seca, mientras que las hojas nuevas plegadas (flechas) y las raíces pueden sufrir pudrición (Calvache et al., 2004; Duarte, 2007). La ML progresa rápidamente y las palmas mueren pocos meses después de la detección de los síntomas (Torres & Tovar, 2004).

En la parte interior del meristemo se aprecian manchas irregulares cuyo color marrón varía de claro a oscuro. En el estípite, algunos haces vasculares adquieren una coloración marrón oscuro e interrumpida en diferentes alturas del estípite. Según el avance del disturbio, las flechas u hojas plegadas presentan pudrición fétida y acuosa, sin que alcance el meristemo. En ocasiones, los tejidos bajo este último exhiben un halo violáceo, atribuido a una reacción a la invasión de los tejidos internos por parte de agentes patogénicos (Calvache et al., 2004; Duarte, 2007).

Medidas de manejo

En vista de que se desconoce la causa de la ML y dada la severidad de los síntomas en las palmas afectadas, las estrategias de manejo implementadas en las plantaciones son las siguientes: 1) hacer revisión sanitaria para detectar y erradicar palmas afectadas, 2) determinar focos, y 3) aplicar insecticidas a las palmas vecinas al foco, para mantener al mínimo o casi nula la población de *H. crudus* (Cenipalma, 2019b; Rairán et al., 2015). La aplicación de *Metarhizium anisopliae* es eficiente para el control biológico de *H. crudus*, ya que con él la población del insecto se reduce 78 % a los 30 días de la

aplicación (Cenipalma, 2018b, 2019a). Se recomienda, además, llevar a cabo un control de gramíneas y ciperáceas dentro del lote y en los bordes, dada su asociación con el insecto, que se reproduce en las raíces de estas plantas, esto sin mencionar a otros insectos que pueden estar involucrados en la transmisión de la ML (Bustillo & Arango, 2016; Rairán et al., 2015). El manejo también incluye el uso de materiales resistentes, como los híbridos O × G, cuyos cultivares tienen mayor resistencia que los *E. guineensis* (Cenipalma, 2019b; Erazo, 2019).

Se está documentando el comportamiento de genotipos específicos de las especies *E. guineensis*, *E. oleifera* y sus híbridos O × G para evaluar fuentes de resistencia o tolerancia. La incidencia reportada de ML en plantaciones comerciales de la zona oriental indica que los genotipos comerciales de *E. guineensis* (D × P) son susceptibles, mientras que los híbridos O × G, dado el nivel de incidencia, sí manifiestan resistencia.

Gutiérrez (2018) informa que en área de resiembra con cultivares *E. guineensis* e híbridos O × G con igual edad de siembra y misma presión de inóculo se observaron diferentes tasas de infección. Como cultivares suceptibles de *E. guineensis* se reportaron Deli × Avros, Golde Hope, Guthrie, Deli × Yangambi, Deli × Nigeria, Deli × Papua, Deli × Ekona y Tanzania × Ekona (Oliveros et al., 2010).

Por otra parte, se determinó que *H. crudus* se encuentra en todas las zonas palmeras del país, excepto en la suroccidental (Castillo et al., 2019). Es importante reducir la población de *H. crudus* en regiones libres de ML, ya que uno de estos insectos que previamente haya adquirido el agente causal puede llegar transportado por el viento, con lo cual los insectos nativos pueden alimentarse de la planta enferma, adquirir el patógeno, llevarlo a otras regiones y ocasionar daños económicos (Cenipalma, 2019a). En la actualidad se adelanta un proceso de estudio de pruebas de adquisición del agente causal de la ML en adultos de *H. crudus*, mediante análisis moleculares a individuos que permanecieron durante 19 días en el follaje de palmas enfermas.

Se sabe que el ciclo de vida de *H. crudus* dura en promedio 83,2 días. Al evaluar la oviposición de hembras alimentadas en diferentes cultivares de palma se encontró que esta ocurría en mayor medida en *E. guineensis* Deli × La Mé 1001 (13,8 ± 14,5 huevos/hembra), y en segudo lugar en el

cocotero (*Cocos nucifera*) (13,5 ± 18,9 huevos/hembra), mientras que en el híbrido O × G Coari × La Mé no se registró oviposición y se observó la menor supervivencia de los adultos de *H. crudus*. Lo anterior sugiere que en este cultivar no se presenta la ML, dado que en él los adultos no ovipositan y no sobreviven (Cenipalma, 2018b).

Pudrición basal del estípite (PBE)

La magnitud de esta enfermedad se aprecia en los reportes de plantaciones de *E. guineensis* de Malasia e Indonesia, en donde se registraron incidencias de la enfermedad cercanas a 90 %. Desde que su presencia se reportó en Colombia (1994), en lotes de plantaciones adultas de *Elaeis guineensis* de las zonas norte y oriental (menos de 30 palmas en cinco plantaciones), la incidencia de esta enfermedad ha avanzado de forma progresiva hasta alcanzar niveles de 12 % de palmas enfermas por lote afectado en las zonas palmeras norte y central (Mestizo et al., 2012, 2015; Nieto, 1996). En 2018 se reportaron 9.067 casos nuevos de PBE en los departamentos de Cesar, Bolívar, Magdalena y La Guajira (Cenipalma, 2018a).

En general, las palmas afectadas presentan síntomas externos e internos que en ocasiones pueden ser similares a los originados por otros disturbios de origen biótico o abiótico, razón por la cual es necesario detectar el organismo causal mediante pruebas de laboratorio. Entre los síntomas externos, se destacan amarillamiento y doblamiento de hojas del tercio superior, las cuales cuelgan sobre el estípite, y acumulación de hojas no abiertas o flechas de menor tamaño que las presentes en palmas sanas. A nivel interno, se pudren los tejidos en la base del estípite y su coloración adquiere diversas tonalidades de color marrón (Mestizo et al., 2015; Nieto, 1996).

Como agente causal de la PBE se identifican varias especies de basidiomicetos del género *Ganoderma*, entre las cuales se destaca *G. boninense*. Estudios adelantados en Colombia señalan dos subgéneros (*Elfvingia* y *Lucidum*), pero se requieren más estudios para la plena identificación de las especies de *Ganoderma* que se encuentran en las palmas afectadas de las plantaciones de las zonas norte y central. La diseminación en una plantación se da por contacto de las raíces de las palmas sanas con las de las enfermas.

Las medidas de manejo se centran en la detección temprana de las palmas con base en los síntomas externos y mediante herramientas como el tomógrafo de impedancia eléctrica, cuyas imágenes gráficas permiten establecer el daño en los tejidos internos. El manejo de la PBE se ajusta al siguiente lineamiento dentro de las plantaciones: registro de palmas afectadas, medición del nivel de incidencia, y erradicación y quema de residuos de las palmas diagnosticadas. Además, investigaciones sobre el factor de resistencia genética de *E. guineensis* a la especie *G. boninense* han encontrado que algunos materiales de origen La Mé son resistentes al patógeno.

Se ha podido determinar que lo más relevante en el material susceptible a PBE es la activación temprana del gen MLO, el cual codifica una proteína de membrana que facilita la colonización del patógeno en la planta. En cuanto a la respuesta al ataque, se definieron tres genes importantes. En el caso de *E. guineensis*, el material de código 35 sobresale por su perfil de expresión de los tres genes respecto a los otros materiales evaluados. También se avanzó en el desarrollo de alternativas de control biológico para el manejo de la PBE mediante la evaluación de seis cepas de *Trichoderma*, probadas *in vitro* sobre un aislamiento de *Ganoderma* capaz de causar la enfermedad, y con las cuales se logró una inhibición del patógeno superior a 80 % (Cenipalma, 2018b).

Enfermedades y complejos sanitarios de segundo orden

Otra de las enfermedades es la mancha foliar, conocida como "cercospora", cuyo agente causal es *Uwemyces elaeidis* (figura 8.3) (Hernández-Restrepo et al., 2016; Montoya & Arias, 2016). Afecta sobre todo a los híbridos O × G en las zonas palmeras central, oriental y occidental. La evaluación de fungicidas *in vitro* para su manejo dio como resultado tres ingredientes activos promisorios, con registros de inhibición superiores a 70 % (Cenipalma, 2018b). También se evalúan prácticas culturales como la poda del tejido afectado y la aplicación de dos fungicidas y un protectante (Cenipalma, 2017a, 2017b). No obstante, también es necesario hacer evaluaciones en los cultivares O × G sobre resistencia o tolerancia a este disturbio.

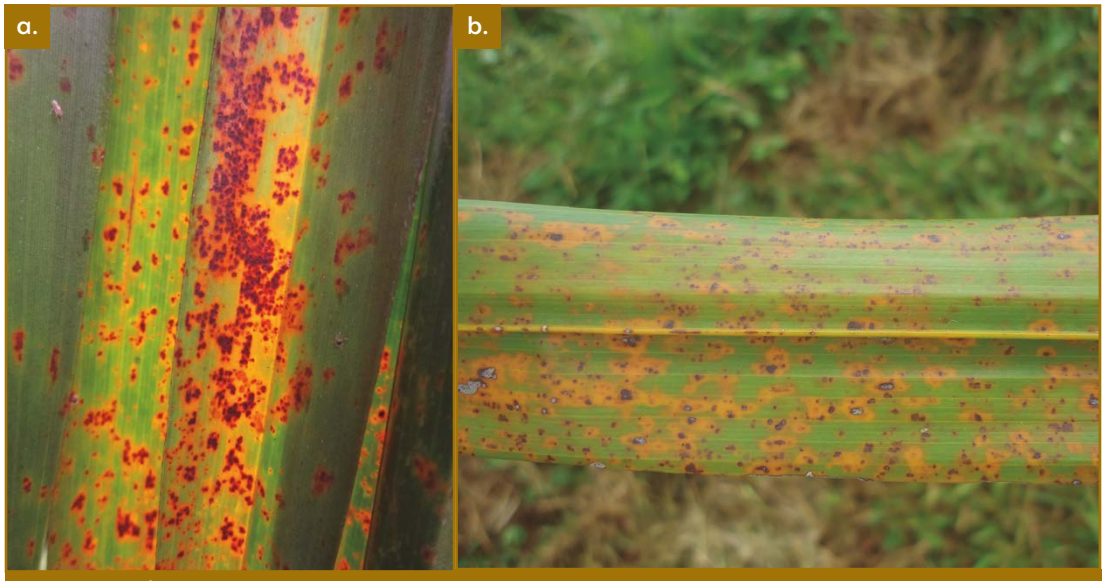


Figura 8.3. Mancha foliar asociada a *Uwemyces elaeidis*. a. Haz del foliolo; b. Envés del foliolo.
Fotos: Leidy Paola Moreno, Silvio Bastidas

En cuanto al secamiento o añublo foliar, que varios autores designan como "pestalotiopsis", se realizó en Tumaco durante 2017 un estudio de identificación y diagnóstico con plántulas de previvero Cereté × Deli (híbrido Corpoica Elmira). Cuarenta microorganismos previamente aislados se inocularon en tres pruebas de patogenicidad, con el fin de verificar su relación con enfermedades foliares. Dos de los aislados correspondían a *Curvularia* sp. y otro a un ascomiceto, y las lesiones que provocaron fueron incipientes, sin mayor desarrollo en el tiempo, lo que indica que los microorganismos inoculados no son patogénicos en este cultivar (Cenipalma, 2017b; Sánchez, 1990).

En cuanto a nuevos riesgos fitosanitarios, la introducción accidental (2008) del picudo rojo de Asia (*Rhynchophorus ferrugineus)* a las Antillas neerlandesas (Aruba y Curazao) complicó aún más la situación fitosanitaria en Colombia de las palmas cultivadas y silvestres, y de sus recursos genéticos y colecciones, dado que se trata de la peor plaga de palmáceas a nivel mundial, con un largo historial de invasiones y consecuencias muy perjudiciales para especies cultivadas y no cultivadas. Aún persiste la amenaza de invasión a Suramérica, y por consiguiente a Colombia, ya que no se ha podido erradicar en las islas del Caribe (AGROSAVIA, 2018d; AGROSAVIA & MADR, 2019).

Discusión general

Aunque a nivel mundial la producción y el rendimiento de racimos y aceite crudo han sido los parámetros tradicionales en los que se basa el mejoramiento de la palma de aceite, la incidencia en Colombia y demás países de América Latina de siete complejos fitosanitarios de alto impacto económico, en especial la PC, refuerza la necesidad de disponer de genotipos resistentes. Estos materiales genéticos, seleccionados después de evaluar su comportamiento en ambientes de alta presión del complejo fitosanitario, unidos a un adecuado manejo integrado del cultivo, permitirán el establecimiento de plantaciones productivas y sostenibles. Lo anterior concuerda con Durand-Gasselin (2013), quien indica que el mejoramiento genético de la resistencia de la palma de aceite a enfermedades es parte de la estrategia de manejo integrado de plagas.

Los tres enfoques enfatizados por Bastidas (2013) para direccionar la investigación sobre PC se aplican también a la mayoría de las EyCF que afectan a la palma de aceite en Colombia: 1) patógenos como causa primaria, 2) factores predisponentes, y 3) producción de materiales tolerantes. Vallejo (1978) ya había advertido sobre la uniforme evolución del tipo de material genético plantado en Colombia. Al principio se utilizó material Dura de libre polinización de origen asiático (Deli) o africano, luego este se reemplazó por materiales provenientes de cruzamientos controlados de Dura Deli × Dura Deli y finalmente predominó el material Ténera, resultado del cruzamiento Dura Deli × Pisífera. A pesar de la aparición de la PC en Urabá en 1964 y de su resurgir en los Llanos Orientales en 1988, la tendencia homogénea se mantuvo hasta 2004 y solo se revirtió por el negativo impacto de la PC en la zona occidental (Tumaco), con la consecuente pérdida de más de 32.000 ha establecidas con cultivares Ténera de la especie *E. guineensis*.

La baja efectividad de la mayoría de las medidas aplicadas para el manejo y control de EyCF como PC, basadas en erradicación de palmas afectadas y aplicación de agroquímicos, obliga a replantear el enfoque de los programas de mejoramiento genético de la palma de aceite. Estos necesariamente deben priorizar la obtención de materiales resistentes, de modo que se conviertan en un factor clave para el manejo integrado de las EyCF y disminuyan las probabilidades de incidencia de esta clase de afecciones.

En el caso de la PC, la meta de los programas de mejoramiento es ampliar la base genética de los cultivares comerciales, con fuentes de resistencia derivadas de dos alternativas. La primera corresponde a la palma americana *E. oleifera,* con su demostrada resistencia a la PC, y con sus descendencias O × G, obtenidas de cruzamientos con *E. guineensis*. La segunda equivale a la eventual variabilidad genética que presente *E. guineensis,* especie en la que existen fuentes de resistencia a la PC, como lo indican varios autores (Barba, 2018; Cenipalma, 2018a; Chinchilla, 2010; Chinchilla et al., 2007; Louise, 2016).

En relación con la primera alternativa, algunos investigadores señalan que la especie *E. oleifera* tiene una alta variabilidad genética. En Costa Rica se relacionan 44 poblaciones de palma americana de aceite, originarias de Centro (Honduras, Costa Rica y Panamá) y Suramérica (Colombia, Brasil, Ecuador, Perú y Venezuela) (Alvarado et al., 2010; Alvarado, 2010), mientras que Colombia dispone de 62 poblaciones, obtenidas en las regiones Caribe, Andina, Pacífica y Amazónica (AGROSAVIA & MADR, 2018c; Bastidas et al., 1993; Cenipalma, 2018b; Moreno & Bastidas, 2016). Se ha observado respuesta diferencial de resistencia a la PC en los distintos cruzamientos O × G comercializados y sembrados, pero se identificaron cruzamientos promisorios por su respuesta a la PC en condiciones de campo, en zonas de alta presión de inóculo, donde aun así presentan bajas incidencias y severidades.

Con respecto a la segunda alternativa, algunos investigadores señalan que las palmas *E. guineensis* y los híbridos interespecíficos O × G no son inmunes a la PC, sino que tienen resistencia parcial, y que con buenas prácticas de manejo (Chinchilla, 2010; Chinchilla et al., 2007) se pueden lograr los siguientes resultados: 1) que el desorden aparezca de forma tardía después de la siembra en campo, 2) que la tasa de afectación sea menor en el tiempo, 3) que los síntomas sean menos severos, 4) que la recuperación sea más rápida, 5) que haya menor incidencia final, y 6) que se reduzcan los efectos sobre el rendimiento (Chinchilla, 2010; Chinchilla et al., 2007).

Trabajos de tamizaje de materiales han evidenciado algunas fuentes de resistencia a la PC en *E. guineensis* y en cruces con La Mé. También se ha observado tolerancia a la enfermedad en cruces de origen africano entre progenitores genéticamente alejados, procedentes de Camerún (Bamenda

[de alturas de 1.200 m s. n. m.]), Malawi (de tierras altas y secas) y Mobai (de tierras secas). Los cruces entre africano de origen Camerún (Bamenda × Ekona y Tanzania × Ekona) exhiben resistencia a la enfermedad, mientras que los orígenes Malawi y Mobai muestran buen comportamiento agronómico y continúan siendo evaluados en Suramérica, en lugares con alta presión de PC (ASD, 2015; Chinchilla, 2010). Louise (2016) informa que en el oriente de Ecuador algunos materiales *guineensis* tienen un mejor comportamiento frente a la PC, y entre ellos se destaca el cultivar El Dorado (Deli × La Mé). Barba (2018) también reporta para Ecuador algunos progenitores Dura y Pisífera con menor susceptibilidad a la PC, y con ellos se espera producir y evaluar materiales Ténera para hacer frente al disturbio. Por su parte, en las zonas palmeras central y suroccidental de Colombia, Cenipalma evalúa cruzamientos Angola × Tester y Camerún × Tester, con el objeto de identificar fuentes de resistencia a la PC en *E. guineensis*, por baja incidencia o baja severidad (Cenipalma, 2018b; Dangong, 2016).

Los materiales de siembra con diversidad genética, antes de ser liberados comercialmente, deben ser sometidos a pruebas de evaluación agronómica, para establecer su comportamiento en ambientes donde se presenta el disturbio. La razón de esto es que el sistema de plantación de la palma de aceite implica sembrar cultivares genéticamente uniformes en grandes áreas. De acuerdo con García y Lozoya (2004), las plantas interactúan de manera constante con una gran variedad de microorganismos (como virus, bacterias, hongos, nematodos e insectos), y aunque las poblaciones silvestres por lo general enfrentan este tipo de patógenos potenciales, los cultivos genéticamente uniformes establecidos en áreas extensas pueden sufrir graves daños por patógenos virulentos, y por tanto, requieren medidas costosas de protección para reducir pérdidas en la productividad. Como se indicó anteriormente, si bien en Colombia existen registros del comportamiento de algunos materiales frente a disturbios como la PC, la MA y el AC, esta información se considera incipiente y es necesario continuar con otras investigaciones para obtener tanta información como se pueda sobre resistencia, tolerancia o susceptibilidad de la mayor cantidad de genotipos posibles de *E. guineensis, E. oleifera* y los híbridos O × G ante los principales EyCF limitantes en el país.

En relación con disturbios como AR, MA, AC, MS, ML y PBE, su efecto sobre el cultivo de la palma de aceite depende tanto del tipo de cultivar sembrado como del manejo agronómico. Con estas variables se disminuye la probabilidad de que se incrementen las poblaciones de los agentes transmisores (insectos) o sus posibles reservorios (por ejemplo, las gramíneas que aparecen cuando existe un deficiente manejo de los cultivos de cobertura).

La situación fitosanitaria descrita de las palmas cultivadas y no cultivadas y la amenaza de una posible llegada del picudo rojo asiático, así como el riesgo de erosión genética o de extinción de gran cantidad de palmas nativas (incluida la nolí), requieren que el "Plan de conservación, manejo y uso sostenible de las palmas de Colombia" (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS] & Universidad Nacional de Colombia [UNAL], 2015) tenga pertinencia y actualidad. Al respecto, en el macroproyecto de investigación en palmáceas de la Red de Innovación de Cultivos Permanentes de Corpoica (2013-2017), se hizo la caracterización morfológica de la colección de la palma nolí. Además, se desarrolló el procedimiento técnico para la criopreservación de embriones y la obtención a partir de ellos, mediante germinación *in vitro*, de plantas normales nolí (*Elaeis oleifera*) e híbridos O × *G*, herramienta que ha resultado de utilidad para su conservación y propagación. Además, la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) y AGROSAVIA emitieron para Suramérica una alerta sanitaria relativa al insecto picudo más dañino para las palmáceas, ya presente en las islas de Aruba y Curazao. Se trata del picudo rojo de Asia *R. ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae), del cual el ICA ya tiene conocimiento (AGROSAVIA, 2018; AGROSAVIA & MADR, 2018a; Moreno & Bastidas, 2016).

El objetivo principal del mejoramiento genético de la palma de aceite es obtener la máxima cantidad de aceite por hectárea. Para lograrlo, es necesario disminuir la probabilidad de incidencia de disturbios de alto impacto económico como la PC y la ML. Con el actual estado de desarrollo tecnológico, este objetivo solo se logrará mediante la obtención de cultivares de alto rendimiento y tolerantes a las principales EyCF, con pleno conocimiento de su comportamiento fisiológico, y con un acertado plan de manejo agronómico que inicie con la selección del terreno para siembra.

Son promisorias también nuevas herramientas del conocimiento científico, como aquellas que permiten secuenciar el genoma de especies vegetales y dilucidar la forma de acción del patógeno en la planta hospedera (Hao, 2016; Montoya et al., 2014; Schornack, 2016). Con la secuencia del genoma de la palma se abren nuevas líneas de investigación como la de las interacciones planta-patógeno, que permitirán desarrollar herramientas de diagnóstico de enfermedades y su manejo. Asimismo, la investigación sobre complejos como la PC debe abarcar otras áreas del conocimiento, como los diversos microorganismos que conforman la biota del suelo, ya que en ella se encuentran tanto los patógenos que limitan el desarrollo y rendimiento de las plantas como el biocontrol ejercido por la comunidad microbiana benéfica.

Por último, se debe destacar que el cultivo de la palma de aceite en Colombia (540.687 ha) es intensivo en el uso de mano de obra, factor que tiene la mayor participación en los costos. En *E. guineensis* corresponde a 42 % del total y en híbridos O × G a 49 %, fundamentalmente por la necesidad de implementar polinización asistida. Se estima que un cultivo adulto requiere, en promedio, un trabajador por cada 13 ha de *E. guineensis* y uno por cada 7 ha de híbridos O × G. Esta información es un insumo importante para conocer la relevancia social del cultivo, la demanda de mano de obra y las implicaciones de su escasez (Cenipalma 2018b; Fedepalma, 2021).

Referencias

Adjé, I. (2004). Producción de semilla mejorada de *Elaeis guineensis* por Cra PP Pobé en Benín. *Revista Palmas, 25*(número especial, tomo II), 326-329. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1096

Agricultural Services & Development (ASD). (2015). *Guía de variedades y clones*.

Albertazzi, H., Bulgarelli, J., & Chinchilla, C. (2005). Eventos previos y contemporáneos a la aparición de los síntomas de la pudrición del cogollo en palma aceitera. *Revista ASD Oil Palm Papers, 28,* 34-41. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.28-2005-min.pdf

Albertazzi, H., Chinchilla, C., & Ramírez, C. (2009a). Características del suelo y desarrollo radical en palma aceitera joven (*Elaeis guineensis* Jacq.) en sitios afectados por pudriciones del cogollo. *Revista ASD Oil Palm Papers, 33,* 1-32.

Albertazzi, H., Chinchilla, C., & Ramírez, C. (2009b). Dinámica del sistema radical de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en respuesta a la fertilización mineral y orgánica en suelos de áreas afectadas por pudriciones del cogollo. *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 33,* 40-47. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.33-2009-min.pdf

Aldana, R. C., Aldana, J. A., & Moya, O. M. (2011). *Manejo del picudo* Rhynchophorus palmarum *L. (Coleoptera: Curculionidae).* Instituto Colombiano Agropecuario (ICA); Federación Nacional de Cultivadores de Aceite (Fedepalma); Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma); Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). https://www.ica.gov.co/getattachment/19e016c0-0d14-4412-af12-03eecfe398f2/Manejo-del-picudo--Rhynchophorus-palmarum-L--(Cole.aspx

Alegría, M., Vélez, D., Varón, F., Martínez, G., Torres, G., & Corredor, J. (2015). Comportamiento frente a la pudrición de cogollo (PC) de palmas derivadas de cruzamientos entre palmas *Elaeis gunineensis* sobrevivientes a la epidemina en Tumaco, Nariño. *Revista Palmas, 36*(2), 69-77. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11078

Alvañil, F. (1994). Ciclo de vida de *Uncus tumidifrons* Rolston (Hemiptera: Pentatomidae), vector de la marchitez sorpresiva de la palma de aceite. *Revista Palmas, 15*(3), 9-16. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/441

Alvañil, F. (1996). Marchitez sorpresiva y Hartrot: una revisión. *Revista Palmas, 17*(1), 11-18. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/526

Alvarado, A. (2010). Avances en el mejoramiento genético de la palma de aceite en Centroamérica. *Palmas, 31*(especial), 126-143. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1520

Alvarado, A., Chinchilla, C., & Albertazzi, H. (2014). La tolerancia al estrés abiótico, las pudriciones del cogollo (PC) y la marchitez por fusarium en palma aceitera (*Elaeis guineensis*) están relacionadas. *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 42,* 22-26.

Alvarado, A., Escobar, R., & Peralta F. (2010). El programa de mejoramiento genético de la palma de aceite de ASD Costa Rica y su contribución a la industria. *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 34,* 17-32. https://asd-ec.com/wp-content/uploads/2021/10/ASD-OPP-No.34-2009-min.pdf

Alvarado, A., & Sterling, F. (2005). Stress tolerant varieties. *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 28,* 5-20.

Álvarez, E., Trujillo, R., & Loke, J. B. (2007). Avances en la caracterización patogénica de *Phytophthora* spp. asociado al complejo pudrición del cogollo en palma africana *Elaeis guineensis* Jacq. *Fitopatología Colombiana, 31*(1), 15-18.

Amblard, P., Billotte, N., Cochard, B., Durand, T., Jacquemard, C. J., Louise, C., Novy, B., & Potier, F. (2004). El mejoramiento de la palma de aceite *E. guineensis* y *E. oleifera* por el CIRAD-CP. *Revista Palmas, 25*(número especial, tomo II), 306-310.

Arango, M., Ospina, C., Sierra, J., & Martínez, G. (2011). *Myndus crudus*: vector del agente causante de la marchitez letal en palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas, 32*(2), 13-25. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1594

Arango, M., Pineda, B., Martinez, G., & Villegas, B. (2011). Consideraciones epidemiológicas y etiológicas de la marchitez sorpresiva en palma de aceite en la zona norte de Colombia. *Revista Palmas, 32*(1), 34-43. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1588

Arévalo, E. (1988). Principales enfermedades de la palma aceitera en Tocache-Perú. En B. Ramakrishna (ed.), *VI Seminario Problemas Patológicos de la Palma Africana* (pp. 117-133). Prociandino.

Arias, N. (2014). Compartiendo experiencias sobre manejo de la marchitez sorpresiva (MS) en el sur del Cesar. *El Palmicultor* (503), 10-11.

Arias, N., Beltrán, J., Guerrero, J., & Sánchez, A. (2014). Tecnologías para el manejo de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite validadas en las zonas palmeras de Colombia. *Revista Palmas, 35*(2), 39-52. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10978

Arias, D., & Rocha, P. (2004). Análisis de diversidad genética en materiales tolerantes y susceptibles a la pudrición de cogollo en palma de aceite mediante marcadores moleculares. *Revista Palmas, 25*(3), 11-27. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1004

Ayala, L., & Gómez, P. L. (2000). Pathogenocity of insulations of *Thielaviopsis paradoxa* main bud rot causing agent. *Revista Palmas, 21*(número especial, tomo I), 121-122.

Ayala, I. M., & Romero, H. M. (2019). *Cultivares híbridos O×G y la reactivación productiva de zonas problema con* PC [Memoria]. XV Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite, 25 al 27 de septiembre de 2019, Bucaramanga, Colombia, Cenipalma. https://www.cenipalma.org/wp-content/uploads/2019/09/1.Ivan-Ayala-OxG-RTN-2019_compressed.pdf

Barba, J. (2018). *Desarrollo de materiales tolerantes a la pudrición del cogollo (*PC*) con mayor eficiencia en polinización natural* [Presentación PowerPoint]. Seminario internacional "Alternativas de siembra con materiales tolerantes a la pudrición del cogollo y su manejo (híbridos interespecíficos O×G y/o *E. guineensis*)", Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Aceitera (Ancupa).

Bastidas, S. (2013). Híbrido O×G Corpoica Elmira de palma de aceite, avances en el desarrollo de materiales genéticos resistentes a la PC. *Revista Palmas, 34*(2), 135-141. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10857

Bastidas, S., Figueredo, P., & Reyes, R. (1993). Obtención de materiales de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) adaptados al trópico latinoamericano. *Revista Palmas, 14*(número especial), 49-56. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/399

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2003). Genealogía del germoplasma de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) del proyecto de mejoramiento genético de Corpoica. *Revista Palmas, 24*(1), 21-29. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/950

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Medina, C. C., Villa, T. A., & Tolosa, M. W. (2010). Avances sobre pruebas agronómicas para comprobar la tolerancia y productividad de los híbridos *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* al disturbio pudrición del cogollo en la zona palmera occidental de Colombia. En Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (ed.), *Ciencia y tecnología para la competitividad del sector agropecuario 2002-2010. Resultado de algunos proyectos cofinanciados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural* (pp. 158-159) http://hdl.handle.net/20.500.12324/19921.

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Pérez, J., & Tolosa W. (2007). Comportamiento agronómico del cultivar híbrido RC1 de palma de aceite (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) × *Elaeis guineensis*. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8*(1), 5-11. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:77

Bayona-Rodríguez, C. J., & Romero, H. M. (2019). Physiolgical and agronomic behavior of commercial cultivars of oil palm (*Elaeis guineensis*) and O × G hybrids (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) at rainy and dry seasons. *Australian Journal of Crop Science, 13*(03), 424-432. https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.03.p1354

Boari, A. J. (2008). *Estudios realizados sobre o amarelecimento fatal do dendezeiro (*Elaeis guineensis *Jacq.) no Brasil.* Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/410160/estudos-realizados-sobre-o-amarelecimento-fatal-do-dendezeiro-elaeis-guineensis-jacq-no-brasil

Bustillo, A. E., & Arango, C. M. (2016). Las mejores prácticas para detener el avance de la marchitez letal (ML) en plantaciones de palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas, 37*(4), 75-90. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11965

Caicedo, E. (2003). *Reconocimiento de áfidos y plantas arvenses asociadas a palma de aceite* Elaeis guineensis *Jacq. y su posible relación con mancha anular* [Tesis de grado]. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño.

Calvache, H., Castilla, C., Sánchez, J., Tovar, J., Gutiérrez, D., Hernández, M., Berdugo, J., & Ramírez, J. (2004). Avances en el estudio de la marchitez letal. *Revista Palmas, 25*(número especial, tomo II), 205-2009.

Cardona, C. (2009). *Insects as vectors of oil palm diseases* [Presentación]. XVI Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite y Expopalma.

Castillo, N. J., Matabanchoy, J. A., & Bustillo, A. E. (2019). Haplaxius crudus *(Van Duzee) vector de la marchitez letal está distribuido en las principales zonas palmeras de Colombia* [Póster]. XV Reunión Técnica Nacional Palma de Aceite, Cenipalma, 25 al 27 de septiembre de 2019, Bucaramanga, Colombia. https://www.cenipalma.org/wp-content/uploads/2019/10/10.-Haplaxius-crudus-Van-Duzee-vector-de-la-marchitez-letal-se-encuentra-distribuido-en-las-principales-zonas-palmeras-de-Colombia_compressed.pdf

Centro de Investigación en Palma de Aceite [Cenipalma]. (2017a). Mejores prácticas fitosanitarias para la producción de palma de aceite sostenible. *Revista Palmas, 38*(3), 171-173. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12233

Centro de Investigación en Palma de Aceite [Cenipalma]. (2017b). *Informe de labores Cenipalma 2017.*

Centro de Investigación en Palma de Aceite [Cenipalma]. (2018a). Búsqueda de fuentes de resistencia a la PC en *Elaeis guineensis*. En *Informe de labores 2018* (p. 41). https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/labcenipalma/issue/view/1421/Informes%20de%20Labores%20Cenipalma

Centro de Investigación en Palma de Aceite [Cenipalma]. (2018b). *Informe de labores Cenipalma 2018*. https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Cenipalma/Informe-de-labores-2018/Informe-de-Labores-Cenipalma-2018.pdf

Centro de Investigación en Palma de Aceite [Cenipalma]. (2018c). Pudrición del cogollo: avances y manejo integrado de la sanidad. *Revista Palmas, 39*(3), 75-78. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12670

Centro de Investigación en Palma de Aceite [Cenipalma]. (2019a, diciembre). *Haplaxius crudus*, un pequeño gran enemigo que habita entre las palmas de aceite. *Periódico Palma Sana Zona Oriental* (edición especial), 1-2.

Centro de Investigación en Palma de Aceite [Cenipalma]. (2019b, junio). Seis principios básicos para cortarle el paso a la marchitez letal. *Periódico Palma Sana Zona Oriental* (edición especial), 2.

Chávez, F. (1986). *Enfermedades de palma africana en Ecuador y su combate* [Manual n.º 8]. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (Iniap).

Chinchilla, C. (2001). El anillo clorótico y otros síntomas atribuidos a virus en palma aceitera: riesgos de transmisión por semilla. *Revista ASD Oil Palm Papers, 22*, 23-27.

Chinchilla, C. (2003). Manejo integrado de problemas fitosanitarios en palma aceitera *Elaeis guineensis* en América Central. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología* (67), 69-82.

Chinchilla, C. (2008). The many faces of spear rots in oil palm: The need for an integrated management approach. *Revista ASD Oil Palm Papers*, 32, 1-26.

Chinchilla, C. (2010). No hay evidencia de que exista relación alguna entre la incidencia y severidad de las pudriciones de cogollo en palma aceitera y el origen comercial de las variedades plantadas en el pasado en América tropical. *Revista ASD Oil Palm Papers, 35*, 18-22.

Chinchilla, C., Alvarado, A., Albertazzi, H., & Torres, R. (2007). Tolerancia y resistencia a las pudriciones de cogollo en fuentes de diferente origen de *Elaeis guinnensis*. *Revista Palmas, 28*(1), 273-284. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1264

Chinchilla, C., & Umaña, C. (1996). There is no danger in importing palm diseases through oil palm seed imports from Costa Rica. *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 13*, 1-8.

Cooman, A. P. (2019a, septiembre). Cerca de USD 2.400 millones se han perdido por la pudrición del cogollo. *Contexto ganaero*. https://www.contextoganadero.com/agricultura/cerca-de-usd-2400-millones-se-han-perdido-por-la-pudricion-del-cogollo

Cooman, A. P. (2019b). *De la investigación al cambio productivo* [Presentación]. XV Reunión Técnica Nacional Palma de Aceite, Cenipalma, 25 al 27 de septiembre de 2019, Bucaramanga, Colombia. https://www.cenipalma.org/wp-content/uploads/2019/09/2-De-la-investigacion-al-campo-productivo-ACooman_compressed.pdf

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. (2018). *Meta 3892 "Efecto de los nematodos entomopatógenos (*Steinernema *spp. y* Heterorhabditis *spp.) sobre* R. palmarum *(Informe técnico julio 2016-diciembre 2018)", proyecto 740 "Desarrollo de alternativas para el control biológico del picudo negro,* Rhynchophorus palmarum, *insecto plaga de cocotero, palma de aceite y chontaduro", macroproyecto 133 "Generación de bases tecnológicas para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles y competitivos en palmáceas de interés económico 2013-2017".*

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2018a). *Macroproyecto 133 "Generación de bases tecnológicas para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles y competitivos en palmáceas de interés económico, marzo 2013-diciembre 2017: informe técnico".*

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2018c). *Proyecto 378 "Utilización de los recursos genéticos de la especie* Elaeis oleifera *del banco de germoplasma de Corpoica, en el programa de mejoramiento de la palma de aceite, marzo 2013-diciembre 2017: informe técnico final", macroproyecto 133 "Generación de bases tecnológicas para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles y competitivos en palmáceas de interés económico, marzo 2013-diciembre 2017".*

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2018d). *Proyecto 740 "Desarrollo de alternativas para el control biológico del picudo negro,* Rhynchophorus palmarum*, insecto plaga de cocotero, palma de aceite y chontaduro, julio 2016-diciembre 2019: informe técnico final", macroproyecto 133 "Generación de bases tecnológicas para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles y competitivos en palmáceas de interés económico, marzo 2013-diciembre 2017"*.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA & Ministerio de Desarrollo Rural (MADR). (2019). *Macroproyecto desarrollo de tecnología para especies palmáceas cultivadas y no cultivadas en Colombia 2019-2023*.

Dangong, L. F. (2016). Retos del sector palmicultor: innovación y emprendimiento. *Revista Palmas, 37*(3), 139-152. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11815

Desmier de Chenon, R. (1984). Research on the genus *Lincus stahl,* Hemiptera Pentatomidae Discocephalinaeand its possible role in the transmission of the Marchitez of oil palm and Hart-Rot of coconut. *Olèagineux, 39*(1), 1-6.

Dollet, M. (1991). Etiología de la pudrición de cogollo: investigaciones virológicas conducidas por el IRHO. *Revista Palmas, 12*(2), 33-37. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/283

Dollet, M., Mariau, D., & Renard, J. L. (1987). Research needed on oil palms diseases on Latin America. In *Proceedings of the 1987 international oil palm, Palm Oil Conferences, Progress and Prospects* (pp. 514-551).

Drenth, A., Torres, G. A., & Martínez, G. (2013). *Phytophthora palmivora,* la causa de la pudrición del cogollo en la palma de aceite. *Revista Palmas, 34*(número especial, tomo I), 87-94. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10671

Duarte, S. (2007*). Pruebas de patogenicidad* in vitro *con microorganismos aislados de palmas afectadas por marchitez letal* [Tesis de grado]. Pontificia Universidad Javeriana.

Durand-Gasselin, T. (2013). El mejoramiento genético de la resistencia de la palma de aceite a enfermedades es parte de la estrategia de manejo integrado de plagas. *Revista Palmas, 34*(número especial, tomo I), 146-152.

Dzido, J. L., Genty, P., & Olagnier, M. (1978). Principales enfermedades de la palma de aceite en el Ecuador. *Olèagineux, 33*(2), 55-63.

Erazo, A. O. F. (2019). *Experiencias en la utilización de los cultivares híbrido interespecífico O×G como parte de la estrategia de manejo para la marchitez letal* [Presentación]. XV Reunión Técnica Nacional Palma de Aceite, Cenipalma, 25 al 27 de septiembre de 2019, Bucaramanga, Colombia.

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [Fedepalma]. (2006). *Anuario estadístico 2006.* https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/24630/recent-submissions

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [Fedepalma]. (2021). *Anuario estadístico 2019, 2021: principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo 2016-2020.*

Fontanilla, C., Mosquera, M., Ruiz, E., Sánchez, A., Beltrán, J. A, & Arias, N. (2014). Estimación de costos de manejo de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite. *Revista Palmas, 35*(2), 23-37.

Franqueville, H. (2001). *La pudrición de cogollo de la palma aceitera en América Latina: revisión preliminar de hechos y logros alcanzados.* Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). http://www.buecke.com.br/public/upload/arquivo/buecke/La%20pudricion%20del%20cogollo%20de%20la%20palma%20aceitera%20en%20America%20Latina-02c2d.pdf

García, E., & Lozoya, E. (2004). Genes de resistencia a enfermedades en plantas. *Revista Mexicana de Fitopatología, 22*(3), 414-422. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61222315

Genty, P. (1996). Nueva enfermedad en semilleros de palma de aceite en Ecuador. *Revista Palmas, 17*(1), 19-26.

Gómez, P. L., Owen, E., Nieto, L. E., Calvache, H., Mondragón, V., & Álvarez, G. (1990). Diagnóstico tecnológico del cultivo de palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas, 11*(3), 32-63. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/263

Gutiérrez, D. (2008). *La marchitez letal de la palma de aceite: informe estado del arte.* Grupo Upía.

Hao, J. (2016). Comunidades microbianas en el suelo: causa y soluciones de las enfermedades en plantas. *Revista Palmas, 37*(número especial, tomo I), 123-130. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11896

Hardon, J. J., & Tan, G. Y. (1969). Interespecific hybrids in the genus *Elaeis* I. crossability, cytogenetics and fertility of F1 hybrids of *Elaeis guineensis* × *Elaeis oleifera*. *Euphytica, 18*, 372-379. https://doi.org/10.1007/BF00397784

Hartley, C. W. S. (1983). *Palma de aceite*. Editorial Continental, S. A.

Henson, I. A. E., Noor, M. R. M., Haniff, M. H., Yahya, Z., & Mustakim, S. N. A. (2005). Stress development and its detection in young oil palms in north Kedah, Malaysia. *Journal of Oil Palm Research, 17*, 11-26.

Hernández-Restrepo, M., Crous, P. W., & Sarria, G. A. (2016). *Uwemyces elaeidis* (Steyaert): fungal planet description sheets 468. *Persoonia, 36*, 454-455. https://doi.org/10.3767/003158516X692185

Hurtado, C. R. E., & Rincón, R. V. (2009). La geomática como instrumento para modelar y hacer seguimiento a la pudrición del cogollo (PC) y al insecto plaga: *Rhynchophorus palmarum*, zona occidental - Tumaco (Colombia). *Revista Palmas, 30*(3), 21-35. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1452/1452

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2004). *Resolución 00961. "Híbrido intraespecífico (D × P) Ténera Corpoica Elmira: Registro Nacional de Cultivares Comerciales PLA-04".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2005). *Resolución 2860. "Registro ICA a Corpoica como productor de semilla seleccionada de palma".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2014). *Resolución 4170. "Por medio de la cual se declaran las plagas de control oficial en el cultivo de palma de aceite en el territorio nacional y se establecen las medidas fitosanitarias para su manejo y control".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2019a). *Resolución 00002185. "Por la cual se amplía el registro como productor de semilla seleccionada de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, en el sentido de adicionar la producción (sexual y asexual) de semillas de varias especies incluida palma de aceite".*

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2019b). *Resolución 00015591. "Por la cual se amplía el registro del híbrido interespecífico de palma de aceite O × G Corpoica Elmira a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA para la subregión natural Caribe seco".*

Jeremy, H., Gutiérrez, M., Torres, J., Chinchilla C., Escobar, R., Mata, R., & Arauz, F. (2015). Recuperación de palmas aceiteras (*Elaeis guineensis* Jacq.) afectadas por pudriciones del cogollo. *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 45*, 30-43.

Jiménez, Ó. (1988). Mancha anular de la palma africana de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Colombia. *Ascolfi Informa, 14*, 55-56. https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/30527

Jiménez, Ó., & Peña, E. (1986). Amarillamiento sorpresivo de las hojas jóvenes de la palma africana. En B. Ramakrishna (ed.), *VI Seminario Problemas Fitopatológicos de la Palma Africana, Bucaramanga, Colombia, septiembre de 1988* (pp. 78-83). Prociandino.

Kallarackal, J., Jeyakumar, P., & George, S. (2004). Water use of irrigated oil palm at three different arid locations in peninsular India. *Journal of Oil Palm Research, 16*(1), 45-53. https://www.researchgate.net/publication/235413409_Water_use_of_irrigated_oil_palm_at_three_different_arid_locations_in_Peninsular_India

Kushairi, A. (2019). Reseña histórica, estado actual y perspectivas futuras de la agroindustria global de la palma de aceite. *Revista Palmas, 40*(número especial, tomo I), 32-33.

Laing, D. (2011). La deficiencia transitoria de calcio como causa primordial de la pudrición de cogollo en palma de aceite. *Informaciones Agronómicas,* (3), 26-52.

Le Guen, V., Amblard, P., Omore, A., Koutou, A., & Meunier, J. (1991). Le programme hybride interspécifique *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* de L'IRHO. *Oléagineux, 46*(12), 479-487.

Lohr, B., & Parra, P. P. (2014). *Manual de trampeo del picudo negro de las palmas,* Rhynchophorus palmarum*, en trampas de feromona adaptadas a la situación particular de pequeños productores de la costa del Pacífico colombiano.* Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). https://alliancebioversityciat.org/es/node/9738

Louise, C. (2016). Resistencia a la pudrición del cogollo en el material *guineensis*. *Revista Palmas, 37*(número especial, tomo I), 183-189. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11902

Lozano, I., Morales, F. J., Martínez, A. K., & Peña, E. (2010). Molecular characterization and detection of African oil palm ringspot virus. *Journal of Phytopathol, 158*, 167-172. https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2009.01598.x

Mariau, D., Van de Lande, H. L., Renard, J. L., Dollet, M., Rocha de Souza, L., Ríos, R., Orellana, F., & Corrado, F. (1992). Oil palm bud rot type diseases in Latin America: Symptomatology, epidemiology, incidence. *Olèagineux, 47*(11), 605-618.

Mena, E., & Martínez, G. (1977). Identificación del insecto vector de la marchitez sorpresiva de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Fitopatología Colombiana, 6*(1), 12-14. http://agriperfiles.agri-d.net/individual/n51178

Mena, E., Martínez, G., Cardona, C., & Jiménez, O. (1975). Efecto del uso de insecticidas y control de malezas en la incidencia de la marchitez sorpresiva de la palma africana *Elaeis guineensis* Jacq. *Revista Colombiana de Entomología, 1*(1), 9-14. https://doi.org/10.25100/socolen.v1i1.10430

Mendoza, A. K. (2019). Una enfermedad que mata a la palma aceitera deja desempleo en Ecuador. *El Universo*. https://www.eluniverso.com/noticias/2019/06/30/nota/7400397/enfermedad-que-mata-palma-aceitera-deja-desempleo-ecuador

Menjivar, N., Chinchilla, C., & Arias, E. (1988). Variación estacional de la población de *Rhynchophorus palmarum* y su relación con la enfermedad hoja pequeña-anillo rojo en una plantación comercial de *Elaeis guineensis* en Honduras. En A. Bacigalupo, (ed.), *Mesa Redonda de la Red Latinoamericana de Palma Aceitera, Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 22-28 de octubre de 1988* (pp. 79-82). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Mestizo, Y., Bandera, G., Aya, H., Sarria, G., Varón, F., Navia, M., & Martínrez, G. (2012). Caracterización de síntomas e identificación de microorganismos en palmas de aceite afectadas por la pudrición basal del estípite. *Revista Palmas, 33*(4), 13-27. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10736

Mestizo, Y., Zúñiga, L., Uribe, M., Bandera, G., Martínez, J., Pineda, B., Varón, F., Torres, M., & Martínez, G. (2015). Avances en la investigación de la pudrición basal del estípite (PBE) en palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas, 36*(2), 55-65. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11077

Meunier, J. (1975). La palma aceitera americana *Elaeis melanococca*. *Olèagineux, 30*(2), 51-61.

Meunier, J. (1991). Una posible solución genética para el control de la pudrición de cogollo en la palma aceitera: híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*. *Revista Palmas, 12*(2), 39-42.

Meunier, J., & Boutin, D. (1975). L' *Elaeis melanococca* et l' hybrid *Elaeis melanococca* × *Elaeis guineensis*: premieres donneés. *Olèagineux, 30*(1), 5-8.

Meunier, J., Vallejo, G., & Boutin, D. (1976). *E. melanococca* × *E. guineensis* hybrid and its improvement. *Olèagineux, 31*(2), 519-528.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma), & Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma). (2007). *Taller técnico científico sobre avances y resultados en los procesos de investigación y manejo del complejo pudrición del cogollo en Tumaco*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS] & Universidad Nacional de Colombia [UNAL]. (2015). *Plan de conservación, manejo y uso sostenible de las palmas de Colombia*.

Montoya, B. S. M., & Arias, N. (2016). *Evaluación e impacto del daño ocasionado por* Cercospora *sp. en híbridos O × G de palma de aceite* [Presentación PowerPoint]. XIII Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite, Medellín, 20 al 22 de septiembre de 2016, Cenipalma-Fedepalma. http://web.fedepalma.org/bigdata/reunion2016/poster/33poster.pdf

Montoya, C., Ávila K., Reyes, P., Navia, M., & Romero, M. (2014). Secuenciación del genoma de las especies vegetales: implicaciones y perspectivas. *Revista Palmas, 35*(3), 11-22. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10983

Morales, F. J. (1999). *Investigación sobre la posible etiología viral de la mancha anular de la palma de aceite en Colombia: informe técnico final*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Morales, F. J. (2000). *Diagnóstico y manejo preventivo de las enfermedades virales de la palma de aceite en la zona occidental de Colombia* [Boletín técnico n.º 13]. Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma). https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/view/10518/10508

Morales, F., Lozano, I., Arroyave, J., Castaño, M., Sedano, R., & Velasco, A. (2002). Enfermedades virales de la palma de aceite en el suroccidente colombiano y sus agentes causales. *Fitopatología Colombiana, 26*(2), 81-86. https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/44301/morales.pdf?sequence=1

Morales, F., Lozano, I., Velasco, A., & Arroyave, J. (2002). Detection of a fovea-like virus in African oil palm affected by a lethal "ringspot" disease in South America. *Journal of Phytophatology, 150,* 611-615. https://doi.org/10.1046/j.1439-0434.2002.00820.x

Morales, F., Lozano, I., Velasco, A. C., & Arroyave, J. A. (2003). Detección de un virus asociado a la mancha anular de la palma de aceite en Tumaco, Nariño. *Revista Palmas, 34*(1), 59-86. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/952

Morales Ipuz, L. C., Neira Segura, A. L., & Becerra-Encinales, J. F. (2017). *Aplicación de mejores prácticas fitosanitarias en el cultivo de palma de aceite*. Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma); Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma). http://52.200.198.20/bitstream/handle/123456789/107589/Aplicaci%C3%B3n%20de%20mejores%20pr%C3%A1cticas%20fitosanitarias%20en%20el%20cultivo%20de%20la%20palma%20de%20aceite.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Moreno, L. P., & Bastidas, P. S. (2016). Morphological characterization of the American oil palm collection *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés. *Revista Acta Agronómica, 66*(1), 135-140. https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.53819

Moretzsohn, M. C., Ferreira, M. A., Amaral, Z. P. S., Coelho, P. J. A., Grattapaglia, D., & Ferreira, M. E. (2002). Genetic diversity of Brazilian noil palm (*Elaeis oleifera* H. B. K.) germplasm collected in the Amazon forest. *Euphytica, 124*, 35-45. https://doi.org/10.1023/A:1015606304653

Moura, J. I. L. (2017). *Manejo integrado das pragas das palmeiras*. Centro de Pesquisas do Cacau.

Murillo, F., Salazar, C., Tupaz, A., & Oliveros, M. (2012). Reconocimiento de insectos posiblemente asociados a la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) con presencia de marchitez letal. *Revista de Ciencias Agrícolas, 29*(1), 42-56. https://www.researchgate.net/publication/260204707_RECONOCIMIENTO_DE_INSECTOS_POSIBLEMENTE_ASOCIADOS_A_LA_PALMA_DE_ACEITE_Elaeis_guineensis_Jacq_CON_PRESENCIA_DE_MARCHITEZ_LETAL_RECOGNITION_OF_INSECTS_POSSIBLE_ASSOCIATED_IN_OIL_PALM_Elaeis_guineensis_

Nieto, L. (1996). Síntomas e identificación del agente causal del complejo pudrición de cogollo de la palma de aceite, *Elaeis guineensis* Jacq. *Revista Palmas, 17*(2), 57-60. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/545

Nieto, L., Gómez, P., & Lozano, C. (1996). Identificación y reproducción del complejo pudrición de cogollo de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Revista Palmas, 17*(2), 63-68. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/546

Ochoa, G., & Bustamante, E. (1974). Investigación del agente causal de la pudrición de flecha en palma africana. *Revista ICA, 9*(4), 425-433. http://hdl.handle.net/20.500.12324/23191

Oliveros, M., Castro, W., & Rairan, N. (2010). *Criterios para detección y manejo de la marchitez letal*. https://www.researchgate.net/publication/260201819_CRITERIOS_PARA_DETECCION_Y_MANEJO_DE_LA_MARCHITEZ_LETAL

Peña, E. (2010). *Informe final proyecto "Evaluación de materiales de palma de aceite* Elaeis guineensis *y* Elaeis oleifera *frente a la enfermedad mancha anular"* [Convenio 002/2006 IICA-MADR, Contrato 354/2006]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Peña, E., Cadena, M., Reyes, R., & Bastidas, S. (2010). Descripción de síntomas de mancha anular en el híbrido interespecífico de palma aceitera (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*). *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 11*(1), 48-52. https://doi.org/10.21930/rcta.vol11_num1_art:194

Peña, E., & Jiménez, O. (1993). El nematodo *Rhadinaphelenchus cocophilus* (Cobb) asociado con la hoja corta de la palma de aceite en la zona de Tumaco. *Revista Palmas, 14*(3), 47-52. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/383

Peña, E., Jiménez, O., & Arciniegas, A. (1991). *Mancha anular de la palma africana* [Boletín técnico n.º 008]. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA); Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma).

Peña, E., & Reyes, R. (1997). Dinámica poblacional del insecto *Rhynchophorus palmarum* L., en la zona de Tumaco. *Revista Palmas, 18*(4), 29-33. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/600

Peña, E., Reyes, R., & Bastidas, S. (2001). Efectividad de una feromona de agregación en dos tipos de trampas para la captura del insecto *Rhynchophorus palmarum* en la zona de Tumaco (Nariño, Colombia). *Revista de Ciencias Agrícolas, 18*(2), 11-19. https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rfacia/article/view/1451

Peña, E., Reyes, R., & Bastidas, S. (2006). Hipótesis sobre la incidencia del complejo pudrición de cogolllo en la zona de Tumaco durante el periodo 2005-2006. *Revista de Ciencias Agrícolas, 23*(1-2).

Peña, E., Reyes, R., Bastidas, S., Lozano, I., & Morales, F. (2010). Susceptibilidad en vivero de materiales de palmas aceiteras (*Elaeis guineensis, Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) a las enfermedades mancha anular y anillo clorótico. *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 34,* 33-45.

Perthuis, B. (1991). Búsqueda de la etiología de la pudrición de cogollo en el Ecuador oriental. *Revista Palmas, 12*(2), 25-30. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/281

Rairán, N., Beltrán, J., & Arango, M. (2015). Tecnologías para el manejo de la marchitez letal de la palma de aceite validadas en la zona oriental de Colombia. *Revista Palmas, 36*(1), 55-62.

Rajanaidu, N. (1994). *Porim oil palm genebank: Collection, evaluation, utilization and conservation of oil palm genetic resources*. Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).

Realpe Aranda, F. J., Bustillo-Pardey, A. E., & López-Núñez, J. C. (2007). Optimización de la cría de *Galleria mellonella* (L.) para la producción de nematodos entomopatógenos parásitos de la broca del café. *Cenicafé, 58*(2), 142-157.

Renard, J. L., & Quillec, G. (1984). Destructive diseases of oil palm in Africa and South America. *Olèagineux, 39*(2), 57-67.

Reyes, R. (2012). *Respuesta fisiológica de la palma aceitera (*Elaeis guineensis *Jacq.) a la disponibilidad de agua en el suelo* [Tesis de doctorado]. Universidad de Costa Rica.

Reyes, R., Riaño, N., Chinchilla, C., & Ibarra, N. (2013). Physiological response of young oil palms (*Elaeis guineensis*) to soil drying by evapotranspiration in two soil types under greenhouse conditions and possible implications for spear rot development. *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 40,* 1-15.

Rocha, P., Castilla, C., Rey, L., & Tovar, J. (2004). *Visita técnica al Centro de Investigación Iniap y a la plantación Palmeras del Ecuador, S. A: reporte final de actividades*. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).

Rodríguez, C., Oehlschager, C., & Chinchilla, C. M. (2016). Componentes básicos en trampas para adultos de *Rhynchophorus palmarum*: nota técnica. *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 46,* 20-24.

Rojas, E. (1972). *Investigaciones sobre la enfermedad pudrición del cogollo de la palma africana en la plantación La Arenosa de Coldesa, S. A., Turbo, departamento de Antioquia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Rojas, E. (2013). Detección y manejo de la marchitez sorpresiva (MS) en híbrido O × G. *Revista Palmas, 34*(4), 89-93.

Romero, M. (2018, agosto). Polinización artificial de híbridos O × G para la obtención de frutos partenocárpicos y la producción de aceite (*Elaeis oleifera* Cortés × *Elaeis guineensis* Jacq.). *El Palmicultor, 558*, 15-18. https://web.fedepalma.org/nota-tecnica

Romero, M., Caicedo, A., & Ayala, I. (2020, febrero). Utilización de ácido 1-naftalenacético (ANA) para incrementar la producción de aceite en palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq). *El Palmicultor, 576*, 13-15. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/12981

Sánchez, A. (1990). Enfermedades de la palma de aceite en América Latina. *Revista Palmas, 11*(4), 5-38. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/265

Sánchez, N., Fuentes, F., Torres, M., Rocha, P., Calvache, H., & Gómez, P. (2003). La marchitez letal no es la misma marchitez vascular africana causada por *Fusarium*. *Revista Palmas, 24*(4), 9-20. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/975

Sánchez, P. A. (1968). Nuevas observaciones sobre la marchitez progresiva y la marchitez sorpresiva de la palma africana en la zona del Meta. *Agricultura Tropical, 24*(8), 451-460.

Sánchez, P. A., & Patiño, H. (1964). Estado fitosanitario de la plantación de palma africana Risaralda (Cúcuta, Norte de Santander). En Instituto de Fomento Algodonero (IFA), *Enfermedades de las plantas oleaginosas en Colombia: informes técnicos* (pp. 11-17).

Santacruz, L. H., Zambrano, J., & Amézquita, M. (2004). Comportamiento de la pudrición de cogollo en la zona oriental de Colombia. *Palmas, 25*(especial), 220-231.

Sarria, G. A., Torres, G. A., Aya, H. A., Ariza, J. G., Rodríguez, J., & Martínez, G. (2008). *Phytophthora* sp. es el responsable de las lesiones iniciales de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas, 29*(3), 31-41.

Schornack, S. (2016). Nuevas estrategias para el control de enfermedades de la palma de aceite mediante la investigación de patógenos de la planta. *Revista Palmas, 37*(número especial, tomo I), 119-122. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11895

Sinisterra, K., Caicedo, A., Cortés, I., Camperos, J., Ayala, I., & Mosquera, M. (2019). Validación del punto óptimo de cosecha en el cultivar híbrido interespecífico O × G Corpoica (Cereté × Deli y Cereté × Yangambi). *Ceniavances,* (189). http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30419.71209

Torrecilla, R. E. (2013). Detección y manejo de la marchitez sorpresiva (MS) en híbrido O × G. *Revista Palmas, 34*(4), 89-93.

Torres, J., Gutiérrez, M., & Chinchilla, C. (2015). Seguimiento morfofisiológico de palmas aceiteras (*Elaeis guineensis* Jacq.) afectadas por pudriciones del cogollo (PC). *Revista ASD Oil Palm Papers, 44*, 17-25.

Torres, M., Ayala, L., Gómez, P. L., & Martínez, R. (2000). Caracterización morfofisiológica de palmas de aceite tolerantes y susceptibles a la pudrición de cogollo. *Revista Palmas, 21*(número especial, tomo I), 135-147. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/775

Torres, E., & Tovar, J. (2004). Estudio epidemiológico de la enfermedad marchitez letal de la palma de aceite en plantaciones de Villanueva, Casanare. *Revista Palmas, 25*(número especial, tomo II), 210-219. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1085

Torres, J. L., Tovar, J. P., Gutiérrez, D., Aldana, R., & Guerrero, J. M. (2006). Búsqueda de *Phytomonas* sp. (flagelados asociados a la marchitez sorpresiva) en palmas afectadas por marchitez letal. *Ceniavances, 134*, 1-5. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/ceniavances/article/view/10331

Torres, G. A., Sarria, G. A., Salcedo, S., Varón, F., Aya, H. A., Ariza, J. G., Morales, L., & Martínez, G. (2008). Opciones para el manejo de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite en áreas de baja incidencia de la enfermedad. *Revista Palmas, 29*(3), 63-72. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1358

Torres, G. A., Sarria, G. A., Varón, F., Coffey, M. D., Elliot, M. L., & Martínez, G. (2010). First report of bud rot caused by *Phytophthora palmivora* on african oil palm. *Plant Disease, 94*(94). https://doi.org/10.1094/pdis-94-9-1163a

Torres, J., Gutiérrez, M., Chinchilla, C., & Mata, R. (2014). Características del suelo, desarrollo radical e incidencia de PC (pudrición del cogollo) en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Revista* ASD *Oil Palm Papers, 43,* 1-12.

Van Hoff, H. A,. & Seinhorst, J. W. (1962). *Rhadinaphelenchus cocophilus* associated with little leaf of coconut and oil palm. *Tijdschrift Over Plantenziekten, 68,* 251-256. https://doi.org/10.1007/BF02044432

Van de Lande, H. L. (1991). Pudrición de cogollo en palma aceitera en Surinam: investigaciones desde 1986 hasta 1990. *Revista Palmas, 12*(2), 11-15. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/279

Van de Lande, H. L. (1993). Studies on the epidemiology of spear rot in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Suriname. Proefschrift Landbouwuniversiteit Wageningen. http://edepot.wur.nl/200764

Van Slobbe, W., & Rocha de Souza, R. L. (1991). Amarillamiento fatal o pudrición de cogollo en Denpasa - Brasil. *Revista Palmas, 12*(2), 17-23. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/280

Vargas, M. (1992). *Fusarium solani*: agente causal del complejo pudrición del cogollo. *Revista Palmas, 13*(1), 59-67. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/331

Venturieri, A., Fernandes, W. R., Boari, A J., & Vasconcelos, M. A. (2009). Relação entre ocorrência do amarelecimento fatal do dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) e variáveis ambientais no estado do Pará. En J. Neves, & L. Soares (eds.) *Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril,* INPE (pp. 523-530). Embrapa Amazônia Oiental. http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2009/03.02.18.19/doc/pagina_rosto.htm

Zúñiga, E., Torres, G., Sarria, G., Malagón, V., Aldana, R., Cardona, C., & Martínez, G. (2009). *Establecimiento de colonias de* Mynduscrudus crudus *Van Duzee (Hemiptera: Cixiidae), posible vector del agente causal de la marchitez letal* (ML) *de palma de aceite (*Elaeis guineensis *Jacq.) en Colombia.* Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).



Sección III



Metodologías no convencionales usadas en el mejoramiento genético y la conservación de la palma de aceite en AGROSAVIA



Capítulo 9
Pruebas de progenies F2 y metodología para el mejoramiento acelerado de la palma de aceite

Silvio Bastidas P., Eduardo Peña R., Rafael Reyes C.

El mejoramiento genético de algunos cultivos perennes, como el de palma de aceite *E. guineensis*, presenta obstáculos con los sistemas tradicionales de selección. Uno de ellos es la duración de cada ciclo (Le Guen et al., 1993), que en la palma es de diez años (Bastidas et al., 2005) (figura 9.1). El problema es mayor cuando se requiere más de un ciclo para lograr el objetivo, como en la introgresión de genes entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis* (Bastidas et al., 1993). Otro obstáculo es la baja densidad de siembra, que es de 143 plantas/ha en *E. guineensis* (Da Rocha et al., 2010; Rojas, 1981) y de 115 plantas/ha en los híbridos interespecíficos O × G (Bastidas et al., 2013). Estas bajas densidades de siembra implican grandes áreas de terreno para evaluar bajo número de progenies por ciclo,[1] entre otras razones porque el tamaño de la parcela experimental altera los resultados (Hardon,1983). Para evitar estos obstáculos,[2] se desarrolló una metodología de selección acelerada, llamada "prueba de progenies F2"[3] (PPF2), en principio concebida para monitorear la transmisión y conservación de

1 Para evaluar 20 progenies bajo un diseño en bloques completos al azar con cuatro repeticiones de 16 palmas (unidad experimental), se requieren 11 ha de terreno (área experimental), con bordes de protección de 13 ha

2 Debido a la naturaleza perenne de la palma de aceite, su largo ciclo biológico, y el requerimiento de grandes áreas de terreno, algunos investigadores consideran a esta especie como el candidato ideal para aplicar herramientas genómicas dirigidas a su mejoramiento genético (Meerow et al., 2012).

3 P_0: generación parental; F1: primera generación de cruzamiento; F2: segunda generación de cruzamiento.

la resistencia a la enfermedad pudrición del cogollo (PC) en generaciones avanzadas de cruzamiento y retrocruzamiento (Bastidas et al., 2013).

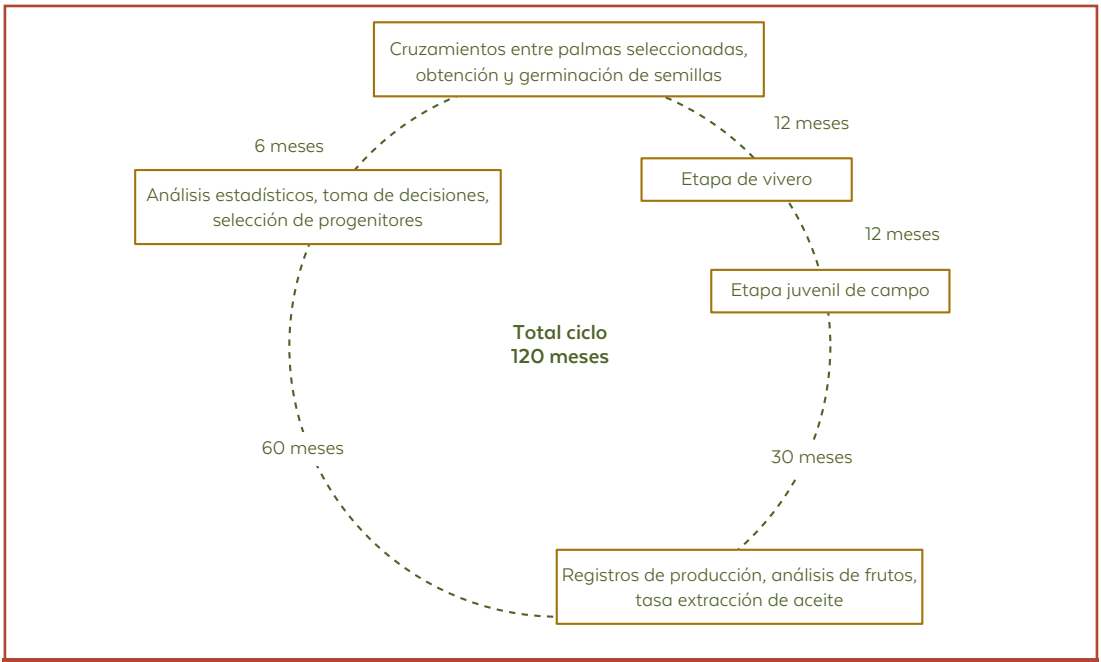


Figura 9.1. Representación gráfica de un ciclo convencional de selección en la palma de aceite *E. guineensis*.

Fuente: Elaboración propia

Los obstáculos planteados son la principal justificación para la adopción de la PPF2, ya que con ella pueden seleccionarse progenitores en dos generaciones consecutivas, la parental y la progenie F1, con base en el comportamiento de las progenies F2.

Soporte técnico

Las pruebas de progenies son una metodología de selección ampliamente usada en mejoramiento animal, sobre todo para estimar el valor genético y la capacidad de herencia del progenitor masculino, a partir del comportamiento promedio de su descendencia (es lo más cercano a medir el valor reproductivo)

(Falconer, 1984). En la palma de aceite, la selección de los progenitores masculinos también se lleva a cabo con base en pruebas de progenies, porque estos progenitores no pueden ser valorados por su propia producción debido a que tienen esterilidad femenina (Forster et al., 2017), lo cual requiere un ciclo adicional de evaluación de las progenies, es decir, otros diez años.

La PPF2 es una metodología de selección con la que se puede estimar el comportamiento de las progenies F1 y de los padres P_0 con respecto a una característica determinada, con base en el comportamiento de las progenies F2, sin realizar la evaluación completa de las progenies F1 (Bastidas et al., 2013). Desde el punto de vista técnico, la PPF2 es una extensión de la prueba de progenies tradicional, y es apropiada para trabajar con características de alta expresión, fáciles de observar en campo, especialmente cuando el objetivo inmediato no es la producción, como cuando se quiere observar la reacción de la planta a una enfermedad con sintomatología definida, típica, o la proporción de ácidos grasos insaturados, o la precocidad.

La PPF2 se fundamenta en el siguiente postulado: *el genotipo de un organismo es inmutable después de la unión de los gametos masculino y femenino, lo que garantiza la superioridad de un genotipo en cualquier etapa de su vida*. Expresado de otra forma, el genotipo heredado por una planta no cambia con la edad de esta (Bastidas et al., 2013), aun si se consideran diferentes grados de expresión de las características por acción de los genes o como respuesta al medio ambiente y a su interacción con el ambiente (Márquez, 1985; Molina, 1992). Se han encontrado correlaciones significativas entre el rendimiento del fruto en los cuatro primeros años y el rendimiento de la producción posterior, tanto para familias como para palmas individuales; por lo tanto, es posible usar los datos de producción de los primeros años como base para la evaluación de palmas progenitoras (Sparnaaij & Van der Vossen, 1980).

Al aplicar el postulado anterior a la palma de aceite, se debe aceptar que la superioridad de algunas palmas, sin importar su edad, obedece a su constitución genética. Además, las leyes de la herencia aseguran que una parte de sus descendientes será igual o superior. Por lo tanto, palmas jóvenes, que inician producción, pueden utilizarse en procesos de mejoramiento. Es recomendable trabajar con características de alta expresión, fáciles de monitorear en la etapa juvenil de producción (Bastidas et al., 2013).

Descripción de la metodología

Consiste en producir generaciones sucesivas lo más temprano posible en el ciclo biológico de las palmas. En la práctica, la metodología para mejoramiento acelerado consiste en aprovechar las primeras inflorescencias de una palma joven, para producir una generación de cruzamiento (F1) y, a partir de esta, generar otra generación de cruzamiento (F2) (Bastidas et al., 2013). La selección de progenitores se basa en el comportamiento de las progenies F2. En este caso, el propósito de las F1 únicamente es la generación de las progenies F2, porque las evaluaciones se realizan sobre estas últimas. Un ciclo completo de PPF2 se ilustra en la figura 9.2.

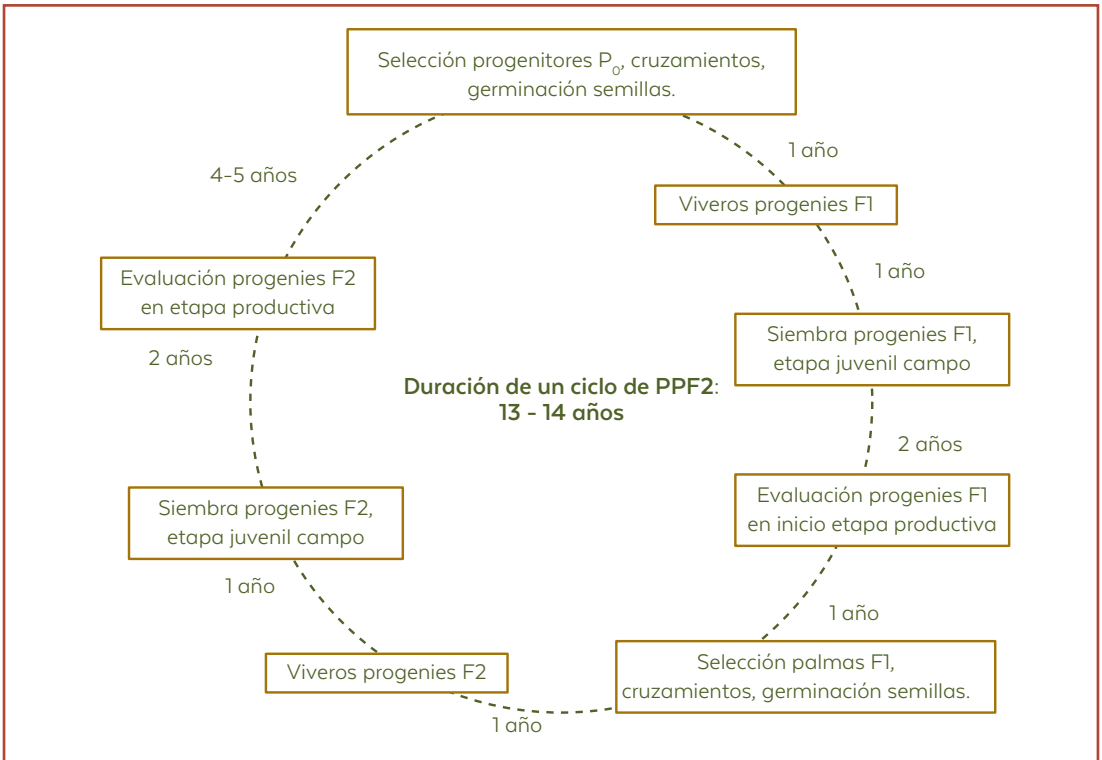


Figura 9.2. Representación gráfica de un ciclo completo para una PPF2 en la palma de aceite *E. guineensis*.

Fuente: Elaboración propia

Objetivos de la prueba de progenies F2

En la palma de aceite, las pruebas de progenies tradicionales se implementan con varios propósitos: confirmar el potencial productivo de los progenitores Pisífera usados como padres, los cuales son estériles en su parte femenina (Kushairi et al., 2000); valorar el potencial productivo de las progenies Ténera,[4] y obtener estimaciones confiables de la habilidad combinatoria general y específica de los progenitores (Sambanthamurthi, 2009).

La PPF2 apunta a los mismos propósitos y además a lo siguiente:

- Seleccionar al mismo tiempo progenitores en la generación F1 y en la generación paternal (P_0) con base en el comportamiento de las progenies F2.
- Explorar con alto grado de confianza la herencia de una característica, dos o más generaciones después del cruzamiento de los padres donantes de la característica (por ejemplo, la tolerancia a una enfermedad).
- Reafirmar el potencial productivo de las progenies F2 de un grupo de progenitores P, sin realizar el ciclo de evaluación de las progenies F1.

En la palma de aceite, llegar a un segundo o tercer ciclo de selección equivale a 20 o 30 años, respectivamente. Lo importante de la PPF2 no es solo el ahorro de tiempo, sino también la posibilidad de visualizar en corto tiempo el producto que se obtendrá al desarrollar un proyecto de investigación a largo plazo, con más de dos ciclos de selección. Por ejemplo, con esta metodología se comprobó que los segregantes híbridos O × G de la primera generación de retrocruzamiento (RC1) entre las palmas de aceite *E. oleifera* y *E. guineensis* conservan la tolerancia a la enfermedad de la PC, aportada por la especie resistente *E. oleifera*; además, los híbridos recuperan la fertilidad del polen y parte del aceite (tasa de extracción) perdido en la primera generación O × G sin evaluar. Gracias a estos beneficios fue posible desarrollar tres cultivares híbridos aceptados en el Registro Nacional de Cultivares del ICA: O × G Corpoica Elmira (ICA, 2011), Pacífico RC1 (ICA, 2014a) y Tumaco RC1 (ICA, 2014b). Los híbridos O × G Corpoica Elmira (F1) se obtienen mediante cruzamiento controlado entre palmas americanas *E. oleifera* (O)

4 En palma de aceite africana existen dos formas o tipos de palma, las Dura y las Pisífera; el tercer tipo, Ténera, es un híbrido entre las dos anteriores (Dura × Pisífera) (Kushairi et al., 2000).

y palmas africanas *E. guineensis* (G) (Bastidas, 2013). Los híbridos Pacífico RC1 y Tumaco RC1 se consiguen con cruzamientos regresivos de los híbridos O × G hacia la especie *E. guineensis* de los tipos Dura y Pisífera (G) (Bastidas et al., 2013).

Trabajo de campo para establecer la PPF2

El procedimiento es el siguiente:

1. Iniciar con una población mejorada.
2. Seleccionar progenitores con la característica objetivo (característica que se monitorea en los descendientes a través de dos o más generaciones consecutivas).
3. Realizar un plan de cruzamientos para producir progenies F1.[5]
4. Establecer las progenies F1 en campo.
5. Seleccionar palmas F1 en etapa inicial de producción, con base en precocidad, floración normal, uno a dos años de registro de producción y tasa de extracción de aceite.
6. Llevar a cabo un plan de cruzamientos para producir las progenies F2.
7. Establecer las pruebas de progenies F2 (PPF2).
8. Evaluar las PPF2 y confirmar la presencia de la característica objetivo en estas progenies.
9. Confirmar la selección de progenitores P_0 y F1. El proceso se observa en el flujograma de la figura 9.3.

5 Los planes de cruzamiento se realizan con base en un diseño genético de apareamientos. En el programa de mejoramiento de la palma de aceite de AGROSAVIA se utiliza el diseño genético Carolina Norte I (Márquez, 1985; Sambanthamurthi et al., 2009; Vallejo et al., 2005).

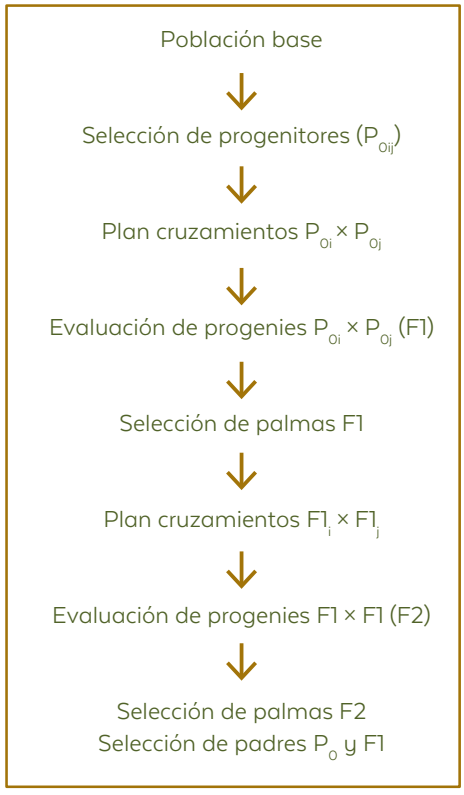


Figura 9.3. Procedimiento de campo para desarrollar las PPF2 en la palma de aceite *E. guineensis*.
Fuente: Elaboración propia

Aplicación de la PPF2 en las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*

Antecedentes. Los híbridos O × G del ecotipo Cereté del valle del Sinú fueron creados como respuesta a la PC, la cual arrasó con la plantación La Arenosa de Coldesa, ubicada en Turbo, Antioquia (Rojas, 1972), y para explorar la posibilidad de incorporar a la palma *E. guineensis* características de la palma americana *E. oleifera,* como baja tasa de crecimiento, alta proporción de ácidos grasos insaturados, carotenos y tocoferoles (Chinchilla et al., 2007; Sánchez Chia, 2012)..

Entre 1977 y 1990 se realizaron pruebas de evaluación con los híbridos O×G del Sinú, "pioneros" de los actuales híbridos O×G de AGROSAVIA, en el C. I. El Mira, ubicado en Tumaco. Los resultados confirmaron la resistencia de los híbridos O×G Sinú a enfermedades, entre ellas la PC (Meunier & Boutin, 1975; Meunier et al., 1976; Meunier, 1991). Esta tolerancia ha sido reportada por varios investigadores, incluso en diferentes tipos de híbridos O×G.[6] El costo de esta solución tecnológica contra la PC fue una reducción significativa de la tasa de extracción de aceite con respecto a los cultivares Ténera (11 a 15 % contra 22 a 24 % de extracción, respectivamente) (Bastidas, 2013). Por esta razón, quedaron relegados en bancos de germoplasma y colecciones de trabajo, o simplemente como muestras en algunas plantaciones, lo que planteó las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Es posible recuperar la tasa de extracción de aceite mediante cruzamientos regresivos hacia la especie *E. guineensis*?
- ¿La resistencia a la PC se mantiene en generaciones sucesivas de retrocruzamiento hacia la especie *E. guineensis*?
- ¿Qué se puede esperar de los retrocruzamientos hacia la especie *E. guineensis,* susceptible a la PC pero con alta productividad de aceite?
- ¿El perfil lipídico del aceite se altera mediante diferentes cruzamientos regresivos?
- ¿Qué se puede esperar de los retrocruzamientos hacia la especie *E. oleifera,* resistente a la PC pero con baja productividad de aceite?

Prueba experimental

La PPF2 se desarrolló en el C. I. El Mira. Se puso en práctica entre 1993 y 2002 con el proyecto "Introgresión de genes entre las especies *E. guineensis* y *E. oleifera"* (Bastidas et al., 1993). En la tabla 9.1 se indican los materiales involucrados en la investigación.

6 La resistencia fue reportada por varios investigadores a medida que los híbridos se exponían a la enfermedad. Los autores se indican a continuación según el orden cronológico de sus reportes: Méndez (1974); Vallejo y Cassalett (1975); Meunier y Boutin (1975); Meunier et al. (1976); Turner (1981); Hartley (1988); Le Guen et al. (1991); Franqueville (2001); Corley y Tinker (2003); Bastidas et al. (2003); Amblard et al. (2004); Torres et al. (2004); Zambrano (2004); Chinchilla et al. (2007); Barba. (2010).

Tabla 9.1. Recursos genéticos de la palma de aceite involucrados en las pruebas de progenies F2

Tipo de palma	Nombres comunes o nombre experimental	Convención
Palma africana de aceite *E. guineensis*	Palma africana, palma de aceite	G
Palma americana de aceite *E. oleifera*	Palma nolí, palma americana de aceite	O
Híbridos interespecíficos entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*	Híbridos O × G Híbridos F1	F1
Híbridos interespecíficos de primera generación de retrocruzamiento	Híbridos O × G RC1 Híbridos RC1	RC1
Híbridos interespecíficos de segunda generación de retrocruzamiento	Híbridos O × G RC2 Híbridos RC2	RC2

Fuente: Elaboración propia

La proporción teórica de segregantes en un cruzamiento regresivo es 1:1, esto es, 50 % de plantas afines a un progenitor y 50 % al otro progenitor. En cada uno de los ciclos de RC se espera un 50 % de palmas afines al híbrido O × G y el otro 50 % afín a la palma *E. guineensis*, y la diferencia estaría en el aporte genético de los progenitores P_0. En los segregantes híbridos O × G RC1 se espera 75 % de carga genética de *E. guineensis* y 25 % de *E. oleifera* (Bastidas et al., 2007), mientras que en los híbridos O × G RC2, un 87,5 % de carga genética de *E. guineensis* y 12,5 % de *E. oleifera*. En la práctica, estas proporciones esperadas no se cumplen; por el contrario, los RC en palma de aceite segregan series de fenotipos diferentes, los cuales muestran características extremas e intermedias entre sus progenitores (Escobar & Alvarado, 2004). La prueba total se realizó según la siguiente secuencia (Bastidas et al., 2007):

- Entre 1993 y 1994, en el C. I. El Mira se produjeron semillas de cinco híbridos RC1 mediante cruzamientos regresivos del híbrido interespecífico F1 hacia *E. guineensis* (tabla 9.2).
- En 1994 se establecieron en campo las progenies de los cinco RC1.
- En etapa inicial de producción se realizó la selección de palmas RC1 afines a O × G para producir las progenies RC2 mediante cruzamiento con polen

de *E. guineensis*. Los criterios de selección fueron precocidad en floración y fructificación, emisión de inflorescencias femeninas fértiles y formación de racimos normales.

Tabla 9.2. Primera generación de retrocruza entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*, mediante cruzamiento de palmas del híbrido O × G (F1) con polen de *E. guineensis*

Identificación de los cruces retrocruzamientos (RC1)	Número de plantas	
	Sembradas	Experimentales
EM-0383H × EM-0048D	61	45
EM-1107H × EM-1469D	32	25
EM-0617H × LB-0256D	23	17
EM-0071H × EM-0048D	30	22
EM-0617H × EM-3713P	76	49

H: híbrido O × G; D: Dura; P: Pisífera; EM: El Mira (Colombia); LB: Lobé (Camerún).

Fuente: Bastidas et al. (2013)

- En 1998 se produjeron semillas de trece RC2, al retrocruzar palmas de los híbridos RC1 con polen de palma de *E. guineensis* (tabla 9.3).
- En 1999 se establecieron en campo trece progenies RC2, que fueron evaluadas en campo para resistencia a enfermedades. Por esa época, la PC presentaba bajos niveles de incidencia en Tumaco y los casos eran raros y dispersos, aunque prevalecían enfermedades letales como mancha anular, marchitez sorpresiva y anillo rojo. La PC adquirió características epidémicas a partir de 2004, cuando las progenies RC2 habían cumplido cinco años de sembradas en campo. Lo que se observó entonces es que los segregantes híbridos O × G eran resistentes a la PC, mientras que los segregantes *E. guineensis* eran afectados por la enfermedad (Bastidas et al., 2007).

Tabla 9.3. Segunda generación de retrocruza entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*, mediante cruzamiento de palmas de los híbridos RC1 con polen de *E. guineensis*

Identificación de los híbridos RC2 (híbrido RC1 × palma de aceite)	Plantas del híbrido RC2 sembradas en campo
EM0208RC1 × EM0048D	37
EM0106RC1 × EM0048D	31
EM0311RC1 × EM3715P	39
EM0205RC1 × EM0048D	13
EM0502RC1 × EM0048D	24
EM1413RC1 × EM0254T	44
EM0602RC1 × EM0418D	32
EM0602RC1 × EM0048D	32
EM1002RC1 × EM0205T	10
EM0916RC1 × EM0205T	13
EM1310RC1 × EM0254T	25
EM1602RC1 × EM0254T	12
EM0913RC1 × EM0205T	40

EM: serie ElMira; RC1: primera generación de retrocruzamiento hacia la especie *E. guineensis*; D: Dura; P: Pisífera; T: Ténera.

Fuente: Elaboración propia

- En forma paralela, desde 1995 hasta 2002 se evaluaron las cinco progenies RC1, y los resultados validaron la metodología acelerada (PPF2). A continuación, se presenta un resumen del comportamiento de los híbridos RC1 con base en siete años de observación y cuatro de registros de producción.

Comportamiento de los híbridos RC1

Tipos de segregación. Como se indicó antes, la proporción teórica de segregantes en un cruzamiento regresivo es 1:1, es decir, 50 % de plantas afines a un progenitor y 50 % al otro progenitor (hipótesis de trabajo). Los resultados indicaron que 62,7 % de las palmas RC1 eran segregantes híbridos O × G, y 37,3 %, segregantes afines al genotipo *E. guineensis*. Estos valores no se ajustan a la proporción esperada para un cruzamiento regresivo (prueba de la ji al cuadrado [X^2]) (Little & Hills, 1976; Steel & Torrie, 1985).

El retrocruzamiento EM-1107H × EM-1469D se aproximó a la proporción esperada, con 52 y 48 % respectivamente. En contraste, 91 % de las palmas fueron híbridos O × G en las progenies EM-0071H × EM-0048D y únicamente 9 % de las palmas resultaron afines a la especie *E. guineensis* (tabla 9.4). Las desviaciones en la proporción se atribuyen a la esterilidad de los híbridos F1, lo cual modificó el número y tipo de gametos disponibles para la fecundación. La baja fertilidad de los híbridos se manifiesta en el predominio de frutos partenocárpicos en racimo (Hardon & Tan, 1969).

Tabla 9.4. Prueba de ji cuadrado (X^2)para el porcentaje de segregación en las progenies de cinco RC1

Retrocruzamientos	Número de palmas (ud.)	Segregantes híbridos (%)	Segregantes *E. guineensis* (%)	Prueba de la X^2
EM-0383H × EM-0048D	45	68,9	31,1	0,0112 ns*
EM-1107H × EM-1469D	25	52,0	48,0	0,8414**
EM-0617H × LB-0256D	17	82,4	17,6	0,0076 ns
EM-0071H × EM-0048D	22	90,9	9,1	0,0001 ns
EM-0617H × EM-3713P	49	83,7	16,3	<0,0001 ns
Población total	**158**	**75,3**	**24,7**	**<0,0001 ns**

* La probabilidad de obtener una desviación tan grande como la observada por casualidad es <1 %.

** La probabilidad de obtener una desviación tan grande como la observada por casualidad es de 84 %.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la desviación de la proporción 50:50 también se puede explicar por dos acciones de procedimiento:

1. En vivero se seleccionaron las plantas con mayor desarrollo, mayor vigor y mejor apariencia fenotípica, como se recomienda en palma de aceite (Bastidas et al., 2002). Esta acción propició la selección indirecta de híbridos O × G (ya que estas son características propias de los híbridos) y el descarte de palmas *E. guineensis*.
2. La prueba experimental se llevó a cabo con un bajo número de plantas.

Los retrocruzamientos en palma de aceite dan lugar a la segregación de series de fenotipos con características extremas e intermedias (Escobar & Alvarado, 2004).

Características vegetativas. Los híbridos RC1 presentaron menor tasa de crecimiento (24,6 cm/año) que el cultivar Ténera Corpoica Elmira (46,4 cm/año), lo cual confirma que los híbridos RC1 aún conservan el aporte genético de la generación parental de *E. oleifera* (tabla 9.5). Cada hoja de los híbridos RC1 tuvo 8,8 m^2 de superficie foliar, lo que contrasta con los 6,5 m^2 del progenitor recurrente *E. guineensis*. Las palmas RC1 demuestran su vigor híbrido en las características de la hoja: largo, peso y área de la hoja; largo y ancho de los foliolos, vigor del pecíolo y raquis (Bastidas et al., 2007).

Los RC1 tuvieron los siguientes grados de expresión de vigor heredados del progenitor híbrido F1: diámetro del tallo (81 cm), largo del pecíolo (1,4 m), largo del raquis (6,2 m) y largo de la hoja (7,6 m). La expresión de estas características fue mayor en las palmas RC1 seleccionadas por producción: diámetro del tallo (83,5 cm), largo del pecíolo (1,4 m), largo del raquis (6,4 m) y largo de las hojas (7,7 m) (tabla 9.5). En estudios previos se había encontrado una alta correlación directa entre el diámetro y altura del tallo y la producción de racimos de fruta fresca (RFF) (Breure, 1987a; Hartley,1988).

El índice de área foliar[7] es la relación entre la superficie foliar de las palmas de una hectárea y 10.000 m^2 de terreno, y es un parámetro que determina el nivel de competencia entre plantas (Corley & Breure, 1981). En palma de aceite, la mayor producción de racimos por hectárea se alcanza con índices de área foliar de 6 a 7 en edad adulta (Corley, 1973). Los RC1 de la investigación aún están en etapa juvenil de producción y por eso los índices de área foliar son menores al óptimo, aunque 5,3 de índice en los RC1 seleccionados es consecuente con su mayor producción (35 t/ha.) (Bastidas et al., 2007).

La relación de área foliar se define como la proporción entre el área de las hojas producidas por una palma en un determinado periodo de tiempo, y la materia seca empleada para su crecimiento vegetativo (Corley & Breure, 1981), y constituye una característica de heredabilidad (Tan, 1978). Los híbridos RC1 emplearon en crecimiento vegetativo entre 1,7 y 2,4 m^2/kg de materia seca. En los híbridos, gran parte de los fotoasimilados producidos en la fotosíntesis son utilizados para este crecimiento (Bastidas et al., 2005).

7 Este índice es apropiado para las palmas *E. guineensis*. Para los nuevos cultivares F1 y RC1 se deben generar otros índices. Lo mismo aplica para la relación de área foliar.

Características de producción. Contrario a los híbridos F1, los RC1 producen polen fértil y viable (Alvarado et al., 2000; Bastidas et al., 2003). Las palmas híbridas semejantes al tipo Dura, segregadas en los retrocruzamientos hacia Dura, no presentaron racimos malogrados (inflorescencias femeninas estériles), y en cambio esta anormalidad fue común en las palmas híbridas afines al tipo Pisífera, segregadas en los retrocruzamientos hacia Pisífera. Estos resultados sugieren que las palmas Pisífera pueden estar involucradas en la esterilidad de los híbridos F1 (Bastidas et al., 2007). En pruebas agronómicas llevadas a cabo en Tumaco para comprobar la resistencia de los híbridos O × G a la PC, se encontró 44,2 % de viabilidad en los embriones de los híbridos O × G (F1), lo que contrasta con la viabilidad de los híbridos RC1, que fue de 93,7 %. Estos resultados indican la restauración de la fertilidad en los gametos femeninos de los RC1 (Bastidas et al., 2010). Desde tiempo atrás, se recomendaba restaurar la fertilidad de los híbridos mediante retrocruzamiento, para hacer de este cultivo una alternativa viable (Le Guen et al., 1991).

Aunque el propósito de esta primera parte de la investigación fue monitorear los aportes de la especie *E. oleifera* (resistencia a enfermedades, baja tasa de crecimiento y calidad de aceite), lo cual se cumplió, también se estudiaron algunos indicadores de producción con el fin de seleccionar palmas RC1 para dar lugar a la generación RC2 (Bastidas et al., 2007).

Con base en cuatro años de registros de producción se seleccionaron doce palmas RC1, las cuales presentaron el siguiente comportamiento: crecimiento de 25,8 cm/año; emisión de 19 hojas/año, cada una de 9,3 m^2 de superficie foliar, y producción de 16 racimos/palma/año, cada uno de 15,9 kg, para una producción de 35 t/ha/año, superior a las 30 toneladas producidas por el testigo Ténera al quinto año de producción (Bastidas et al. 2007) (tabla 9.5).

Tabla 9.5. Comportamiento en campo de los híbridos O × G de primera generación de retrocruzamiento (RC1) entre las especies *E. guineensis* y *E. oleifera* con algunas características vegetativas y de producción

Descriptor	0383H × 0048D	1107H × 1469D	0617H × 0256D	0071H × 0048D	0617H × 3713P	Promedio general RC1	Promedio selección RC1	Testigo Ténera Corpoica
Tasa de crecimiento del tallo (cm/año)	22,6	25,4	24,4	26,4	24,0	24,6	25,8	46,4
Diámetro del tallo (cm)	81,8	80,4	82,7	82,2	78,3	81,1	83,5	71,7
Largo del pecíolo de la hoja 25 (m)	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,2
Largo del raquis de la hoja 25 (m)	6,2	6,1	6,3	6,4	6,2	6,2	6,4	5,7
Área de la hoja 25 (m^2)	8,8	8,3	9,4	9,2	8,2	8,8	9,3	6,5
Tasa de emisión de hojas (unidad/año)	17,0	18,0	19,0	19,0	18,0	18,0	19,0	17,0
Índice de área foliar (unidad)	5,1	4,9	5,0	4,7	4,7	4,9	5,3	3,8
Relación de área foliar (m^2/kg)	2,4	2,1	1,9	1,7	2,2	2,0	1,9	2,9
Número de racimos/palma (unidad)	10,0	12,0	10,0	11,0	13,0	11,0	16,0	17,0
Peso promedio/racimo (kg)	18,4	15,5	15,8	13,4	12,5	15,1	15,9	12,4
Producción palma/año (kg)	177,5	177,7	166,2	134,1	158,9	162,9	245,1	212,4
Producción hectárea/año (t)	25,4	25,4	23,8	19,2	22,7	23,3	35,0	30,0
Índice de racimos (unidad)	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8
Frutos totales en racimo (%)	68,9	55,8	58,2	58,5	57,1	60,4	65,0	75,7
Pulpa en fruto (%)	53,0	63,8	61,3	53,1	64,1	58,0	65,9	78,9
Cuesco en fruto (%)	34,8	28,0	30,6	44,3	24,5	33,7	24,4	10,2
Almendra en fruto (%)	12,2	8,3	8,1	11,1	11,3	10,5	9,8	10,8
Aceite en racimo (%)	17,2	9,6	14,1	14,2	14,9	14,3	19,6	27,9
Producción de aceite (t/ha/año)	4,6	2,9	5,1	3,4	3,2	3,9	6,3	8,5

Nota: El índice de racimos expresa la relación entre peso seco de los racimos y producción total de materia seca por palma. Es un indicador confiable de eficiencia de la planta y su valor varía de 0 a 1 (Breure, 1987b).

Fuente: Elaboración propia

Características determinantes de la producción de aceite. Los híbridos RC1 produjeron aceite con concentraciones intermedias entre sus progenitores de ácidos grasos, saturados e insaturados, tal como se ha reportado en otras investigaciones (Choo et al., 1998; Ramírez, 2004). En líneas generales, la proporción de ácidos grasos saturados, de mayor a menor, indica el siguiente orden: *E. guineensis* > híbridos RC1 > híbridos F1 > *E. oleifera*. En cambio, la proporción de ácidos grasos insaturados, de mayor a menor, indica un orden inverso: *E. oleifera* > híbridos F1 > híbridos RC1 > *E. guineensis* (tabla 9.6). Esta variabilidad puede aumentar la oferta de aceite en función de su perfil lipídico.

En laboratorio, las selecciones RC1 produjeron 19,6 % de aceite en racimo, equivalente a una producción estimada de aceite de 6,3 t/ha/año. Este promedio aún se sitúa por debajo del rendimiento de los cultivares Ténera de palma de aceite, pero confirma la recuperación de la tasa de extracción de aceite mediante cruzamientos regresivos hacia la especie *E. guineensis* (Bastidas et al., 2007).

Tabla 9.6. Perfil lipídico de los aceites de las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*, promedios por ácido graso

Ácido graso	*E. oleifera* tipo rojo	*E. oleifera* tipo verde	Híbridos F1	Híbridos RC1	*E. guineensis* tipo *virescens*	*E. guineensis* tipo *nigrescens*
Láurico (%)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Mirístico (%)	0,4	<0,1	0,3	0,9	1,2	1
Palmítico (%)	15,3	15,2	33,5	36,7	37	40,5
Palmitoleico (%)	1,4	1,1	0,4	<0,1	<0,1	<0,1
Esteárico (%)	0,6	0,7	0,7	5,1	4	5
Oleico (%)	70,4	68,6	55,6	46,8	48,1	44,4
Linoleico (%)	11,8	14,2	9,4	9,3	9,4	8,7
Linolénico (%)	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
Araquídico (%)	<0,1	<0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Gondoico (%)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
Behénico (%)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Lignocérico (%)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Fuente: Elaboración propia

Reacción a enfermedades. Ninguna de las enfermedades letales de mayor ocurrencia en la zona palmera de Tumaco —mancha anular, pudrición de cogollo, marchitez sorpresiva y anillo rojo— se presentó en los híbridos RC1 afines a los F1, durante siete años de observación en campo; en cambio, en los segregantes tipo *E. guineensis* la incidencia acumulada de casos de PC fue de 6 %. Este comportamiento comprueba que la resistencia a enfermedades transmitida por *E. oleifera* a *E. guineensis* (especies donante y recurrente, respectivamente) se mantiene dos generaciones después, en las progenies RC1 (Bastidas et al., 2007). Son muchos los estudios e investigaciones que aportan evidencia de la resistencia de los híbridos O × G a la PC, pero escasos con respecto a los híbridos RC1.

Los anteriores indicadores de producción, junto a otras ventajas como lento crecimiento, resistencia a enfermedades y calidad del aceite, hacen de los híbridos RC1 unos cultivares competitivos y sostenibles. Los RC1 se producen mediante cruzamientos controlados entre palmas de los híbridos F1 Corpoica Elmira con polen de palmas *E. guineensis* de segunda y tercera generación, del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA.

Como conclusión, se puede afirmar que las PPF2 aportaron respuestas a las siguientes preguntas planteadas en este capítulo:

- ¿Es posible recuperar la tasa de extracción de aceite mediante cruzamientos regresivos hacia la especie *E. guineensis*?

  R.: Sí, en los RC1 los promedios poblacionales de la tasa de extracción variaron entre 14,3 y 19,6 %, mientras que en los híbridos F1 del Sinú oscilaron entre 11 y 15 %.

- ¿La resistencia a la PC se mantiene en generaciones sucesivas de retrocruzamiento hacia la especie *E. guineensis*?

  R.: La resistencia se mantiene. En los RC1 no se presentaron casos de PC en etapa experimental, entre 1995 y 2002; tampoco en los RC2 desde 1999 hasta 2002, año en que finalizó el proyecto.

- ¿Qué se puede esperar de los retrocruzamientos hacia la especie *E. guineensis,* susceptible a la PC pero con alta productividad de aceite?

R.: En las progenies de este tipo de cruzamientos regresivos se esperan progenies resistentes y una tasa de extracción superior a 20 %, con base en polinización natural gracias a la restauración de la fertilidad (Alvarado et al., 2000; Sharma, 1999).

- ¿El perfil lipídico del aceite se altera a través de diferentes cruzamientos regresivos?

  R.: Sí, el perfil lipídico se altera, específicamente las proporciones entre ácidos grasos insaturados y saturados; cuanto más cercanos están a la especie E. guineensis*, mayor es la proporción de los saturados.*

- ¿Qué se puede esperar de los retrocruzamientos hacia la especie *E. oleifera,* resistente a la PC pero con baja productividad de aceite?

  R.: Esta pregunta aún no tiene respuesta, puesto que los retrocruzamientos hacia la especie E. oleifera *fueron pospuestos. En 2018 se produjeron seis retrocruzamientos hacia* E. oleifera*, dentro del proyecto "Selección de progenitores F2 de la palma nolí (*Elaeis oleifera *[Kunth] Cortés) como apoyo a la producción de semilla mejorada de los híbridos O × G F1 y RC1 de segunda generación* (AGROSAVIA, 2019)*, dentro de la Agenda AGROSAVIA 2018-2022.*

Los retrocruzamientos hacia la especie *E. oleifera* fueron aplazados en el supuesto de una reducción drástica de la tasa de extracción de aceite. Como hipótesis, se espera el siguiente patrón en la tasa de extracción de aceite para los materiales genéticos, antes de presentarse el uso de reguladores: *E. guineensis* > híbridos RC2 > híbridos RC1 > híbridos F1 > *E. oleifera.* De forma inversa, el patrón de tolerancia a la enfermedad PC tienen en el extremo de mayor tolerancia a la especie *E. oleifera,* y en el de más suceptibilidad a *E. guineensis.* Son varios los reportes sobre la baja tasa de extracción de aceite en palmas de la especie *E. oleifera* (Corley & Tinker, 2003; Rajanaidu, 2000). El porcentaje de aceite en racimo de las 150 palmas *E. oleifera* seleccionadas en el C. I. El Mira varía entre 6,03 y 11,85 %, y el de *E. oleifera* tipo Cereté en líneas generales oscila entre 5 y 10 % (Vallejo, 1976).

El conocimiento adquirido con los resultados de las PPF2 indica la viabilidad de iniciar un programa de mejoramiento que apunte a producir híbridos mediante cruzamientos regresivos entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis,* asistido por nuevas tecnologías, genómica, cultivo de tejidos, a fin de recuperar la productividad de aceite y mantener un nivel de resistencia a la PC

por debajo del impacto económico. Queda pendiente por averiguar dónde se pierde la resistencia en la generación de RC, y cuando esto ocurra, será necesario hacer una generación de RC hacia la especie resistente *E. oleifera*. Además, con la PPF2 fue posible monitorear el comportamiento de una generación avanzada F2, sin evaluar la generación precedente F1, con un ahorro significativo de tiempo y área de terreno. Esta metodología facilita la ejecución de proyectos de investigación en especies perennes y asegura la producción de cultivares con características previsibles.

Referencias

Alvarado, A., Bulgarelli, J., & Moya, B. (2000). Germinación del polen en poblaciones derivadas de un híbrido entre *Elaeis guineensis* Jacq. y *E. oleifera* H. B. K., Cortés. ASD *Oil Palm Papers* (20), 35-36.

Amblard, P., Billotte, N., Cochard, B., Durand, T., Jacquemard, C. J., Louise, C., Novy, B., & Potier, F. (2004). El mejoramiento de la palma de aceite *E. guineensis* y *E. oleifera* por el CIRAD-CP. *Revista Palmas, 25*(2), 307-310.

Barba, J. O. (2010). Evaluación agronómica de híbridos interespecíficos de palma de aceite O x G (*Elaeis oleifera x Elaeis guineensis*) provenientes de diversos orígenes americanos y su tolerancia a la pudrición de cogollo. *Palma,* 11-15..

Bastidas, S. (2013). Híbrido O×G Corpoica Elmira de palma de aceite: avances en el desarrollo de materiales genéticos resistentes a la PC. *Revista Palmas, 34*(2), 138-144. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10857

Bastidas, S., Figueredo, P., & Reyes, R. (1993). Obtención de materiales de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) adaptados al trópico Latinoamericano. *Palmas, 14*(especial), 49-56.

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2003). Avances sobre el comportamiento de los híbridos de primera generación de retrocruzamiento entre palma americana (*Elaeis oleifera*) y palma de aceite (*Elaeis guineensis*). *Revista Corpoica Novedades Técnicas, 3*(3), 32-36.

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2005). Metodología de selección para el mejoramiento genético acelerado de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*): prueba de campo. *Revista Fitotecnia Colombiana, 5*(1), 46-52. https://www.researchgate.net/publication/228730421_METODOLOGIA_DE_SELECCION_PARA_EL_MEJORAMIENTO_GENETICO_ACELERADO_DE_LA_PALMA_DE_ACEITE_Elaeis_guineensis_Jacq_PRUEBA_DE

Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2013). *Preguntas sobre palma de aceite* Elaeis guineensis *Jacq., palma nolí* Elaeis oleifera *(Kunth) Cortés y los híbridos interespecíficos nolí × palma de aceite (*E. oleifera × E. guineensis*)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/12614

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., & Casas, H. (2002). *Recomendaciones generales para el manejo de semilla germinada y viveros de palma de aceite (*Elaeis guineensis *Jacq.)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/1193

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Medina, C., Villa, A., & Tolosa, W. (2010). Pruebas agronómicas para certificar la tolerancia de los híbridos O × G a pudrición del cogollo: fase I (resumen ejecutivo). En *Ciencia y Tecnología para la Competitividad del Sector Agropecuario 2002-2010: resultados de algunos proyectos cofinanciados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Dirección de Desarrollo Tecnológico y Protección Sanitaria* (pp. 158-159) http://hdl.handle.net/20.500.12324/19921.

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Pérez, J., & Tolosa, W. (2007). Comportamiento agronómico del cultivar híbrido RC1 de palma de aceite (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) × *Elaeis guineensis*. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8*(1), 5-11. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:77

Breure, C. J. (1987a). *Factors associated with the allocation of carbohydrates to bunch dry matter production in oil palm (*Elaeis guineensis *Jacq.)*. Harrisons Fleming Advisory Services Ltda.; Landbouwuniversiteit Wageningen.

Breure, C. J. (1987b). Selección de progenitores de la palma de aceite con base en el índice de racimos y la productividad en Nueva Bretaña Occidental. *Revista Palmas, 8*(2), 39-46.

Chinchilla, C., Alvarado, A., Albertazzi, H., & Torres, R. (2007). Tolerancia y resistencia a las pudriciones de cogollo en fuentes de diferente origen de *Elaeis guinnensis*. *Revista Palmas, 28*(número especial), 273-284. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1264

Choo, Y. M., Ma, A. N., & Yap, S. C. (1998). Carotenos, vitamina E y esteroles en aceites de *Elaeis guineensis, Elaeis oleifera* y sus híbridos. *Revista Palmas, 19*(2), 79-85. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/627

Corley, R. H. V. (1973). Effects of plant density on growth and yield of oil palm. *Experimental Agriulture, 9*(2), 169-180. https://doi.org/10.1017/S0014479700005639

Corley, R. H. V., & Breure, C. J. (1981). *Measurements in oil palm experiments: Internal report*. Unilever Plantation Group.

Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2003). *The oil palm*. Oxford Blackwell Science Ltda.; Blackwell Publishing Company. https://doi.org/10.1002/9780470750971

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. (2019). *Proyecto de investigación de la agenda 2018-2022 "Selección de progenitores F2 de la palma nolí (*Elaeis oleifera *[Kunth] Cortés) como apoyo a la producción de semilla mejorada de los híbridos Corpoica F1 y RC1 de segunda generación"*.

Da Rocha, C. R. N., Rodrigues, L. M. R., Teixeira, P. C., Lopes, R., Da Cunha, V. R. N., De Macedo, V. J. L., De Morais, R. R., & De Lima, A. W. A. (2010). Manejo sustentável para a cultura da palma de óleo: cobertura do solo e cultivos intercalares. Em *Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia* (pp. 127-135). Embrapa Solos.

Escobar, R., & Alvarado, A. (2004). Estrategias para la producción comercial de semillas y clones de palmas de aceite compactas. *ASD Oil Palm Papers, 27*, 13-26.

Falconer, D. S. (1984). *Introducción a la genética cuantitativa* [F. Márquez Sánchez, Trad.]. (14.ª Ed.). Compañía Editorial Continental S. A.

Forster, B. P., Sitepu, B., Setiawati, U., Kelanaputra, E. S., Nur, F., Rusfiandi, H., Rahmah, S., Ciomas, J., Anwar, Y., Bahri, S., & Caligari, P. D. (2017). Oil palm (*Elaeis guineensis*). In *Genetic improvement of tropical crops* (pp. 241-290). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59819-2_8

Franqueville, H. (2001). *La pudrición del cogollo de la palma aceitera en América Latina: revisión preliminar de hechos y logros alcanzados*. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). http://www.buecke.com.br/public/upload/arquivo/buecke/La%20pudricion%20del%20cogollo%20de%20la%20palma%20aceitera%20en%20America%20Latina-02c2d.pdf

Hardon, J. J. (1983). Oil palm breeding-introduction. In R. H. V. Corley, J. J. Hardon & B. J. Wood (eds.), *Developments in crop science (I), oil palm research* (pp. 89-108). Elsevier Scientific Publishing Company.

Hardon, J. J., & Tan, G. Y. (1969). Interspecific hybrids in the genus *Elaeis*. I. crossability, cytogenetics and fertility of F1 hybrids of *Elaeis guineensis* × *Elaeis oleifera*. *Euphytica, 18*, 372-379. https://doi.org/10.1007/BF00397784

Hartley, C. (1988). *The oil palm (*Elaeis guineensis *Jacq.)* (3.rd Ed.). Editorial Longman.

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2011). *Resolución 001446. "Registro de cultivar comercial para producción y comercialización de semillas en Colombia. Híbrido O × G Corpoica Elmira"*.

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2014a). *Resolución 000977. "Registro de cultivar comercial para producción y comercialización de semillas en Colombia. Híbrido Pacífico RC1"*.

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2014b). *Resolución 000978. "Registro de cultivar comercial para producción y comercialización de semillas en Colombia. Híbrido Tumaco RC1"*.

Kushairi, A., Rajanaidu, N., Sukaimi, B., Mohd Rafii, Y., & Mohd Din, A. (2000). Materiales de siembra de palma de aceite del PORIM. *Revista Palmas, 21*(3), 51-63. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/744

Le Guen, V., Amblard, P., Omore, A., Koutou, A., & Meunier. J. (1991). Le programme hybride interspécifique *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensisde* L'IRHO. *Oléagineux, 46*(12), 479-487.

Le Guen, V., Amblard, P., Omore, A., Koutou, A., & Meunier, J. (1993). Programa del IRHO con híbridos interespecíficos *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*. *Revista Palmas, 14*(4), 63-70. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/393

Little, T. M., & Hills, F. J. (1976). *Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura*. Editorial Trillas.

Márquez, F. (1985). *Genotecnia vegetal: métodos, teoría, resultados* (Tomo I). AGT Editor S. A.

Meerow, A. W., Krueger, R. R., Singh, R., Low, E. T. L., Ithnin, M., & Ooi, L. C. L. (2012). Coconut, date, and oil palm genomics. In R. Schnell & P. Priyadarshan (eds.), *Genomics of tree crops* (pp. 299-351). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0920-5_10

Méndez, T. (1974). *Report on plant breeding aspects of the oil palm programe of the Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).*

Meunier, J. (1991). Una posible solución genética para el control de la pudrición de cogollo en la palma aceitera: híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis. Revista Palmas, 12*(2), 39-42. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/284

Meunier, J., & Boutin, D. (1975). L' *Elaeis melanococca* et l' hybrid *Elaeis melanococca* × *Elaeis guineensis*: premieres donnés. *Olèagineux, 30*(1), 5-8.

Meunier, J., Vallejo, G., & Boutin, D. (1976). *E. melanococca* × *E. guineensis* hybrid and its improvement. *Olèagineux, 31*(2), 519-528.

Molina, G. J. D. (1992). *Introducción a la genética de poblaciones y cuantitativa (algunas implicaciones en genotecnia)* (1.ª Ed.). AGT Editor S. A.

Rajanaidu, N. (2000). Materiales futuros de siembra para la industria de la palma de aceite. *Revista Palmas, 21*(número especial, tomo II), 291-299.

Ramírez, O. (2004). Híbrido de la palma: una alternativa a la soya. *Revista Palmas, 25*(número especial, tomo I), 295-300.

Rojas, E. (1972). *Investigaciones sobre la enfermedad pudrición del cogollo de la palma africana en la plantación La Arenosa de Coldesa, S. A., Turbo, departamento de Antioquia.* Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Rojas, L. A. (1981). La palma africana de aceite. VI. Labores de establecimiento y mantenimiento del cultivo. *Temas de orientación agropecuaria,* (149), 82-92.

Sambanthamurthi, R., Singh, R., Kadir, A. P. G., Abdullah, M. O., & Kushairi, A. (2009). Opportunities for the oil palm via breeding and biotechnology. In S. M. Jain, P. M. Priyadarshan, *Breeding plantation tree crops: Tropical species* (pp. 377-421). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_11

Sánchez Chia, G. (2012). *Caracterização morfofisiológica e anatômica de folhas de dendezeiro (*Elaeis guineensis *Jacq.), de caiaué (*E. oleifera *[Kunth] Cortés) e híbrido interespecífico (* E. guineensis × E. oleifera*) nas condições da Amazônia Central* [Tese doutorado, Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil]. https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/191501/1/Tese-Gilson-Sanchez-Chia.pdf

Sharma, M. (1999). Utilization of Nigerian PS1 y PS2 selection in oil palm breeding programmes at UP Bhd. In *Proceedings of the seminar on PS1 and PS2 oil palm planting materials* (pp. 18-29). Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).

Sparnaaij, L. D., & Van der Vossen, H. A. M. (1980). Developments in oil palm breeding: A reappraisal of present and future breeding procedures in the light of results from the Nigerian Institute for Oil Palm Research breeding programme. *Oil Palm News* (24), 4-11.

Steel, R. G., & Torrie, J. H. (1985). *Bioestadística: principios y procedimientos.* McGraw-Hill.

Tan, G. Y. (1978). Genetic studies of some morpho-physiological characters associated with yield in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Tropical Agriculture, 53*, 9-16.

Torres, M., Rey, L., Gelves, F., & Santacruz, L. (2004). Evaluación del comportamiento de los híbridos interespecificos *E. oleifera* × *E. guineensis*, en la plantación Guaicaramo S. A. *Revista Palmas, 25*(número especial), 350-357. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1099

Turner, P. D. (1981). *Oil palm diseases and disorders.* Oxford University Press.

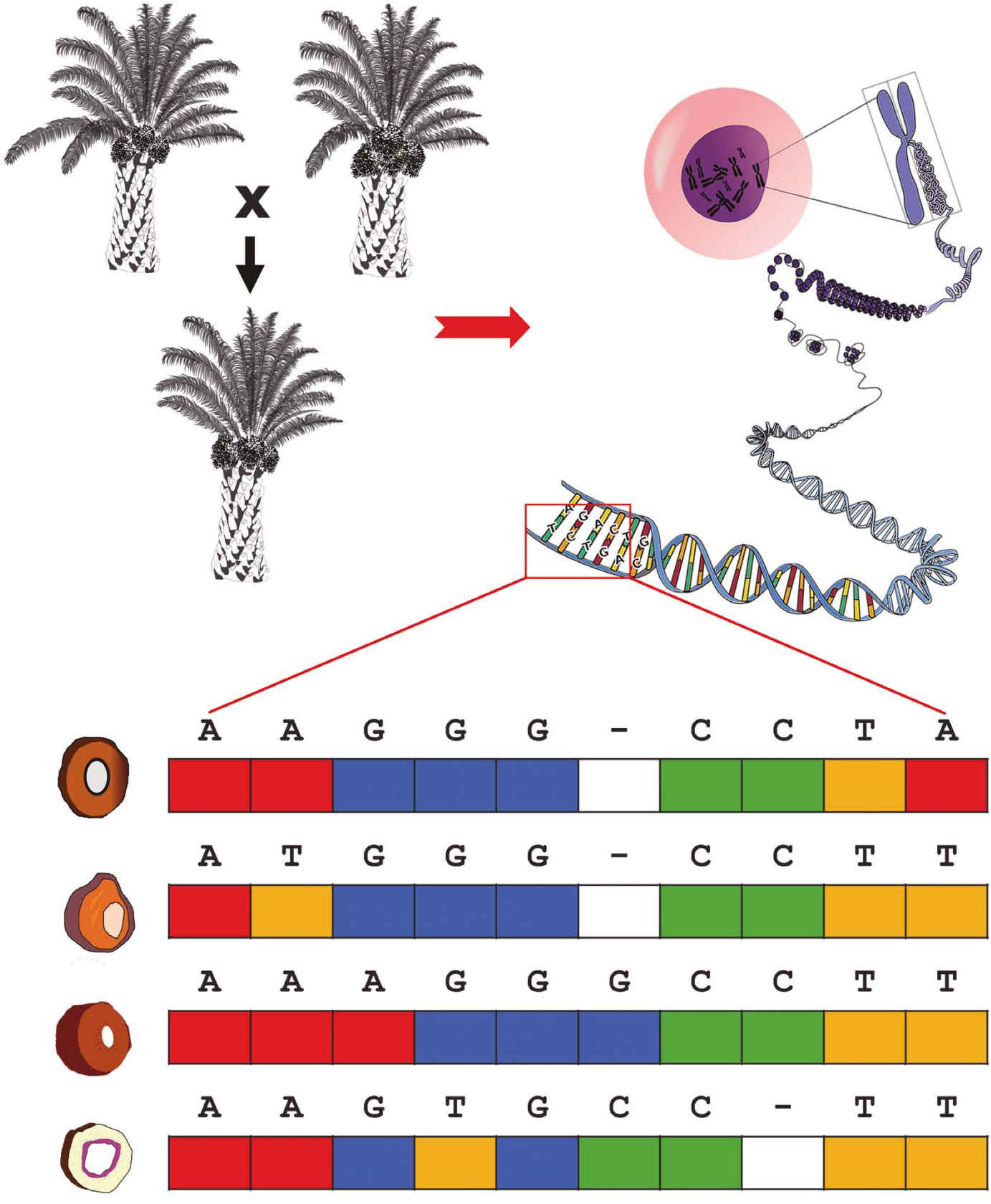
Vallejo, G. (1976). *Estudio de poblaciones espontáneas de nolí (*Elaeis oleifera *H. B. K. Cortés) en Colombia* [Tesis *Magister Scientiae*]. Universidad Nacional de Colombia (UN); Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Vallejo, G., & Cassalett, D. C. (1975). Perspectivas del cultivo de los híbridos interespecíficos de nolí (*Elaeis oleifera*) x palma africana de aceite (*Elaeis guineensis*) en Colombia. *Revista ICA, 10*(1), 19-35.

Vallejo, C. F. A., Espitia, C. M., Checa, C. O., Lagos, B. T. C., Salazar, V. F., & Restrepo, S. E. (2005). *Análisis estadístico para los diseños genéticos en fitomejoramiento.* Universidad Nacional de Colombia; Feriva S. A.

Zambrano, J. E. (2004). Los híbridos interespecíficos *Elaeis oleifera* H. B. K. × *Elaeis guineensis* Jacq.: una alternativa de renovación para la zona oriental de Colombia. *Revista Palmas, 25*(número especial, tomo II), 339-349. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1098





Autor: Félix E. Enciso Rodriguez
Fuente imagen: https://pixabay.com/vectors/genetics-chromosomes-rna-dna-156404/

Capítulo 10

Los marcadores moleculares en la investigación de los recursos genéticos y fitomejoramiento de la palma de aceite

Luz Stella Barrero, Gerardo Gallego, Harold Suárez-Barón, Myriam Duque, Jaime A. Osorio Guarín, Erick Hernández, Felix E. Enciso Rodríguez, Gina A. Garzón Martínez, Leidy Paola Delgadillo Durán, Silvio Bastidas

La palma de aceite *Elaeis guineensis* (G) es considerada la mayor fuente de aceite vegetal en el mundo (Turner et al., 2008), con un gran potencial en las industrias de alimentos y oleoquímica, y en la producción de combustible biodiésel. Esta última es una de las apuestas del sector palmicultor colombiano, como quedó expresado en el libro *Biodiésel de palma colombiano: de la ficción energética a la realidad de un negocio,* publicado por Fedepalma (2013). Dada la importancia que ha adquirido en Colombia, su característica perenne, sus usos y su potencial, el cultivo de la palma de aceite ha sido incluido por el MADR para su promoción dentro de la política estatal actual para la reactivación del sector agropecuario, lo cual incluye alianzas estratégicas entre grandes y pequeños productores. En Colombia, esta especie enfrenta problemas limitantes como la mancha anular, la PC, la marchitez sorpresiva y el anillo rojo, que afectan la sostenibilidad de su cultivo (Bastidas et al., 2007). La PC se considera el problema más limitante del cultivo, y para ella no hay medidas efectivas de control, por lo que la resistencia genética se perfila como una alternativa prometedora mediante la incorporación de resistencia aportada por la palma americana *E. oleifera* (O).

Las palmas *E. guineensis* y *E. oleifera* son especies alógamas con poblaciones heterogéneas heterocigotas, por lo cual los híbridos O × G surgidos de estas dos especies manifiestan signos de segregación bajo condiciones de campo. Esta observación sería un indicador de segregación de alelos parentales y, por

lo tanto, de contenidos genéticos diferenciales que pueden ser conocidos con mayor precisión mediante el uso de marcadores moleculares. Adicionalmente, el uso de estos marcadores permite: 1) conocer la variabilidad genética y la estructura de poblaciones híbridas y parentales; 2) identificar poblaciones híbridas con similitud diferencial a las parentales, lo cual puede llevarse a cabo en etapas de vivero, y 3) realizar estudios de asociación con fenotipos de interés para acelerar el proceso de mejoramiento y de este modo contribuir a reducir los costos y tiempos, dado que un ciclo genético en palma de aceite equivale a diez u once años.

El presente capítulo tiene como propósito resumir el estado del arte de la investigación con marcadores moleculares en palma de aceite a nivel internacional y nacional. Sobre la investigación nacional, se hace énfasis en los avances logrados por AGROSAVIA con poblaciones de mejoramiento genético provenientes de la iniciativa desarrollada en el C. I. El Mira de la misma corporación.

Contexto internacional

Los centros alrededor del mundo que adelantan investigaciones sobre la palma africana (*E. guineensis*) en la actualidad implementan un variado número de estudios moleculares basados en marcadores de ADN o regiones específicas del genoma de la palma, con diversas aplicaciones, como estudios de "huella genética", análisis de diversidad genética, mapas de ligamiento y selección genómica (del inglés *genomic selection* [GS]). La huella genética o *fingerprinting* ha involucrado diferentes tipos de marcadores, entre los cuales se destaca un alto número de microsatélites o secuencias simples repetidas (*simple sequence repeats* [SSR]), disponibles en bases de datos (Billotte et al., 1999, 2001) y con un alto poder discriminativo y relativo bajo costo.

Varios estudios han priorizado el uso de SSR para el conocimiento de los recursos genéticos de la palma de aceite. Así, Bakoumé et al. (2007) determinaron la diversidad alélica dentro de cuatro poblaciones naturales, que representan diez países africanos, tres cultivares mejorados y un material semisilvestre. Con el uso de 16 locus SSR, se detectaron 209 alelos, de los cuales algunos pocos son comunes en poblaciones de áreas de clima seco. Por su parte, Singh et al. (2008) usaron etiquetas de secuencias expresadas

(*expressed sequence tags* [EST]) de la palma de aceite para buscar marcadores SSR. Los autores desarrollaron diez (EST-SSR) para evaluar 76 muestras de palma de aceite de siete países de África y una población estándar de Deli Dura. El número promedio de alelos observados y el contenido de información polimórfica (PIC) fueron de 2,56 y 0,53, respectivamente, con una diferenciación genética (F_{ST}) de 0,249 entre poblaciones, lo que indica un alto nivel de divergencia.

En otro estudio, Cochard et al. (2009) analizaron 318 individuos de 26 orígenes y ocho países con catorce marcadores SSR, con el propósito de describir la estructura de estos recursos genéticos involucrados en la historia del mejoramiento de la palma, en relación con los orígenes africanos subespontáneos. Los datos revelaron dos grupos originales: el grupo I, formado por África occidental, y el grupo II, formado por el conjunto Benín-Nigeria-Camerún-Congo-Angola. Un tercer grupo Deli, derivado del II, fue el resultado de selección artificial. Igualmente, Zaki et al. (2012) caracterizaron 20 SSR_s a partir de una librería genómica de *E. oleifera*, y confirmaron el potencial de estos marcadores para revelar la diversidad genética en el género *Elaeis*.

Además del alto número de análisis de diversidad genética llevados a cabo con bases de datos saturadas con SSR, otros estudios han utilizado diversos marcadores moleculares, incluidos los polimorfismos de longitud de fragmentos amplificados (*amplified fragment length polymorphisms* [AFLP]) (Kularatne et al., 2001); los polimorfismos de longitud de fragmentos de restricción (*restriction fragment length polymorphisms* [RFLP]) (Maizura et al., 2006; Mayes et al., 2000; Moretzsohn et al., 2002) y los marcadores basados en ADN polimórfico amplificado aleatoriamente (*random amplified polymorphic* DNA [RAPD]) (Shah et al., 1994). Así, los marcadores moleculares en palma de aceite han sido usados para avanzar en el fitomejoramiento de esta especie vegetal.

En lo que respecta a mapas de ligamiento, el primero de ellos fue construido por Mayes et al. (1997) a partir de RFLP, y posteriormente, con el uso otros marcadores se logró construir el primer mapa de ligamiento de alta densidad para la especie, con 255 SSR_s y 689 AFLP, distribuidos en 16 grupos de ligamiento correspondientes a los 16 pares de cromosomas homólogos de la palma africana (Billotte et al., 2005). El marcador más cercano al gen que codifica el

grosor de la cáscara fue un AFLP ubicado a 4,7 (centimorgan) del gen *shell* (Sh), el cual controla la presencia o ausencia de revestimiento en la fruta de la palma (Billotte et al., 2005). El gen que determina las tres diferentes formas del fruto en las palmas Dura, Ténera y Pisífera fue clonado gracias a metodologías genómicas, por lo que ahora se puede usar como marcador para distinguir estas formas antes del trasplante definitivo a campo y de este modo ahorrar tiempo y dinero en el fitomejoramiento (Singh et al., 2013). Además, Price et al. (2003) desarrollaron un sistema de marcadores moleculares para palma de aceite basados en retrotransposones, el cual permite su aplicación en propósitos de mejoramiento de la palma africana y de los híbridos que se obtienen mediante cruzamiento con la palma americana *(E. oleifera)*. Estos marcadores pueden usarse como fuente de información, debido a su capacidad de integrarse dentro de un gran número de locus del genoma y, por tanto, de generar polimorfismos insercionales entre individuos.

El Malaysian Palm Oil Board (MPOB) desarrolló y evaluó en 2007 el potencial que los polimorfismos de un solo nucleótido (*single nucleotide polymorphisms* [SNP]) tienen como marcadores moleculares de nueva generación. Estos marcadores permiten realizar, con un alto rendimiento, análisis de mapeo genético y de diversidad, protección de germoplasma vegetal, investigaciones en genómica del aceite de palma y mejoramiento vegetal asistido por marcadores. En el estudio en mención se realizó un análisis de alrededor de 380.000 secuencias genómicas de las dos especies de palma, *E. guineensis* (Dura, Ténera y Pisífera) y *E. oleifera*. Este trabajo permitió elucidar también, a partir del análisis de secuencias polimórficas amplificadas (*cleaved amplified polymorphic sequences* [CAPS]), el potencial de diferenciación que estos SNP presentan a nivel intra e interespecífico (Ong et al., 2015).

Un consorcio que incluye el MPOB secuenció el genoma de *E. guineensis* (Singh et al., 2013) y adelantó estudios con marcadores SNP utilizando arreglos de Illumina en poblaciones híbridas interespecíficas O × G e intraespecíficas Dura x Pisifera (Ting et al., 2014). Adicionalmente, en un esfuerzo por aplicar GS en poblaciones de mejoramiento, el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique Pour le Développement (CIRAD) y AGROSAVIA han implementado recientemente el uso de SNP vía genotipificación por secuenciación (*genotyping by sequencing* [GBS]) (Cros et al., 2017; Osorio-Guarín et al., 2019), lo que ha permitido incrementar la precisión de GS, realizada

inicialmente con SSR (Cros et al., 2013) y más recientemente con marcadores SNP (Garzón-Martínez et al., 2022). Se espera que la investigación molecular y el desarrollo de los recursos genómicos en palma de aceite suministre a los fitomejoradores un medio poderoso para acelerar y conseguir ganancias por selección, de tal manera que la palma alcance su potencial de forma más acelerada como cultivo de aceite clave para el futuro (Mayes et al., 2008).

Contexto nacional

En lo que respecta a la investigación realizada a nivel molecular en palma de aceite en Colombia, son varios los estudios que se han llevado a cabo hasta el momento. Estas caracterizaciones responden a la necesidad de proporcionar a los cultivadores de esta especie vegetal un material con mayor potencial genético, a fin de satisfacer la creciente demanda de aceite de palma, dado que Colombia es el primer productor de Suramérica y ha pasado a ocupar el quinto en el mundo (Cook, 2023).

Es así como se destacan inicialmente los estudios de Ochoa et al. (1997), quienes reportan la identificación de marcadores moleculares tipo RAPD; los de Villegas et al. (2000), quienes caracterizaron molecularmente la palma de aceite tipo Dura; y los de Arias y Rocha (2004), los cuales analizaron a nivel molecular la diversidad genética en cultivares resistentes y susceptibles a la PC.

Posteriormente, Montoya et al. (2005) estimaron la diversidad y estructura genética de 48 entradas pertenecientes a seis poblaciones procedentes de Angola con 20 combinaciones de marcadores SSR, y lograron identificar 69 alelos y una heterocigosidad esperada (He) de 0,45. A su vez, Galeano (2005) realizó una investigación cuyo objetivo fue estandarizar el uso de AFLP en materiales Dura procedentes del programa de fitomejoramiento de Cenipalma, y realizó de manera preliminar la caracterización molecular de doce palmas de los tipos Dura, Ténera y *E. oleifera*. Según los agrupamientos hechos con los métodos fenéticos y multivariados, se encontró que la mayoría de palmas tipo Dura se agrupan de acuerdo con el lugar de colecta,

mientras que la palma de origen americano se ubica de forma distante al compararla con la de origen africano.

Barrera (2011), por su parte, evaluó la diversidad y estructura genética de una colección de 455 entradas de palma de aceite colectadas en cinco zonas geográficas de Angola y nueve híbridos interespecíficos, con 19 locus SSR, a fin de aportar información a la colección de germoplasma de Cenipalma y su programa de mejoramiento genético.

Contexto con materiales de mejoramiento genético producidos por AGROSAVIA

El programa de mejoramiento de AGROSAVIA dio lugar al híbrido O × G a partir de parentales de las especies *E. oleifera* (palma nolí) y polen de palmas *E. guineensis* de la serie La Mé de Costa de Marfil. La semilla del híbrido O × G presenta bajo porcentaje de germinación, lo cual incrementa los costos de la semilla (USD 3/unidad), en comparación con *E. guineensis* Ténera (USD 0,75). Por su parte, los híbridos interespecíficos O × G presentan alta esterilidad (alto porcentaje de frutos partenocárpicos) y requieren polinización asistida obligatoria, cuyo costo varía entre USD 300 y 350 ha/año, lo que restringe su uso entre los pequeños y medianos productores. Los híbridos O × G Corpoica Elmira en la actualidad se encuentran en pruebas de evaluación agronómica ante el ICA, en las cuales se está demostrando que no requieren polinización asistida obligatoria, porque heredan de sus madres *E. oleifera* la característica de inflorescencias expuestas, lo que ahorra hasta USD 300/ha/año, y además presentan niveles de incidencia de PC inferiores a 1% (acumulado de tres años).

AGROSAVIA cuenta también con una colección de trabajo mejorada compuesta por 20 progenies (descendientes) *E. guineensis* Dura de segunda generación (F2) y diez progenies (descendientes) Ténera/Pisífera de tercera generación (F3). Las características detectadas en los híbridos O × G Corpoica Elmira y la colección de trabajo justifican su caracterización molecular con fines de protección y asistencia al programa de mejoramiento genético para características de interés, acelerando en el tiempo la producción de cultivares.

Debido al alto número de materiales producto de los diferentes cruces ha sido necesario realizar diversos estudios de caracterización, con el fin de generar insumos para seleccionar las mejores progenies.

Marcadores bioquímicos

Los primeros marcadores utilizados en la población de mejoramiento de AGROSAVIA datan de 1995, cuando se utilizaron muestras foliares de parentales de *E. guineensis* Dura y Pisífera y de *E. oleifera*, en un esfuerzo inicial por evaluar la introgresión recíproca entre las dos especies en híbridos F1 obtenidos por polinización controlada. Se utilizaron marcadores bioquímicos mediante análisis electroforético de isoenzimas, y se encontraron polimorfismos asociados exclusivamente con el parental *E. guineensis* Pisífera para cuatro isoenzimas (esterasa, fosfatasa ácida, polifenol oxidasa, fosfoglucomutasa) y relacionados con el parental *E. oleifera* en los patrones de dos isoenzimas (fosfogluconato deshidrogenasa y fosfoglucomutasa), los cuales segregaron diferencialmente en los individuos del híbrido F1. Perfiles electroforéticos de nuevas isoenzimas (por ejemplo, glutamato oxalacetato transaminasa) y proteínas totales también permitieron diferenciar de forma preliminar las dos especies y su progenie híbrida (Hernández et al., 1997; Vives et al., 1997).

Marcadores AFLP

Posteriormente, se inició una estandarización de marcadores moleculares tipo AFLP y SSR como base para la futura identificación molecular de semilla híbrida (Arias & Núñez, 2006). Se analizó una muestra de ocho palmas proveniente de dos parentales y seis híbridos del proceso de mejoramiento adelantado por AGROSAVIA. Para AFLP se evaluaron seis combinaciones de cebadores previamente utilizados por varios investigadores (Barcelos, 1998; Purba et al., 2000; Rajinder et al., 1998). La combinación de cebadores E-ACT/M-CAC presentó el mayor número de polimorfismos (18 bandas polimórficas), seguida de la combinación E-AGC/M-CAA (16 bandas polimórficas), y la E-ACC/M-CAC (seis bandas polimórficas). Para los SSR se usaron cuatro pares de cebadores reportados por Billotte et al. (2001), y se obtuvieron amplicones polimórficos con los cebadores mEgCIR0008, mEgCIR0465 y mEgCIR0134, en los que fue posible distinguir parentales de progenie. En ambos casos se encontraron grupos genéticos diferenciales

conformados por la palma materna, la paterna y los hijos, con semejanzas a uno u otro parental. El estudio fue un acercamiento preliminar, que evidenció la importancia de incrementar el número de marcadores y el tamaño de la población por analizar.

Marcadores microsatélites (SSR)

En el año 2011, AGROSAVIA, en convenio con el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), realizó una caracterización molecular con 46 marcadores tipo SSR (incluidos los tres reportados por Arias & Núñez [2006]) en 577 palmas provenientes del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA (Gallego et al., 2012) (tabla 10.1). El proceso fue realizado de forma conjunta por el Laboratorio de Biotecnología del CIAT y el Laboratorio de Genética Molecular Vegetal de AGROSAVIA.

Los 46 cebadores SSR fueron seleccionados de acuerdo con diferentes índices relacionados con diversidad genética, como el PIC, la heterocigosidad observada (Ho) y el número de alelos observados (Ao), previamente publicados en palma de aceite (Billotte et al., 2001; Ting et al., 2010; Zaki et al., 2010). Los marcadores fueron analizados en una muestra inicial de doce individuos, y se identificaron un total de 27 SSR polimórficos (tabla 10.2).

Del set de 27, se seleccionaron diez SSR con base en variación interespecífica y amplificación en la mayor parte de la población muestreada. Estos marcadores corresponden a seis SSR genómicos reportados por Billotte et al. (2001) (mEgCIR008 y mEgCIR230) y Zaki et al. (2010) (sMo00018, sMo00027, sMo00134 y sMo00138). Los otros cuatro son marcadores de naturaleza génica derivados de secuencias EST, de las cuales dos (que contienen los marcadores sEg0009 y sEg0076) no presentaron secuencias similares en las bases de datos del National Center for Biotechnology Information (NCBI), mientras que otros dos (sEg00125 y sEg00126) fueron homólogos con una proteína hipotética reportada para la especie *Vitis vinifera* y con una proteína determinada por predicción para la especie *Populus trichocarpa*. El marcador mEgCIR230 reportado por Billotte et al. (2001) ha sido previamente ubicado en el cromosoma 15 de la especie *E. guineensis*. La figura 10.1 muestra un ejemplo del tipo de variabilidad alélica observada con uno de los marcadores SSR seleccionados.

Tabla 10.1. Descripción de muestras de tejido vegetal tomadas en centros de investigación de AGROSAVIA

Especie	N.º accesiones	N.º plantas/ accesión	N.º total de muestras	Lugar de colecta
E. guineensis (G) Dura × Dura	20	3-6	117	C. I. Nataima (Espinal, Tolima)
E. oleifera (O)	43	1-8	154	C. I. El Mira (Tumaco, Nariño)
Híbridos O × G	20		197	C. I. El Mira (Tumaco, Nariño)
E. guineensis	11	10	109	C. I. Palmira (Valle del Cauca)
Total	**94**		**577**	

Fuente: Gallego et al. (2012)

Tabla 10.2. Características de los 27 marcadores SSR identificados como polimórficos

Nombre SSR	Secuencia cebadores F/R (5'-3')	Tipo de repetición	Temperatura anillamiento	Alelos observados (Ao)	Tamaño observado	Tamaño reportado
sEg00113	GTCACCGAACCCTAATAAAAT	(CT) 15	54	11	150-170	n/a
	ATGCAGTTGAGGACAAAAAG					
sEg00009	TCCACTGACAACAGGACTCA	(AG) 12	52	8	198-208	n/a
	AAAAACGCATCTCAGAGAGA					
sEg00066	ACTGATGCAGGAAAGAGGAA	(AT) 8	52	10	192-220	192-215
	GAAGTACACAAGGTAAGTTCATAG					
sEg00036	GGACCCTTTTTGTTACTGTTT	(AG) 9	52	10	150-170	n/a
	AGCCTACCACAACTTCCTTT					
sEg00076	GTGCTATATACTGTCACTTAAGATT	(TG) 9	52	5	133-150	n/a
	GGTAGAATATCTTCGTTTCGATT					
sEg00067	GATTAAGTCCCAACCGTCTC	(TGTA) 6	52	5	152-174	152-174
	TAAGAGAGCACGCAGTTCAG					
sEg00140	TAGAAAGTGAGACGGTGGAT	(GA) 10	53	6	224-230	216-220
	GTAATATTCTCAAGCTGGCAGT					
sEg00125	TACCCTTTTCCCTCCCTCCATA	(GCG) 6	52	6	120-180	152-170
	CATCATCTCCGTTGCCAGTATT					

(Continúa)

(Continuación tabla 10.2.)

Nombre SSR	Secuencia cebadores F/R (5'-3')	Tipo de repetición	Temperatura anillamiento	Alelos observados (Ao)	Tamaño observado	Tamaño reportado
sEg00126	CCGTCTCAAAAGCCCTAAAC	(CGC) 7	52	2	212-215	212-215
	TTGTTGTCCCACTCCCTCTT					
sMo00130	TAAGCAAAAGATCAGGGCACTC	(AAG) 11	56	11	200-220	173-214
	GGCTGGTGAAAATAGGTTTACAAAG					
sMo00020	CCTTTCTCTCCCTCTCCTTTTG	(AG) 15	58	9	175-208	182-208
	CCTCCCTCCCTCTCACCATA					
sMo00027	TTACAGTTGAGGCAGTATGTCAAT	(TC) 14	50	6	200-210	n/a
	CTGTATGTCAAACCTTCTGCAC					
sMo00018	TTAAATGAGAGAGAGACGAGGAC	(CT) 14	54	3	245-255	n/a
	TGGAGCCATGAGAAAGAGTA					
sMo00152	GGAACAGAGGACAAGAAAGAAA	(AC) 6 (AG) 11	56	2	220-260	245-256
	TGTATCAAGCCTCAAGTATCTGG					
sMo00134	TCCCAATAGTCGTTACAAACCAG	(ATTA) 6	56	2	252-256	252-256
	GATTAGCAAAAGGGCAAAAAGG					
sMo00138	AGGGTTGTCGCTCCAATTTAT	(TTTTC) 6	56	3	170-205	180-194
	GGCATCTTTTTGACCTGTAGAAG					
mEgCIR0008	CGGAAAGAGGGAAGATG	(GA) 18	52	11	194-218	195-220
	ACCTTGATGATTGATGTGA					
mEgCIR0221	TGCCATGTTCCAGAGAGC	(GA) 11	52	9	210-240	195-213
	TTCAGATTTTTCCGACTTC					
mEgCIR0230	CCCTGGCCCCGTTTTTC	(TA) 6 GAG (GA) 19	52	11	260-265	n/a
	AGCGCTATATGTGATTCTAA					
mEgCIR0304	CCACAAACAATCCAAGCAAGT	(GT) 4 (GC) 2 (GT) 2	52	3	125-130	275-281
	TGGCATACACGAAAGCATAA					
mEgCIR0326	GCTAACCACAGGCAAAAACA	(GT) 9	52	4	248-265	131-147
	AAGCCGCACTAACATACACATC					

(Continúa)

(Continuación tabla 10.2.)

Nombre SSR	Secuencia cebadores F/R (5'-3')	Tipo de repetición	Temperatura anillamiento	Alelos observados (Ao)	Tamaño observado	Tamaño reportado
mEgCIR0332	ATTTCGTAAGGTGGGTGT	(GT) 8	52	4	140-155	269-281
	CCTCCAAACTCCTCTGT					
mEgCIR0350	AAATCCTAAATCCTAAACTC	(GT) 8	52	5	252-258	80-102
	TCTACCTGTACTGGTGACAA					
mEgCIR0353	AGAGAGAGAGAGTGCGTATG	(GT) 11 (GA) 15	52	12	250-265	n/a
	GTCCCTGTGGCTGCTGTTTC					
mEgCIR0377	GTCTGCTAAAACATCAACTG	(GT) 6 (GC) 4	52	3	155-160	n/a
	GAGGAGGAGGGGAACGATAA					
mEgCIR0465	TCCCCCACGACCCATTC	(CCG) 6	52	5	120-144	n/a
	GGCAGGAGAGGCAGCATTC					
mEgCIR0134	AGTTTGGGGCTTACCTG	(GA) 15	52	5	130-148	n/a
	CTTCCACGCACCCTCTC					

Fuente: Gallego et al. (2012)

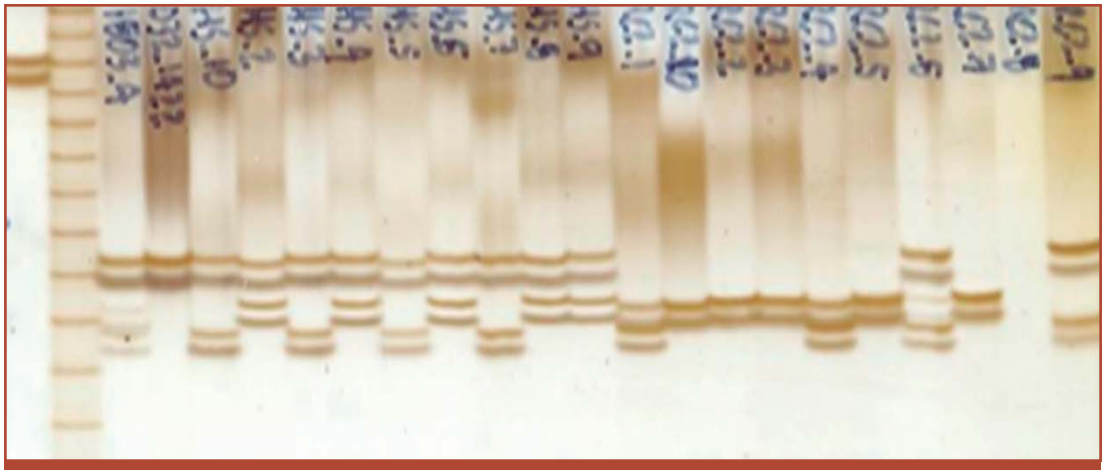


Figura 10.1. Variabilidad alélica observada para el marcador sMo00138 en parte de la población bajo estudio, correspondiente a híbridos de *E. guineensis* × *E. oleifera*. Los productos de reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés) fueron visualizados en geles de acrilamida al 6 % (urea 5 M) de acuerdo con el protocolo de Bassam et al. (1991).
Fuente: Gallego et al. (2012)

De las 577 muestras de la población bajo estudio, 20 de *E. guineensis* procedentes del C. I. Nataima y 43 de *E. oleifera* provenientes del C. I. El Mira fueron manejadas de forma combinada (*bulks*) con individuos por accesión, ya que están constituidas por grupos de hermanos, para un total de 369 muestras analizadas. De estas, siete fueron eliminadas del análisis (entre ellas dos *bulks* de *E. oleifera*), debido al considerable número de marcadores que no lograron ser amplificados y dada la imposibilidad de confirmarlos como alelos nulos. Los datos se codificaron como tamaño en pares de bases de cada una de las bandas (alelos), las cuales fueron registradas para los dos alelos que conforman cada locus. Lo anterior se dio gracias a la naturaleza diploide de las especies del estudio, y de esta manera se pudieron identificar individuos homocigotos o heterocigotos. Los análisis se desarrollaron con el programa SAS versión 9 (Rajinder & Suan-Choo, 1998; SAS Institute Inc., 1999), en el ambiente Linux.

De los diez marcadores y las 362 muestras incluidas en el análisis estadístico, se obtuvieron 45 bandas diferentes, con un promedio de 4,5 bandas por marcador. El tamaño de los alelos varió entre 150 y 330 pares de bases, en los marcadores sEg00125 y mEgCIR230, respectivamente. La tabla 10.3 muestra la comparación de estos resultados con la información reportada en diferentes estudios.

Tabla 10.3. Comparación entre el rango de tamaño de los alelos en pares de bases (PB) reportados por otros autores y los encontrados por Gallego et al. (2012)

Locus SSR	Reportados	Referencia	Obtenidos
sEg0009	-*	Ting et al. (2010)	172-198
sEg0076	-	Ting et al. (2010)	152-158
sEg00125	154-156	Ting et al. (2010)	150-160
sEg00126	214-216	Ting et al. (2010)	214-216
sMo00018	242-252	Zaki et al. (2010)	244-258
sM0027	184-213	Zaki et al. (2010)	200-212
sM00134	252-256	Zaki et al. (2010)	252-256
sM00138	180-194	Zaki et al. (2010)	178-194
mEgCIR008	195-220	Billotte et al. (2001)	200-225
mEgCIR230	326-354	Billotte et al. (2001)	325-375

* No existen pesos en pares de bases reportados para estos marcadores.
Fuente: Gallego et al. (2012)

A partir de las frecuencias alélicas se calculó He, la cual representa un indicador de diversidad genética. La He se define como la probabilidad de tomar dos individuos al azar, y que estos no compartan ningún alelo. El valor de He se calculó para cada uno de los marcadores microsatélites y a nivel global, y también para los cuatro grupos principales de muestras: híbridos intraespecíficos de *E. guineensis* (Dura × Dura), híbridos interespecíficos *E. guineensis* × *E. oleifera, E. oleifera* × *E. guineensis,* parentales *E. guineensis* y *E. oleifera* (tabla 10.4). El valor más alto se obtuvo cuando el cálculo se hizo para el total de muestras evaluadas (0,57); el más alto al interior de los grupos definidos por su estatus biológico se obtuvo en los híbridos interespecíficos (0,55), y el valor más bajo fue de 0,28 para el grupo de muestras del parental *E. oleifera,* y 0,34 para el parental *E. guineensis*. Los valores de He para las muestras evaluadas en este estudio demuestran una diversidad genética y un polimorfismo moderado.

En el estudio desarrollado por Ting et al. (2010) se encontraron valores de He entre 0,34 y 0,53 para la especie *E. guineensis,* y entre 0,21 y 0,32 para *E. oleifera,* resultados posiblemente relacionados con el uso de microsatélites génicos (EST-SSR). En contraste, los resultados derivados del trabajo de Billotte et al. (2001), en el que se emplearon marcadores exclusivamente genómicos, mostraron valores de diversidad genética para *E. guineensis* de 0,68 y 0,63, que en el caso de *E. oleifera* representan polimorfismos altos en las poblaciones estudiadas. Los valores de heterocigosidad obtenidos aparecen como intermedios entre los estudios citados antes. Estos resultados son la suma de diferentes factores presentes en la naturaleza de las poblaciones estudiadas, así como la combinación de microsatélites génicos (40 %) y genómicos (60 %) usados en la evaluación molecular.

Dentro de los resultados de caracterización genética de los materiales de palma se encontraron algunos alelos con una frecuencia de 100 % para determinados grupos biológicos (sMo00027, sEg00126 y sMo00138). Por ejemplo, para el marcador sEg00126 se encontró que el alelo 214 estuvo presente como homocigoto en todas las muestras de la especie *E. oleifera*. También se halló lo mismo para el alelo 152 (marcador sEg0076), el cual se encontró con una frecuencia de 100 % en las muestras de *E. guineensis,* así como en los híbridos interespecíficos, pero no se identificó en ningún material de *E. oleifera*. Los alelos exclusivos para ambas especies se observaron en nueve de los diez

marcadores evaluados, y estuvieron presentes en 51,1 % (23) de los alelos hallados en las muestras de las poblaciones de híbridos interespecíficos.

Tabla 10.4. Heterocigosidad esperada (He)* para los diez marcadores microsatélites evaluados en 362 materiales de palma de aceite por Gallego et al. (2012)

Estatus biológico	Frecuencia	sEg00126	sMo00134	sMo00138	sEg0076	sMo00027	sEg00125	mEgCIR230	sMo00018	mEgCIR008	sEg0009	He
Total individuos	362	0,51	0,19	0,62	0,24	0,57	0,56	0,71	0,70	0,74	0,83	0,57
Híbrido *E. guineensis* (Dura × Dura)	20	0,47	0,04	0,42	0,00	0,00	0,05	0,71	0,32	0,54	0,40	0,29
Híbrido *E. guineensis* × *E. oleifera*	191	0,51	0,12	0,57	0,08	0,63	0,58	0,71	0,68	0,74	0,86	0,55
Parental *E. guineensis*	110	0,49	0,29	0,48	0,01	0,20	0,24	0,51	0,50	0,64	0,63	0,40
Parental *E. oleifera*	41	0,00	0,28	0,00	0,02	0,51	0,41	0,26	0,63	0,15	0,53	0,28

* He calculada a nivel global y por subgrupos.
Fuente: Gallego et al. (2012)

Estos resultados reflejan la posibilidad de establecer un sistema de identificación molecular de plantas de palma de aceite por medio de un grupo específico de marcadores microsatélites que exhiba un alto poder de discriminación, como el observado en algunos marcadores del presente estudio. Es importante anotar que también se identificaron nuevos alelos que no habían sido reportados previamente y que servirán como punto de partida para la elaboración de perfiles genéticos más detallados y específicos de cada especie y sus respectivos híbridos intra- e interespecíficos.

Para determinar la estructura poblacional y las características diferenciales de cada uno de los grupos evaluados, así como las posibles relaciones genéticas de los individuos y su dispersión, se utilizó un análisis de correspondencia múltiple (ACM) con el procedimiento CORRESP de SAS (SAS Institute Inc., 1999). El análisis de correspondencia múltiple relaciona diferentes perfiles moleculares de los microsatélites, para ayudar a entender la tendencia principal de los individuos observados con respecto a su genotipo. De este modo, los individuos que aparezcan muy cercanos en la gráfica compartirán un alto

número de alelos dentro de sus respectivos perfiles moleculares y, por consiguiente, los que estén muy distantes presentarán perfiles genéticos muy diferenciados en relación con su composición alélica.

Así, el método multivariado de ACM permitió diferenciar de manera eficiente las muestras de la especie *E. oleifera*, así como las correspondientes a la especie *E. guineensis* y los híbridos interespecíficos (figura 10.2a). Estos tres grupos principales, ubicados espacialmente dentro del plano tridimensional, mostraron subagrupaciones que pueden estar relacionadas con características específicas que permiten establecer diferencias dentro de un determinado estatus biológico o especie.

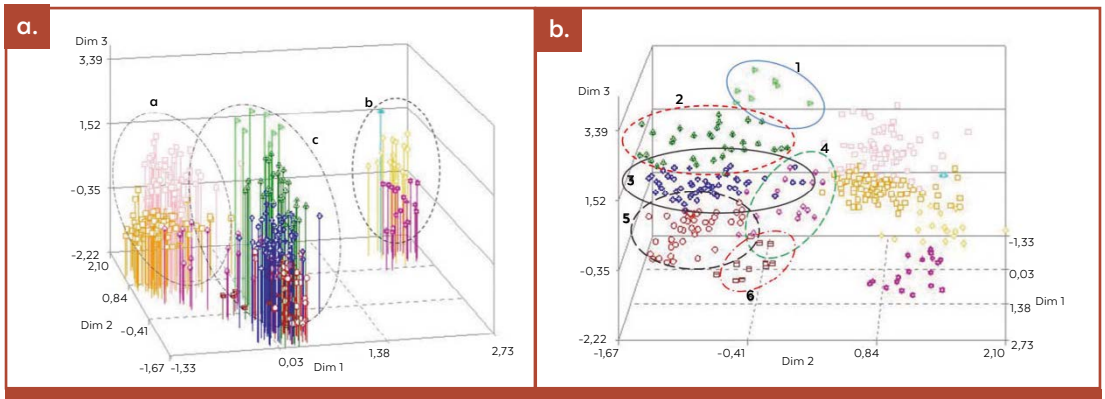


Figura 10.2. ACM de datos genotípicos que muestran la distribución espacial de 362 muestras de palma de aceite. a. Distribución espacial de las 362 muestras: a) individuos de *E. guineensis*, b) individuos de *E. oleifera* y c) materiales híbridos interespecíficos y retrocruces; b. Comportamiento de los híbridos interespecíficos. Los subgrupos de cada grupo se representan en diferentes colores

Fuente: Gallego et al. (2012)

En el grupo b, correspondiente a las muestras de *E. oleifera*, se encontraron tres subgrupos (figura 10.2a), uno de los cuales estaba constituido por una única muestra (*bulk* 46, señalado en azul), que mostró características muy diferenciadas a nivel de perfil molecular. El grupo a, conformado por los individuos de *E. guineensis*, se dividió en dos subgrupos bien diferenciados (figura 10.2a), y un grupo adicional (señalado en morado en el grupo b) apareció como puente genético entre los individuos híbridos (grupo c) y los materiales de la especie *E. guineensis* (grupo a). Estos individuos corresponden a los retrocruces que se desarrollaron con el parental *E. guineensis*, y el resultado refuerza la validación

de los datos ya que indica que estas muestras se acercan más al progenitor elegido. En los híbridos interespecíficos, se observó un nivel de subdivisión considerable, con la diferenciación de seis grupos (figura 10.2b).

Dentro del mismo análisis de ACM se pudo visualizar la relación entre la información molecular generada y los datos fenotípicos que habían sido recopilados por AGROSAVIA para cada uno de los materiales (figura 10.3). Las características analizadas fueron producción de aceite linoleico, oleico, palmítico, carotenos, color del polen, crecimiento de la planta, grupo de polen, olor del polen, partenogénesis, resistencia a PC, tipo de cuesco y viabilidad del polen. Los resultados de tres características —crecimiento de la palma (figura 10.3a), producción de aceite (figura 10.3b) y resistencia a PC (figura 10.3c)— indican la distribución espacial derivada de los datos moleculares y el modo como esas agrupaciones se comportan con cada variable fenotípica, lo cual permite inferir la razón por la cual se separan o agrupan las poblaciones del estudio. Este ejercicio no obedece a un análisis de correspondencia entre datos moleculares y datos fenotípicos, ya que la posición de la muestra en la figura 10.3 está dada en todos los casos por la información molecular.

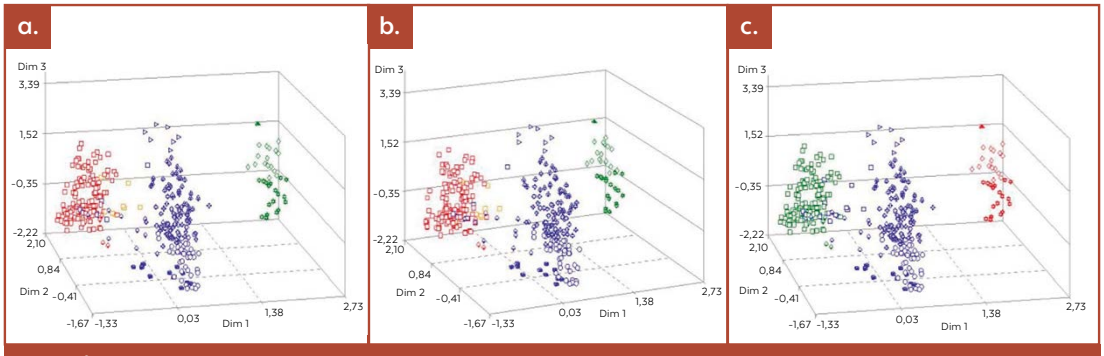


Figura 10.3. ACM de datos moleculares en el que se marcaron las muestras por colores para las variables (*E. guineensis* se muestra a la izquierda de cada figura [color rojo en a y b, y verde en c], *E. oleifera* a la derecha [color verde en a y b, y rojo en c] y los híbridos y retrocruzas en el intermedio [colores azul y naranja, respectivamente]).
a. Crecimiento; b. Producción de aceite; c. Pudrición del cogollo (PC).
Fuente: Gallego et al. (2012)

Así, a partir del análisis de ACM generado únicamente con los datos moleculares fue posible identificar cómo están distribuidas las muestras en relación con diferentes variables fenotípicas y datos de pasaporte, por asignación de colores. Los parentales *E. guineensis* exhiben elevada tasa de crecimiento y altos porcentajes de producción de aceite (color rojo) y susceptibilidad a PC (color verde); los híbridos interespecíficos presentan tasa de crecimiento y producción de aceite medias, así como resistencia a PC (color azul); los individuos de las retrocruzas (RC2) muestran tasa de crecimiento y porcentaje de aceite medio-alto (color naranja), y los parentales *E. oleifera* presentan tasa de crecimiento y producción de aceite bajas (color verde), así como resistencia a PC (color rojo) (figura 10.3).

Como parte de un convenio de agenda interna de AGROSAVIA, se continuó la caracterización molecular en una nueva población del parental *E. oleifera* (seis individuos) y de los híbridos O × G (90 individuos) colectados en el C. I. El Mira, con cinco marcadores tipo SSR (Barrero et al., 2013a) adicionales a los diez descritos anteriormente en el estudio de Gallego et al. (2012). A continuación, se describen brevemente los resultados generados con estos cinco marcadores.

Para las pruebas de estandarización se evaluaron inicialmente 45 SSR en tres individuos híbridos y tres parentales mediante corrido electroforético en gel de poliacrilamida. A partir de esto, se seleccionaron nueve SSR polimórficos, que fueron evaluados en el total de la población de 96 individuos; de estos, cinco fueron seleccionados para análisis posteriores por representar alto polimorfismo en la población híbrida (sEg00032, sEg0090, sEg00140, sMo00129 y sMo00132). Un marcador adicional evaluado previamente por Gallego et al. (2012) (sEg0009) (tabla 10.4) fue usado como control. El número de alelos por locus presentó un rango entre 2 y 3, con un promedio de 2,67 (tabla 10.5). El PIC presentó un rango entre 0,57 para sMo00129 y 0,23 para sEg0140, lo cual concuerda con la presencia de un menor número de alelos en este último. La heterocigosidad observada (Ho) en la población presentó un valor alto, con promedio de 0,59, mientras que la He presentó un valor promedio de 0,50, y fue el marcador sMo00129 el que obtuvo los valores más altos (He = 0,64).

Tabla 10.5. Resumen del análisis de variabilidad de cinco nuevos SSR y un control, de acuerdo con Barrero et al. (2013a)

Marcador	Secuencia del cebador dirección 5-3	Referencia	Frecuencia alélica	N.º alelos	Heterocigosidad esperada (He)	Heterocigosidad observada (Ho	PIC+
sEg0009	F-TCCACTGACAACAGGACTCA R-AAAAACGCATCTCAGAGAGA	Ting et al. (2010)	0,53	2	0,50	0,94	0,37
sMo00129	F-TTAGTATTGGGTGTGCATAAGTGG R-GCTTCCAGCTCCTCTTTCTACC	Zaki et al. (2010)	0,47	3	0,64	0,95	0,57
sMo00132	F-ATAGCCAGAGGGCAAAACTGT R-GCAACACACGGACTCAAAACTA	Zaki et al. (2010)	0,48	3	0,54	0,08	0,43
sEg00090	F-TCAGAAATGCCTACATCAAAC R-AGGGACACGAGAATACATACA	Ting et al. (2010)	0,65	3	0,50	0,58	0,44
sEg00032	F-CTGTTGAGCTGGAGAGACCC R-CCAACCAGGATCAGTTTGGT	Ting et al. (2010)	0,50	3	0,54	0,74	0,44
sEg0140	F-TAGAAAGTGAGACGGTGGAT R-GTAATATTCTCAAGCTGGCAGT	Ting et al. (2010)	0,84	2	0,26	0,31	0,23
Promedio			**0,58**	**2,67**	**0,50**	**0,60**	**0,41**

* Ho y He calculadas con el *software* PowerMarker (Liu & Muse, 2005) + PIC calculado de acuerdo con Botstein et al. (1980).
Fuente: Barrero et al. (2013a)

Al comparar estos resultados con el estudio de Gallego et al. (2012), se encuentra que el número promedio de alelos por locus es menor (2,67 versus 4,5) y que la He para la población total es ligeramente menor (0,50 versus 0,57), lo cual posiblemente se relaciona con el menor tamaño poblacional y con las diferencias inherentes a los individuos y marcadores analizados. Al comparar con otros estudios, como el de Billotte et al. (2001), se encuentra que el número promedio de alelos por locus es también menor (2,67 versus 5,25). En este último trabajo se evaluó un alto número de materiales de diferentes procedencias y especies relacionadas como *Bactris gasipaes*. Al comparar estos resultados con los reportados por Bakoumé et al. (2007),

quienes encontraron un número total de 209 alelos, un promedio de 3,3 alelos por locus en 16 SSR y 494 individuos procedentes de diez países africanos, se observa que los valores son similares (2,67 versus 3,3). Igualmente, el número promedio de alelos es parecido al obtenido por Singh et al. (2008), con un valor de 2,6, el cual es consistente con el tipo de población evaluada, ya que los cultivares mejorados tienden a presentar un bajo número de alelos.

Por otro lado, el valor promedio de He (0,50) es similar al obtenido por Montoya et al. (2005) en la exploración preliminar del germoplasma de Angola llevada a cabo en Cenipalma (He = 0,45). Además, estudios efectuados con isoenzimas (Hayati et al., 2004) y RFLP (Maizura et al., 2006), que incluyen germoplasma de varios países africanos, reportan valores de He menores (0,18 y 0,19, respectivamente), al igual que en el estudio de Singh et al. (2008), en el que se obtiene un He = 0,36 con el uso de marcadores EST-SSR.

Por el contrario, con locus microsatélites, Cochard et al. (2009) reportaron una Ho promedio de 0,63, comparable al valor obtenido en el estudio de Barrero et al. (2013a) (Ho = 0,60, tabla 10.5). De lo anterior se puede inferir que el número de alelos detectados, así como la diversidad genética, dependen de la procedencia del germoplasma, el tamaño poblacional, el tipo de marcadores y el estado de mejoramiento.

Para conocer las relaciones genéticas de la población de estudio, se generó un dendrograma a partir de las frecuencias alélicas, que muestra cuatro grupos. El grupo 1 (rojo) está conformado por los seis genotipos maternos *E. oleifera,* mientras que los otros tres están compuestos por los individuos híbridos: el grupo 2 (azul), de 35 genotipos con mayor similitud al parental materno; el grupo 3 (negro), de siete genotipos con similitud intermedia, y el grupo 4 (verde), de 48 genotipos, posiblemente más relacionados con el padre *E. guineensis* (figura 10.4a). Estos resultados fueron soportados por el análisis de componentes principales (ACP), en el que los primeros componentes explican el 35,71 % de la variación presente en la población de estudio (figura 10.4b).

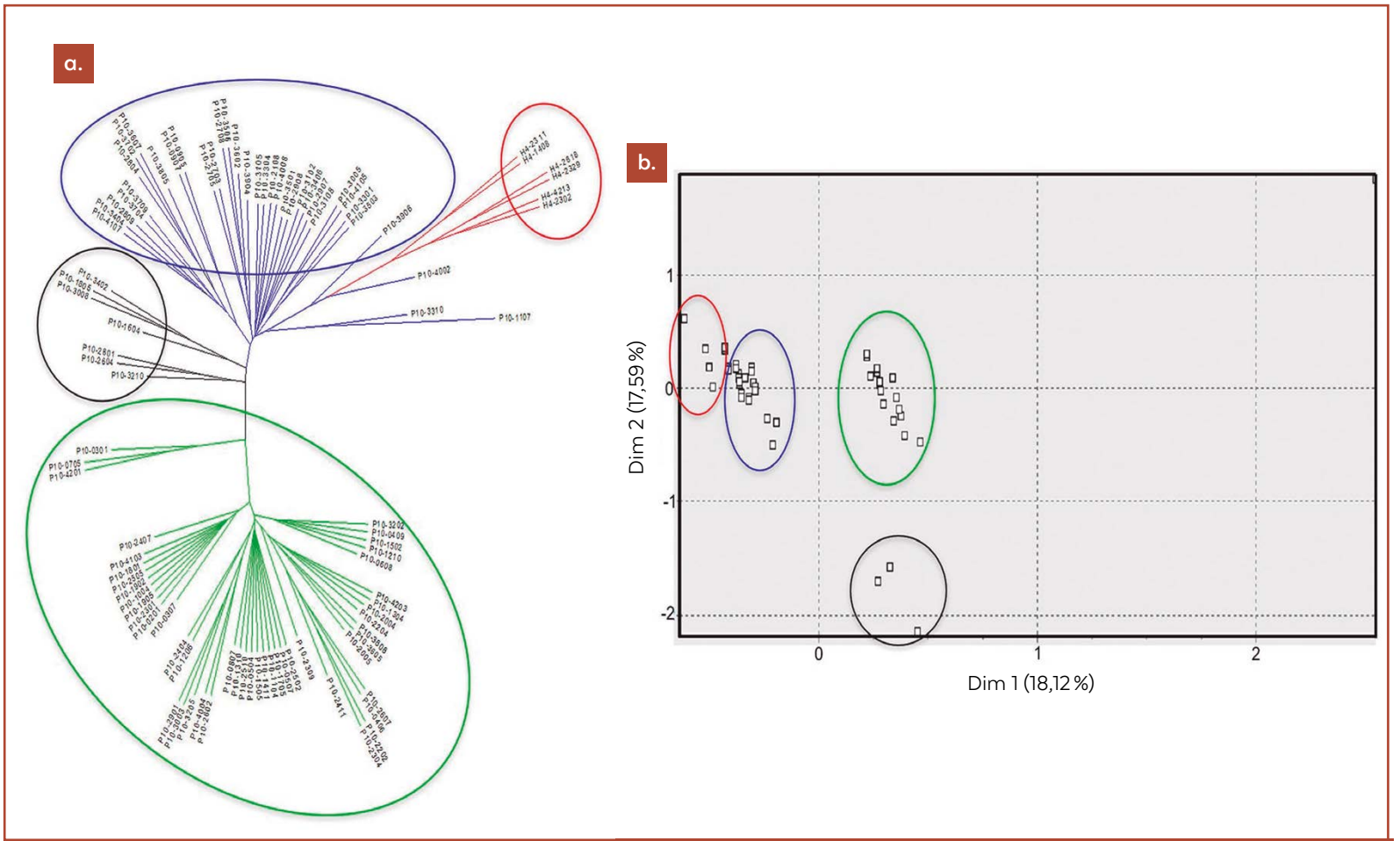


Figura 10.4. Análisis *neighbor-joining* y de componentes principales (ACP) en 96 genotipos de palma de aceite. a. Dendrograma aplicado al algoritmo *neighbor-joining*, basado en la matriz de distancias de Nei (1972) y en un remuestreo de 1.000 réplicas (PHYLIP, versión 3.5c) (Felsenstein, 1989); b. ACP, que muestra las dos primeras coordenadas (Genetix, versión 4.05) (Belkhir et al., 2004). En rojo se muestran los individuos de *E. oleifera*, mientras que los híbridos se presentan en tres grupos de otros colores.

Fuente: Barrero et al. (2013a)

De esta forma, los cinco nuevos locus microsatélites permitieron discriminar tres poblaciones con similitud intermedia al parental materno *E. oleifera* y con posible similitud al padre *E. guineensis*. Así, con base en los estudios anteriormente mencionados (Barrero et al., 2013a; Gallego et al., 2012), se puede concluir que fue posible identificar un total de quince marcadores SSR adecuados para discriminar las poblaciones híbridas generadas por el programa de mejoramiento de AGROSAVIA.

Marcadores SNP

Los anteriores estudios indican que es posible establecer un sistema de identificación molecular de las plantas de palma de aceite para futuros estudios de mejoramiento, diversidad genética y conservación, mediante el uso de marcadores altamente informativos como los SSR. A futuro también se espera incluir poblaciones con un mayor número de individuos y con marcadores moleculares más abundantes en el genoma, como los SNP, para la selección de poblaciones diferenciales en etapa de vivero y la asociación con el fenotipo de interés (por ejemplo, selección genómica o mapeo por asociación), como apoyo al mejoramiento del cultivo.

En relación con lo anterior, AGROSAVIA, en convenio con la Universidad de Cornell, EE. UU. (Barrero et al., 2013b), procesó nuevas poblaciones F1 O × G en fase de vivero (380 individuos preliminares) y posibles parentales (27 individuos), mediante GBS, lo que permitió obtener miles de marcadores SNP, ideales para estudios de diversidad genética y de asociación genotipo (variante alélica o SNP) con fenotipo (Elshire et al., 2011).

Como producto de la genotipificación vía GBS, se identificaron 131,825 SNP en un panel de 407 muestras, los cuales fueron filtrados por desequilibrio de ligamiento (DL) para eliminar marcadores redundantes y frecuencia mínima de alelos (MAF = 0,05) y así se obtuvo un set de 3,506 SNP de alta calidad, con un porcentaje de datos perdidos de 18,75 %. Con estos marcadores se realizó un análisis de componentes principales en el paquete estadístico R (Dalgaard, 2010), en el que los tres primeros componentes explicaron 15,47 % de la variación presente en la población de estudio (figura 10.5).

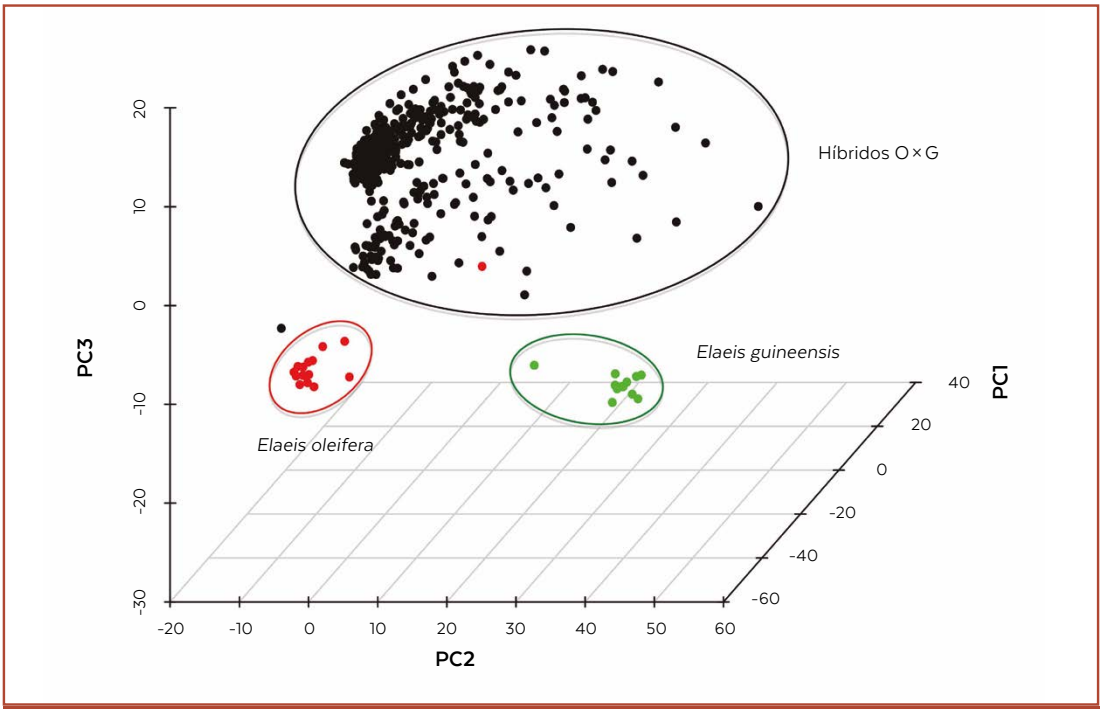


Figura 10.5. Distribución espacial de los tres primeros componentes principales en la población de híbridos O × G y parentales. Se observa una clara separación entre los parentales y los híbridos.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en el análisis de distancias genéticas, con el método de agrupación del vecino más cercano (*neighbor joining*), implementado en el *software* TASSEL V3 (Bradbury et al., 2007), se observó un claro patrón de tres grandes grupos. Dos estaban relacionados por su afinidad con cada uno de los parentales, y dentro de ellos también pudieron diferenciarse claramente varios subgrupos de los híbridos O × G (figura 10.6). El gran número de marcadores obtenido permite diferenciar, con un alto grado de confianza, los grupos de poblaciones segregantes, en relación con su afinidad a los parentales. A futuro, en la medida en que estas poblaciones segregantes se evalúen para fenotipos de interés como la PC, será posible realizar estudios de asociación rasgo-marcador para identificar regiones del genoma relacionadas con estos rasgos y seleccionar progenies con atributos de interés en etapas de previvero.

Un ejemplo de esto se ilustra en el estudio de asociación de genoma completo, genotipo (GBS)-fenotipo de Osorio-Guarín et al. (2019), en el que se usó una población de 378 individuos del híbrido O × G generado por AGROSAVIA y

se identificaron doce regiones genómicas (SNP), localizadas cerca de genes candidatos y asociadas con la arquitectura de la planta y la producción, como potenciales marcadores para selección asistida del programa de mejoramiento. Además, recientemente Garzón-Martínez et al. (2022) evaluaron 431 híbridos O x G y 444 retrocruces (BC1) generados por AGROSAVIA para características morfológicas y de producción, mediante estudios de predicción genómica. Se encontraron altos grados de predicción para el área foliar, la altura del tallo y la producción —esta última con el uso de modelos multicaracteres—, lo cual confirmó el potencial de GS para selección de parentales y predicción de valores genéticos.

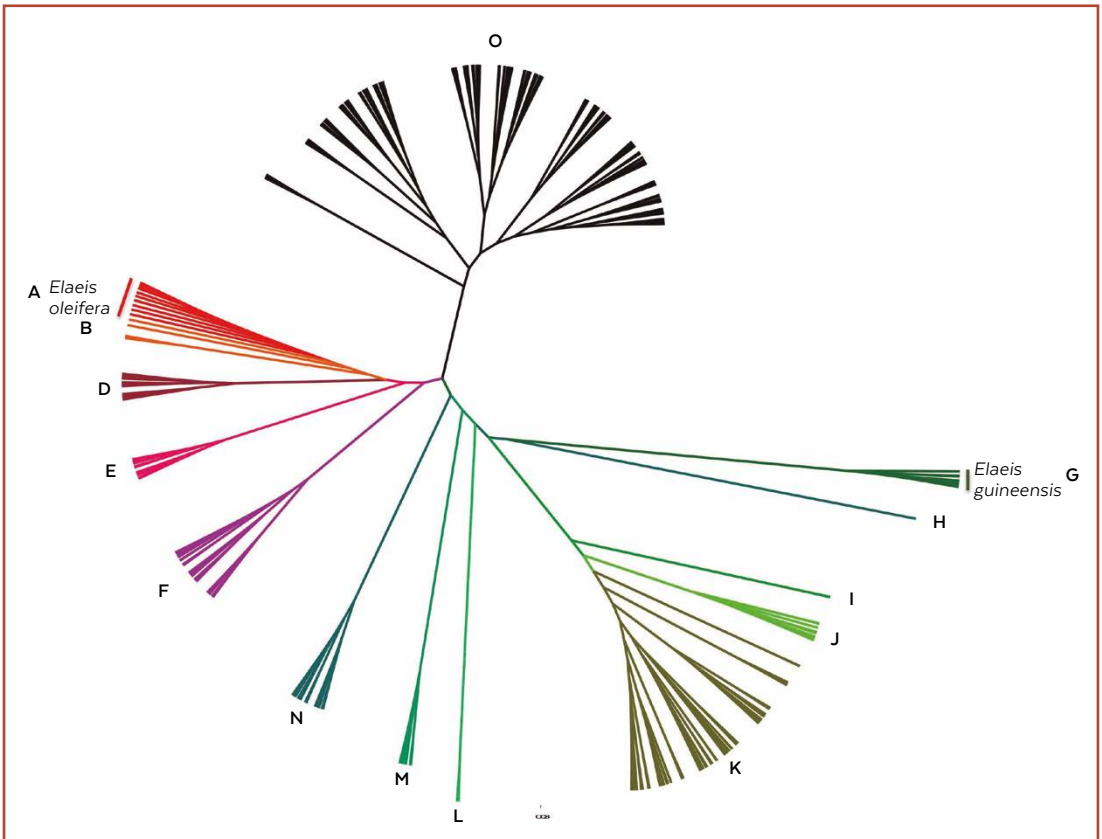


Figura 10.6. Árbol de distancias genéticas generado con el método de agrupamiento de *neighbor joining*, en el que se observan tres grupos, dos que conforman subgrupos cercanos al parental resistente *E. oleifera* (A [subgrupos B, D, E y F]) y al parental susceptible *E. guineensis* (G [subgrupos H, I, J, K, L M y N]), y un tercer grupo intermedio, situado entre los dos parentales (O).

Fuente: Elaboración propia con base en Barrero et al. (2013a)

Estas plataformas pueden alinearse con sistemas de marcadores de última generación recientemente implementados o en proceso de implementación, para el eficaz mejoramiento genético de la especie. Dado lo anterior, se espera que en un futuro cercano se puedan establecer acercamientos entre instituciones nacionales e internacionales para avanzar eficientemente en el mejoramiento genético de este cultivo en Colombia.

Referencias

Arias, D., & Rocha, P. (2004). Análisis de diversidad genética en materiales tolerantes y susceptibles a la pudrición de cogollo en palma de aceite mediante marcadores moleculares. *Palmas, 25*(3), 11-27. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1004

Arias, D., & Núñez, V. M. (2006). *Caracterización molecular de genotipos de palma mejorados, utilizados en el programa de mejoramiento de palma de aceite del centro experimental El Mira* [Informe final, Programa de Recursos Genéticos Vegetales y Biotecnología]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Bakoumé, C., Wickneswari, R., Rajanaidu, N., Kushairi, A., Amblard, P., & Billotte, N. (2007). Allelic diversity of natural oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) populations detected by microsatellite markers: Implications for conservation. *Plant Genetic Resources, 5*(2), 104-107. https://doi.org/10.1017/S1479262107710870

Barcelos, E. (1998). *Etude de la diversité génétique du genre* Elaeis (E. oleifera *[Kunth] Cortés et* E. guineensis *Jacq.) par marqueurs moléculaires* (RFLP *et* AFLP) [Thèse de docteur] Université de Montpellier II.

Barrera, S. N. (2011). *Estructura genética de poblaciones naturales de palma de aceite (*Elaeis guineensis *Jacq.) procedentes de Angola* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7835

Barrero, L. S., Bastidas, S., Duque, L. M., Pérez, J. I., & Delgadillo, L. P. (2013a). *Nuevos (adicionales) marcadores moleculares desarrollados y tres poblaciones de trabajo identificadas del híbrido O × G con contenido genético similar o intermedio a los parentales* [Informe final, Convenio Agenda Interna 211, Corpoica-MADR].

Barrero, L. S., Bastidas, S., Duque, L. M., Pérez, J. I., & Delgadillo, L. P. (2013b). *Población seleccionada y procesada de 95 individuos del híbrido O×G y sus parentales, pertenecientes al programa de mejoramiento genético en palma de aceite de Corpoica para genotipificación* [Informe final, Convenio 211 Corpoica-Universidad de Cornell-MADR].

Bassam, B. J., Caetano-Anollés, G., & Gresshoff, P. M. (1991). Fast and sensitive silver staining of DNA in polyacrylamide gels. *Analytical biochemistry, 196*(1), 80-83. https://doi.org/10.1016/0003-2697(91)90120-I

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Pérez, J., & Tolosa, W. (2007). Comportamiento agronómico del cultivar híbrido RC1 de palma de aceite (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) x *Elaeis guineensis*. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8*(1), 5-11. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:77

Belkhir, K., Borsa, P., Chikhi, L., Raufaste, N., & Bonhomme, F. (2004). *GENETIX 4.05, logiciel sous Windows TM pour la génétique des populations*. Université de Montpellier II. https://kimura.univ-montp2.fr/genetix/

Billote, N., Lagoda, P. J. L., Risterucci, A. M., & Baurens, F. C. (1999). Microsatellite-enriched libraries: Applied methodology for the development of SSR markers in tropical crops. *Fruits, 54*(4), 277-288.

Billotte, N., Marseillac, N., Risterucci, A. M., Adon, B., Brottier, P., Baurens, F.C, Singh, R., Herrán, A., Asmady, H., Billot, C., Amblard, P., Durand-Gasselin, T., Courtois, B., Asmono, D., Cheah, S. C., Rohde, W., Ritter, E., & Charrier, A. (2005). Microsatellite-based high density linkage map in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Theoretical and Applied Genetics, 110*, 754-765. https://doi.org/10.1007/s00122-004-1901-8

Billotte, N., Risterucci, A. M., Barcelos, E., Noyer, J. L., Amblard, P., & Baurens, F. C. (2001). Development, characterisation, and across-taxa utility of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) microsatellite markers. *Genome, 44*, 413-425. https://doi.org/10.1139/g01-017

Botstein, D., White, R. L., Skolnick, M., & Davis, R. W. (1980). Construction of a genetic linkage map in man using restriction fragment length polymorphisms. *Am J Hum Genet, 32*(3), 314-331. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1686077/?page=1

Bradbury, P. J., Zhang, Z., Kroon, D. E., Casstevens, T. M., Ramdoss, Y., & Buckler, E. S. (2007). TASSEL: software for association mapping of complex traits in diverse samples. *Bioinformatics, 23*(19), 2633-2635. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btm308

Cochard, B., Adon, B., Rekima, S., Billotte, N., Chenon, R. B., Koutou, A., Nouvy, B., Omoré, A., Razak Purba, A., Glazsmann, J. C., & Noyer, J. L. (2009). Geographic and genetic structure of African oil palm diversity suggests new approaches to breeding. *Tree Genetics & Genomes, 5*(3), 493-504. https://doi.org/10.1007/s11295-009-0203-3

Cook, R. (2023). *Ranking of countries that produce the most oil palm fruit (FAO)*. https://beef2live.com/story-ranking-countries-produce-oil-palm-fruit-fao-204-215761

Cros, D., Bocs, S., Riou, V., Ortega-Abboud, E., Tisné, S., Argout, X., Pomiès, V., Nodichao, L., Lubis, Z., Cochard, B., & Durand-Gasselin, T. (2017). Genomic preselection with genotyping-by-sequencing increases performance of commercial oil palm hybrid crosses. *BMC Genomics, 18,* 839. https://doi.org/10.1186/s12864-017-4179-3

Cros, D., Denis, M., Sanchez, L., Cochard, B., Edyana-Suryana, H., Omoré A., Durand-Gasselin, T., & Bouvet, J.M. (2013). *Factors controlling accuracy of genomic selection in oil palm* (Elaeis guineensis) [Conferencia]. Plant and Animal Genome Conference, PAG XXI. San Diego, Estados Unidos.

Elshire, R. J., Glaubitz, J. C., Sun, Q., Poland, J. A., & Kawamoto, K., Buckler, E. S., & Mitchell, S. E. (2011). A robust, simple genotyping-by-sequencing (GBS) approach for high diversity species. *PloS One, 6,* 319-379. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019379

Federación Nacional de Cultivadores de Palma [Fedepalma]. (2013). *Biodiésel de palma colombiano: de la ficción energética a la realidad de un negocio*.

Felsenstein, J. (1989). PHYLIP: Phylogeny inference package: Versión 3.2. *The Quarterly Review of Biology, 64*(4), 164-166. https://doi.org/10.1086/416571

Galeano, C. H. (2005). Estandarización de la técnica molecular de AFLP en palma de aceite tipo Dura (*Elaeis guineensis* Jacq.) y estudio preliminar de caracterización. *Agronomía Colombiana, 23*(1), 42-49. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180316951006

Gallego, G., Barrero, L. S., Suárez, H., Bastidas, S., & Hernández, E. G. (2012). *Aplicación de herramientas biotecnológicas para potenciar el desarrollo regional: parentales e híbridos O×G de palma de aceite caracterizados molecularmente (SSR)* [Informe final, Convenio 072 Corpoica-CIAT-MADR].

Garzón-Martínez, G. A., Osorio-Guarín, J. A., Moreno, L. P., Bastidas, S., Barrero, L. S., López-Cruz, M., & Enciso-Rodríguez, F. E. (2022). Genomic selection for morphological and yield-related traits using genome-wide SNPs in oil palm. *Molecular Breeding, 42,* 71. https://doi.org/10.1007/s11032-022-01341-5

Hayati, A., Wickneswari, R., Maizura, I., & Rajanaidu, N. (2004). Genetic diversity of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) germplasm collections from Africa: Implications for improvement and conservation of genetic resources. *Theoretical and Applied Genetics, 108*, 1274-1284. https://doi.org/10.1007/s00122-003-1545-0

Hernández, V., Barrero, L. S., & Narváez, J. (1997). Estandarización de una metodología para la electroforesis de proteínas totales de palmas de aceite. En *V Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos* (p. 105). Produmedios.

Kularatne, R. S., Shah, F. H., & Rajanaidu, N. (2001). The evaluation of genetic diversity of Deli dura and African oil palm germplasm collection by AFLP technique. *Tropical Agricultural Research, 13*, 1-12. http://192.248.43.153/bitstream/1/1596/2/PGIATAR-13-1.pdf

Liu, J., & Muse, S. V. (2005). PowerMarker: An integrated analysis environment for genetic marker data. *Bioinformatics, 21*(9), 2128-2129. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bti282

Maizura, I., Rajanaidu, N., Zakri, A. H., & Cheah, S. C. (2006). Assessment of genetic diversity in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) using Restriction Fragment Length Polymorphism (RFLP). *Genetic Resources and Crop Evolution, 53*, 187-195. https://doi.org/10.1007/s10722-004-4004-0

Mayes, S., Hafeez, F., Price, Z., MacDonald, D., & Billotte, N. (2008). Molecular research in oil palm, the key oil crop for the future. In P. Moore & R. Ming (eds), *Genomics of tropical crop plants* (pp. 371-404). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71219-2_15

Mayes, S., Jack, P. L., & Corley, R. H. V. (2000). The use of molecular markers to investigate the genetic structure of an oil palm breeding programme. *Heredity, 85*(3), 288-293. https://doi.org/10.1046/j.1365-2540.2000.00758.x

Mayes, S., Jack, P. L., Corley, R. H., & Marshall, D. F. (1997). Construction of a RFLP genetic linkage map for oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Genome, 40*, 116-122. https://doi.org/10.1139/g97-016

Montoya, C., Arias, D., Rey, L., & Rocha, P. J. (2005). Caracterización molecular de materiales *Elaeis guineensis* Jacq. procedentes de Angola. *Fitotecnia Colombiana, 5*, 1-10. https://www.researchgate.net/publication/236091128_CARACTERIZACION_MOLECULAR_DE_MATERIALES_Elaeis_guineensis_Jacq_PROCEDENTES_DE_ANGOLA

Moretzsohn, M. C., Ferreira, M. A., Amaral, Z. P. S., Coelho, P. J. A., Grattapaglia, D., & Ferreira, M. E. (2002). Genetic diversity of Brazilian oil palm (*Elaeis oleifera* H. B. K.) germplasm collected in the Amazon Forest. *Euphytica. 124*, 35-45. https://doi.org/10.1023/A:1015606304653

Nei, M. (1972). Genetic distance between populations. *The American Naturalist, 106*(949), 283-292. https://doi.org/10.1086/282771

Ochoa, I., Villegas, V., & Beebe, S. (1997). Identification of RAPD molecular markers associated with resistance to the bud rot complex in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Revista Palmas, 18,* 33-38. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/581/581

Ong, P. W., Maizura, I., Abdullah, N. A. P., Rafii, M. Y., Ooi, L. C. L., Low, E. T. L., & Singh, R. (2015). Development of SNP markers and their application for genetic diversity analysis in the oil palm (*Elaeis guineensis*). *Genetics and Molecular Research, 14*(4), 12205-12216. https://doi.org/10.4238/2015.October.9.9

Osorio-Guarín, J. A., Garzón-Martínez, G. A., Delgadillo-Durán, P., Bastidas, S., Moreno, L. P., Enciso-Rodríguez, F. E., Cornejo, O. E., & Barrero, L. S. (2019). Genome-wide association study (GWAS) for morphological and yield-related traits in an oil palm hybrid (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) population. BMC *Plant Biology, 19,* 533. https://doi.org/10.1186/s12870-019-2153-8

Price, Z., Schulman, A. H., & Mayes, S. (2003). Development of new marker methods-an example from oil palm. *Plant Genetic Resources, 1*(2-3), 103-113. https://doi.org/10.1079/PGR200317

Purba, A. R., Noyer, J. L., Baudouin, L., Perrier, X., Hamon, S., & Lagoda, P. J. L. (2000). A new aspect of genetic diversity of Indonesia oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) revealed by isoenzyme and AFLP markers and its consequences for breeding. *Theoretical and Applied Genetics, 101*(5-6), 956-961. https://doi.org/10.1007/s001220051567

Dalgaard, P. (2010). *The R Project for Statistical Computingstatistical computing.* http://www.R-project.org/

Rajinder, S., & Suan-Choo, A. R. (1998). Generation of molecular markers in oil palm (*Elaeis guineensis*) using AFLPTM analysis. *Plant Biotechnology, 20,* 26-27.

SAS Institute Inc. (1999). *SAS/STAT User's Guide 9.1.* SAS Institute Inc. https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc_91/stat_ug_7313.pdf

Shah, F. H., Rashid, O., Simons, A. J., & Dunsdon, A. (1994). The utility of RAPD markers for the determination of genetic variation in oil palm (*Elaeis guineensis*). *Theoretical and Applied Genetics, 89,* 713-718. https://doi.org/10.1007/BF00223710

Singh, R., Ong-Abdullah, M., Leslie Low, E. T., Manaf, M. A. A., Rosli, R., Nookiah, R., Ooi, L. C. L., Ooi, S. E., Chan, K. L., Halim, M. A., Azizi, N., Nagappan, J., Bacher, B., Lakey, N., Smith, S. W., He, D., Hogan, M., Budiman, M. A., Lee, E. K. … Sambanthamurthi, R. (2013). Oil palm genome sequence reveals divergence of interfertile species in old and new worlds. *Nature, 500,* 335-339. https://doi.org/10.1038/nature12309

Singh, R., Zaki, N., Ting, N. C., Rosli, R., Tan, S. G., Leslie Low, E. T., Ithnin, M., & Cheah, S. C. (2008). Exploiting an oil palm EST database for the development of gene-derived SSR markers and their exploitation for assessment of genetic diversity. *Biologia, 63,* 227-235. https://doi.org/10.2478/s11756-008-0041-z

Ting, N. C., Zaki, N. M., Rosli, R., Low, E. T. L., Ithnin, M., Cheah, S. C., Tan, S. G., & Singh, R. (2010). SSR mining in oil palm EST database: Application in oil palm germplasm diversity studies. *Journal of genetics, 89,* 135-145. https://doi.org/10.1007/s12041-010-0053-7

Ting, N.-C., Jansen, J., Mayes, D., Massawe, F., Sambanthamurthi, R., Cheng-Li Ooi, L., Weng Chin, C., Arulandoo, X., Seng, T.-Y., Syed Alwee, S. S. R., Ithnin, M., & Singh, R. (2014). High density SNP and SSR-based genetic maps of two independent oil palm hybrids. *BMC Genomics*, *15*, 309. https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-309

Turner, E. C., Snaddon, J. L., Fayle, T. M., & Foster, W. A. (2008). Oil palm research in context: Identifying the need for biodiversity assessment. *PloS One, 3,* e1572. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001572

Villegas, V., Durán, C., & Beebe, S. (2000). Caracterización molecular de materiales Dura. *Revista Palmas, 21*(número especial), 35-40. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/758

Vives, A. M., Barrero, L. S., & Narváez, J. (1997). Análisis comparativo de los perfiles electroforéticos de isoenzimas de las especies aceiteras *Elaeis guineensis* y *E. oleifera*. En *V Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos* (p. 104). Produmedios.

Zaki, N. M., Ismail, I., & Rosli, R. (2010). Development and characterization of *Elaeis oleifera* microsatellite markers. *Sains Malaysiana, 39*(6), 909-912. http://journalarticle.ukm.my/7432/

Zaki, N. M., Singh, R., Rosli, R., & Ismail, I. (2012). *Elaeis oleifera* genomic-SSR markers: Exploitation in oil palm germplasm diversity and cross-amplification in Arecaceae. *International Journal of Molecular Sciences, 13*, 4069-4088. https://doi.org/10.3390/ijms13044069



Capítulo 11

Respuesta de embriones cigóticos de palma americana de aceite (*Elaeis oleifera* [Kunth] Cortés) y de los híbridos O × G (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) crioconservados en nitrógeno líquido y su aplicabilidad

Alba Lucía Villa, Silvio Bastidas

La palma de aceite tiene gran importancia económica a nivel mundial y nacional porque se emplea para la producción de aceite destinado a diferentes usos, como el consumo humano, y porque presenta diversos valores agregados, incluido su empleo como materia prima para la producción de biodiésel (Fedepalma, 2019).

Dada la importancia de lo anterior, se han adelantado investigaciones de mejoramiento genético para obtener híbridos interespecíficos y conservar el recurso durante años, sobre todo en las especies de palma africana (*E. guineensis* Jacq.) y palma americana o nolí (*E. oleifera* [Kunth] Cortés). La primera se caracteriza por la cantidad de aceite producido y la segunda, por resistencia a la PC, alta calidad de aceite (mayores contenidos de ácido oleico y linoleico, así como bajos contenidos de ácidos grasos saturados como el ácido palmítico) y lenta tasa de crecimiento. Este tipo de materiales cuentan con semillas de tipo intermedio, susceptibles a la pérdida de humedad, y esto hace que disminuya la viabilidad de los embriones y exista una pérdida del poder

germinativo del embrión. Asimismo, *E. oleifera* presenta racimos con frutos partenocárpicos (sin polinizar y sin semilla), que pueden llegar a 90 % del total del racimo, lo que limita la obtención y el almacenamiento de semillas.

Las semillas de palma de aceite no son recalcitrantes ni ortodoxas, y pueden catalogarse como intermedias (Ellis et al., 1991). Contienen entre 10 y 12 % de humedad, y sus embriones, entre 19 y 21 %, pero cuando se almacenan en un rango de -20 a 0 °C pierden más viabilidad que cuando se guardan a 15 °C. Cuando las semillas de palma de aceite presentan entre 6,1 y 7,4 % de humedad, sus embriones contienen entre 9,1 y 12 %, estado en el cual no se espera un daño de los embriones, aunque los procesos de secado en sílica gel los afectan a nivel de radícula y haustorio (Villa & Sánchez, 2003).

Los trabajos de investigación adelantados en conservación de semillas de palma de aceite buscan, en principio, una metodología que permita almacenar la semilla sin que se pierda la viabilidad y de modo que se pueda recuperar el material. Grout et al. (1983) encontraron que es posible restablecer y germinar embriones cigóticos de palma de aceite después de congelados en nitrógeno líquido (-196 °C). De otra parte, Dumet et al. (1993), con base en resultados de trabajos anteriores, mejoraron el proceso de crioconservación de embriones somáticos, los cuales pasaron por un proceso de precrecimiento de siete días en 0,75 M de sacarosa, y sometiendo el material a un proceso de desecación con aire de cámara de flujo laminar o en cajas con gel de sílice. En la especie *Cocos nucifera* se emplearon embriones cigóticos maduros, los cuales se pretrataron mediante desecación con aire de cámara de flujo laminar durante cuatro horas y posteriormente se sometieron de 11 a 20 horas a un medio que contenía 600 g/L de glucosa y 15 % de glicerol. El promedio de recuperación estuvo entre 33 y 93 % dependiendo de la variedad (Assy-Bah, 1992). Asimismo, Villa et al. (2007) establecieron un protocolo de crioconservación para embriones cigóticos de palma de aceite, y recuperaron 88 % de las plántulas después de un día de congelación. Julcéia et al. (2009) evaluaron la tolerancia a la crioconservación de semillas completas de cinco genotipos de *E. guineensis*, las cuales se expusieron a nitrógeno líquido por siete días. En el proceso se aceleró la germinación de las semillas de los genotipos CM589 y C2528. Asimismo, no se evidenciaron efectos sobre el genotipo C2501 y se presentó una reducción de la germinación en las semillas del genotipo C7201. Lo anterior indica que

no existe interferencia en la diferenciación y el desarrollo de los tejidos embrionarios durante la germinación *in vitro*, debido a que se empleó la semilla completa, cuyas coberturas externas protegen al embrión durante la inmersión y recuperación del nitrógeno líquido (-196 °C).

El propósito de la presente investigación fue evaluar la respuesta a lo largo del tiempo con el protocolo establecido de crioconservación de embriones cigóticos, ajustado para cuatro accesiones de *E. oleifera*. El proceso permitió verificar si la viabilidad del material crioconservado se mantenía en el tiempo (1, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 días) al emplear la metodología de desecación de embriones cigóticos con sílica gel y el congelamiento rápido en nitrógeno líquido (-196 °C), así como evaluar las etapas de precongelación (secado) y poscongelación (recuperación en medio de cultivo).

Los resultados de esta investigación se orientaron a mejorar las condiciones de conservación *in vitro*, dado que en el país no existen alternativas de almacenamiento de semillas de palma por periodos prolongados. Por lo tanto, es necesario buscar opciones que permitan superar este problema, encaminadas a almacenar la semilla o los embriones cigóticos durante largos periodos (años) y mantener disponible el material vegetal ante cualquier eventualidad. La crioconservación es una alternativa segura para conservar especies valiosas cuya única forma de conservación es a nivel de campo, como en el caso de *E. oleifera*.

Esta investigación se tomó como modelo para implementar el protocolo de crioconservación en otras accesiones que componen la colección de *E. oleifera* a nivel de campo y determinar su aplicabilidad en un amplio rango de accesiones.

Respuesta de embriones cigóticos de palma americana crioconservados en nitrógeno líquido

El material vegetal consistió en semillas sexuales de cuatro accesiones (P1606N, P1409N, P5105N y EM5007N) de palmas *E. oleifera*, obtenidas mediante polinización abierta, en estado de madurez y desarrollo completo. Las semillas fueron colectadas en el C. I. El Mira de AGROSAVIA, Tumaco, Nariño.

Se realizaron pruebas para determinar el estado fisiológico de desarrollo de los embriones de las semillas de la palma americana, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes: determinar la humedad de las semillas, hacer pruebas bioquímicas de viabilidad del embrión y adelantar pruebas de germinación *in vitro* de los embriones cigóticos correspondientes a cada una de las accesiones.

Determinar la humedad de las semillas

El contenido de humedad de las semillas se determinó por su pérdida de peso cuando están secas, y se expresó como un porcentaje del peso de la muestra original (SST, 1993). La siguiente fue la fórmula empleada para calcular la humedad de las semillas con base en peso fresco:

$$\% H = \frac{(Pi - Pf) \times 100}{Pi},$$

donde

% H = porcentaje de humedad de las semillas,

P_i = peso fresco de la muestra de semillas (peso inicial) y

P_f = peso seco de la muestra de semillas (peso final).

Para determinar la humedad, se tomaron 20 semillas de cada accesión, se extrajeron sus almendras, se trituraron en un molino Foss® Cemotec, se tomó una muestra de 5 mg y se pesó en la balanza Ohaus® MB45, la cual permite obtener el peso final puesto que funciona con el principio de la fórmula que determina la humedad. Se realizaron tres muestras por cada accesión y de esta forma se obtuvo el porcentaje de humedad con el que llega el material al laboratorio. Se determinó que las semillas de las cuatro accesiones, en su estado de madurez óptima, contenían entre 16,13 y 19,55 % de humedad, valor superior a 11 %, mínimo requerido para realizar la extracción de los embriones a fin de garantizar su viabilidad (tabla 11.1).

En esta especie, cuando las semillas presentan menos de 11 % de humedad, la extracción de los embriones es difícil puesto que se pueden causar daños mecánicos y por ende malformación o inhibición de la emergencia de alguna de las estructuras del embrión (plúmula, radícula y haustorio), e incluso la muerte de este último. Esta prueba es importante para los procesos de crioconservación, ya que se debe partir de semillas en buen estado de desarrollo fisiológico antes de almacenar los embriones en nitrógeno líquido.

Tabla 11.1. Promedio de humedad de las semillas de cuatro accesiones de palma americana (*E. oleifera*)

Accesión	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Humedad (%)
EM1606N	0,561	0,470	130	15	16,13
EM1409N	0,544	0,451	130	15	17,10
EM5105N	0,549	0,442	130	15	19,49
EM5007N	0,534	0,430	130	15	19,55

Fuente: Elaboración propia

Pruebas de viabilidad de los embriones cigóticos

La viabilidad de las semillas se determinó mediante la prueba de tetrazolium, que diferencia los tejidos vivos de los muertos con base en la actividad de enzimas deshidrogenasas (enzimas de la respiración). Al ser hidratadas las semillas, la actividad de las deshidrogenasas aumenta, lo que resulta en la liberación de iones hidrógeno, y esto reduce a la solución de tetrazolio 2, 3, 5- cloruro trifenil tetrazolio. La viabilidad de las semillas se determina en función del patrón de tinción del embrión y la intensidad de la coloración. Para realizar la prueba de viabilidad, se siguieron instrucciones de la Internacional Seed Testing Association (ISTA, 1992). Para las semillas de la especie *E. oleifera* se utilizó una concentración al 0,5 % de tetrazolium, con un tiempo de incubación de 24 horas en oscuridad y 28 °C. La viabilidad de los embriones se determinó mediante verificación de la actividad respiratoria de los tejidos vivos.

Fueron extraídos los embriones de diez semillas de cada una de las cuatro accesiones, para un total de 40, que se sumergieron en 20 mL de la solución de tetrazolium. Transcurrido el tiempo establecido, se eliminó la solución y

los embriones se dejaron en agua destilada desionizada, en condiciones de oscuridad hasta la lectura mediante un estereomicroscopio Wild® M3Z con objetivo ×10, según la escala de tinción generada para los embriones de las semillas de palma de aceite tipo Ténera (Dura × Pisífera) (tabla 11.2). Esta escala permite calificar el estado de viabilidad de los embriones de acuerdo con su coloración. Las coloraciones rojas indican que los embriones están vivos, las rosadas corresponden al inicio de pérdida de viabilidad y las blancas significan que los embriones perdieron su viabilidad y que técnicamente están muertos (ISTA, 1992; Villa et al., 2007).

Como variables se tuvieron las coloraciones que van desde el rojo-púrpura al rosado y blanco de cada una de las estructuras del embrión (plúmula, radícula y haustorio) (Bastidas et al., 2002). Los resultados se midieron según el número de embriones en cada uno de los grados de la escala. Los embriones ubicados en la escala (tabla 11.2) del 1 al 4 son viables, y los situados en los grados 5 a 8 tienen pérdida total o parcial de viabilidad y en condiciones convencionales no germinan.

La prueba de tetrazolio es complementaria a la determinación de humedad, por tanto, se realizó a las semillas de las cuatro accesiones de *E. oleifera*. Se encontró que los embriones estaban en un rango promedio de viabilidad de 50 a 70 %, y según la escala se ubicaron en los grados 1 a 4 (tabla 11.2), es decir, se clasifican embriones viables (Villa et al., 2007). Se debe tener en cuenta que mediante la prueba de germinación *in vitro* se estimó la viabilidad a nivel de plúmula y radícula, y que la primera tuvo un valor superior a 90 % y la segunda, por encima de 50 %. Por lo anterior, la prueba de viabilidad con tetrazolio solo puede emplearse como control inicial, a manera de estimación en laboratorio, y es muy diferente de la prueba de viabilidad de las semillas bajo condiciones naturales.

Según la escala indicada en la tabla 11.2, son viables todos los embriones ubicados en los grados 1 a 4. A partir del grado 5, se registra pérdida progresiva de viabilidad. Cuando la viabilidad se pierde a nivel de radícula, muy seguramente estos embriones no lograrán germinar bajo condiciones naturales, o si lo hacen, van a generar plántulas sin radícula, las cuales morirán poco tiempo después de la germinación.

Tabla 11.2. Escala de evaluación de la viabilidad de palma de aceite tipo Ténera (Dura × Pisífera)

Escala	Descripción
1	Plúmula, radícula y haustorio rojos
2	Plúmula y radícula rojas, haustorio rosado
3	Plúmula, radícula y haustorio rosados
4	Plúmula y radícula rojas, haustorio no se tiñó
5	Plúmula y radícula no se tiñieron, haustorio rojo
6	Plúmula y radícula no se tiñeron, haustorio rosado
7	Plúmula y radícula rosadas, haustorio no se tiñó
8	Plúmula, radícula y haustorio no se tiñeron

Fuente: Villa et al. (2007)

Existen pocos reportes relacionados con pruebas de viabilidad de la especie *E. oleifera*. Guerrero et al. (2011) emplearon la escala para determinar la viabilidad, y encontraron bajos niveles en los embriones del híbrido O × G, con un promedio de 40,2 %, estadísticamente similar al promedio de germinación obtenido bajo condiciones naturales, el cual estuvo en un rango de 35,9 a 40,4 %.

De acuerdo con los resultados obtenidos (tabla 11.3), existe una relación inversa entre el contenido de humedad y el porcentaje de viabilidad de los embriones de la palma *E. oleifera*. Por ejemplo, la accesión EM5007N presentó el mayor porcentaje de humedad (19,55 %) y el menor de viabilidad en sus embriones. Por su parte, la accesión EM1606N tuvo menor porcentaje de humedad (16,13 %) y la mayoría de los embriones fueron viables (70 %). Estos resultados indican que, a mayor humedad de las semillas, menor viabilidad de sus embriones y viceversa.

Tabla 11.3. Prueba de viabilidad (tetrazolium) de embriones cigóticos de cuatro accesiones de palma americana (*E. oleifera*)

Accesión	Escala de tinción	Porcentaje de viabilidad
EM1606N	1-4	70
EM1409N	1-4	60
EM5105N	1-4	60
EM5007N	1-4	50

Fuente: Elaboración propia

Germinación *in vitro* de embriones cigóticos de la palma americana de aceite

Durante el proceso de germinación fue necesario aplicar el protocolo de desinfección de semillas desarrollado por Villa et al. (2007), que consiste en lavar con agua destilada estéril y poner las almendras en una solución de Ridomil al 1,5 % por un periodo de 16 horas; luego, se realizan tres enjuagues con agua destilada estéril, se desinfectan con hipoclorito de sodio al 0,5 % + 5 gotas de Tween-20 y se ponen en esta solución por 15 min, y se lava tres veces con agua destilada estéril durante 10 min cada enjuague. Posteriormente, se procedió a realizar la extracción de los embriones en cámara de flujo laminar, con ayuda de un estereoscopio Wild® M3Z, pinzas y bisturí. Los embriones se pusieron en medio de cultivo Murashige y Skoog (1962) (MS) al 50 %, temperatura de 28 °C, con un fotoperiodo de 16 horas luz y ocho horas de oscuridad durante doce semanas, tiempo en el cual se realizaron las evaluaciones correspondientes, con base en un diseño experimental completamente al azar, con cuatro tratamientos (accesiones) y tres repeticiones de diez embriones cada una (unidad experimental de diez embriones). Las variables de respuesta fueron de tipo dicotómico, es decir, presencia/ausencia en términos de emergencia de plúmula, radícula y haustorio. También se realizó una prueba de la ji al cuadrado (X^2) para las proporciones de presencia y ausencia de las estructuras de cada una de las accesiones (Little & Hills, 1976; Steel & Torrie, 1985). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa SAS 9.0 (SAS Institute Inc., 2009).

Crioconservación de embriones cigóticos de la palma americana de aceite

Después de conocer la morfología y las condiciones fisiológicas de los embriones cigóticos, fue necesario ajustar la metodología, sobre todo en cuanto al tamaño de los embriones y el tiempo de desecación, antes de realizar las pruebas de crioconservación, para evaluar la viabilidad de los embriones bajo condiciones de crioconservación en nitrógeno líquido.

Para desarrollar la metodología de crioconservación, se tuvieron en cuenta los siguientes pasos, posteriores a la desinfección de las semillas: 1) rescate de embriones, 2) desecación de embriones desnudos en gel de sílice,

3) congelamiento y descongelamiento de embriones y 4) recuperación de embriones en medio de cultivo.

Rescate de embriones

Una vez las almendras se desinfectaron en cámara de flujo laminar, se procedió a extraer los embriones con ayuda de un estereomicroscopio Wild® M3Z de ×10, y un bisturí (más de 300 embriones por accesión); luego fueron seleccionados los de más de 2 mm de longitud, hasta completar 270 embriones por accesión, y estos se colocaron en cajas de Petri estériles, con papel filtro humedecido con agua destilada estéril (30 embriones por caja), y se dejaron durante 16 horas aproximadamente para su hidratación.

Desecación de los embriones desnudos en sílica gel

Después de la hidratación, los embriones (270 por accesión) se ubicaron sobre papel filtro estéril y se llevaron a frascos con sílica gel (20 g por frasco) para su desecación durante dos horas. Cumplido este tiempo, la mitad de los embriones secos (135 por accesión) se colocaron en medio de cultivo en cajas de Petri (quince por accesión), como testigos del proceso de secado, a fin de verificar la sobrevivencia del tejido al proceso de desecación de acuerdo con el tiempo de crioconservación. La otra mitad de los embriones se almacenó en criotubos (quince embriones por criotubo).

Congelamiento y descongelamiento

Los embriones almacenados en criotubos (quince por criotubo) se llevaron a inmersión directa en nitrógeno líquido a -196 °C durante 1, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 días (tratamientos con tiempo de crioconservación). El descongelamiento se llevó a cabo por inmersión de los criotubos en baño María a 37 °C durante tres minutos.

Recuperación en medio de cultivo

Los embriones descongelados, de acuerdo con los tratamientos con tiempo de crioconservación (quince por criotubo), se pusieron en un medio de cultivo MS al 50 % en tres cajas de Petri (cinco por cada caja) a 28 °C, con un

fotoperiodo de 16 horas luz y ocho horas de oscuridad. Para el monitoreo, se establecieron tres fechas de evaluación. La primera correspondió a la semana inicial para detectar contaminación, la segunda se hizo a las cuatro semanas para verificar la presencia/ausencia de estructuras, y cambio de medio de cultivo, y la tercera lectura se tomó a las doce semanas.

Las inferencias estadísticas para los procesos de congelación-descongelación y recuperación en medio de cultivo se llevaron a cabo con base en un diseño completamente al azar, con 36 tratamientos (combinación de cuatro accesiones por nueve tiempos de almacenamiento) y tres repeticiones de cinco embriones cada una (unidad experimental de cinco embriones). Los datos de secado fueron tomados como el tiempo 0 (cero días) para el análisis de X^2, y para la regresión logística de los tiempos establecidos de conservación en nitrógeno líquido de cada una de las accesiones. Las variables de respuesta fueron presencia o ausencia de las estructuras formadas (plúmula, radícula y haustorio). Los análisis se realizaron con el programa estadístico SAS 9.0 (SAS Institute Inc., 2009).

De acuerdo con la prueba de X^2, no se encontraron diferencias significativas entre accesiones para las variables presencia/ausencia de plúmula, radícula y haustorio (tabla 11.4). En general, la germinación de embriones en las cuatro accesiones de *E. oleifera* fue alta, en cuanto a la emergencia de sus estructuras. Las proporciones de formación de plúmula estuvieron entre 0,93 y 1; la formación del haustorio, entre 0,96 y 1, y la formación de radícula, entre 0,55 y 0,9. En las accesiones EM5105N y EM5007N, la proporción de emergencia de radícula fue similar, con 0,766 y 0,769 respectivamente (figura 11.1).

Tabla 11.4. Prueba de X^2 para la germinación de las cuatro accesiones de *E. oleifera* establecidas *in vitro*

Accesión	Plúmula	Radícula	Haustorio
EM1606N	1,045	5,9137	0,2544
EM1409N	0,0019	3,6838	0,2632
EM5105N	0,9084	0,0565	0,2632
EM5007N	0,0105	0,0632	2,6724

Nota: $P > X^2 < 0.05$
Fuente: Elaboración propia

Se encontró que las proporciones en la formación de radícula son menores para todas las accesiones, en comparación con la formación de plúmula y haustorio. En condiciones naturales, es común la germinación de plántulas sin radícula, las cuales son descartadas para siembra. Estos resultados se consideraron el punto de partida de los procesos de crioconservación, ya que aún es necesario perfeccionar la metodología (por ejemplo, la radícula presentó una germinación inferior a 90 %).

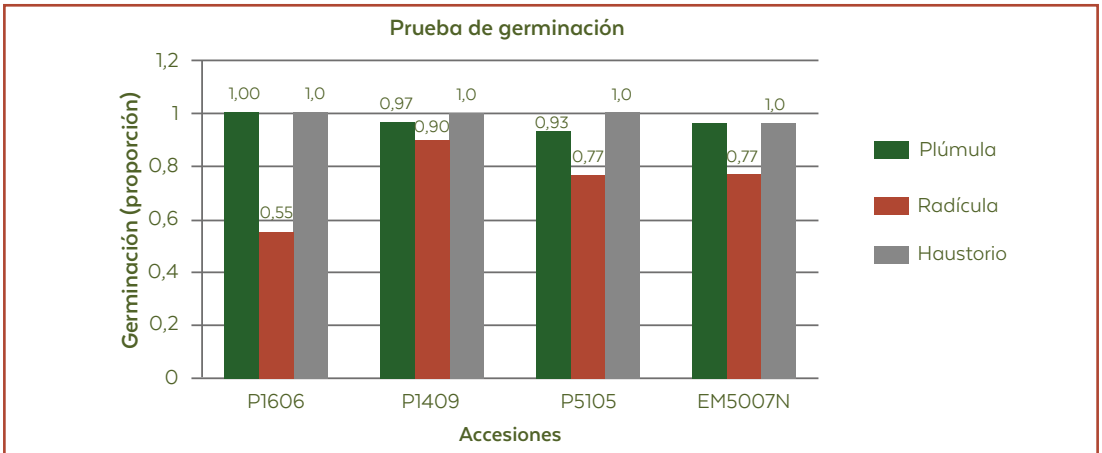


Figura 11.1. Proporción de germinación de las diferentes estructuras que componen el embrión en las cuatro accesiones de *E. oleifera.*

Fuente: Elaboración propia

Crioconservación de embriones cigóticos

Una vez obtenidos los resultados óptimos de humedad, viabilidad y germinación *in vitro,* se llevaron a cabo los estudios preliminares en cuanto a la selección de semillas, de acuerdo con el tamaño y estado de desarrollo del embrión para crioconservación. Primero se realizaron ajustes del protocolo establecido para *E. guineensis*, en razón a que los embriones de esta especie pueden llegar a medir hasta 5 mm; en cambio, los embriones de *E. oleifera* presentaron tamaños inferiores a 3 mm. Además, los embriones con menos de 2 mm de longitud no son aptos para empleo en crioconservación, porque aún no alcanzan la madurez necesaria para desarrollar o emitir cada una de las estructuras cuando son puestos en medio de cultivo. Se deja en claro que los embriones inmaduros no son una limitante para su germinación; pueden crioconservarse, pero deben recuperarse en un medio de cultivo

con concentración alta de sacarosa (fuente de carbono), para permitir que alcancen la madurez *in vitro* (Engelmann et al., 1995). Los embriones que se seleccionaron para el proceso de crioconservación presentaron un tamaño superior a 2 mm, y se desarrollaron cuando se pusieron en medio de cultivo; por tanto, a partir de estos se siguieron las etapas de desecación, congelamiento y descongelamiento.

Una vez rescatados los embriones, se pasó a la etapa de desecación en sílica gel, previa al congelamiento. En esta fase se estableció que dos horas era el tiempo óptimo de acuerdo con los ensayos preliminares, ya que fue el tiempo que menos afectó al haustorio y la emisión de la plúmula y la radícula.

Asimismo, este tiempo permitió recuperar aquellos embriones sometidos al procedimiento que a pesar de su capacidad de tolerar la desecación (para el caso de *E. oleifera*), alcanzaron a ver afectadas estructuras como la radícula y parte del haustorio. Dicha lesión hizo que en algunos casos solo se desarrollaran la plúmula y tres cuartas partes del haustorio (figura 11.2). Esta condición es irreversible porque inhibe completamente el desarrollo de la radícula; en algunos casos, puede llegar a emitirse, pero al desarrollarse no alcanzara la misma longitud que en un embrión no sometido a este procedimiento.



Figura 11.2. Embrión de cuatro semanas de la accesión EM5007N, crioconservado durante seis meses. Se observa la plúmula formada, el haustorio (izquierda) afectado en su extremo (tejido muerto de color blanco) aunque no en su totalidad, y sin formación de radícula (derecha).
Foto: Alba Villa

De acuerdo con los análisis de X^2, no se presentaron diferencias significativas a nivel de $P > 0,05$ en ninguna de las accesiones sometidas al proceso de secado en sílica gel. Se encontró que en todas las accesiones la radícula es similar a la del proceso de germinación, y que el desarrollo fue menor comparado con el de otras estructuras con una proporción de presencia de 0,90 a 1 (figura 11.3). La accesión EM5007N en germinación presentó una proporción de incidencia de 0,76 y en el proceso de secado fue de 0,70; así mismo, para la accesión P1606 en germinación, la proporción fue de 0,55 y para secado de 0,72. El aumento en este proceso puede deberse a que cada embrión se comporta como una unidad muestral independiente y a las pérdidas por contaminación o muerte del embrión (fisiológicamente viene en este estado de campo y al momento de la extracción no se puede diferenciar de un embrión vivo). La accesión P5105 tuvo una proporción de germinación de 0,76 y en secado de 0,77. Sin embargo, en el material P1409 la proporción de emisión de radícula en germinación fue de 0.9 y en secado de 0,78, lo que evidenció una disminución por el proceso de secado.

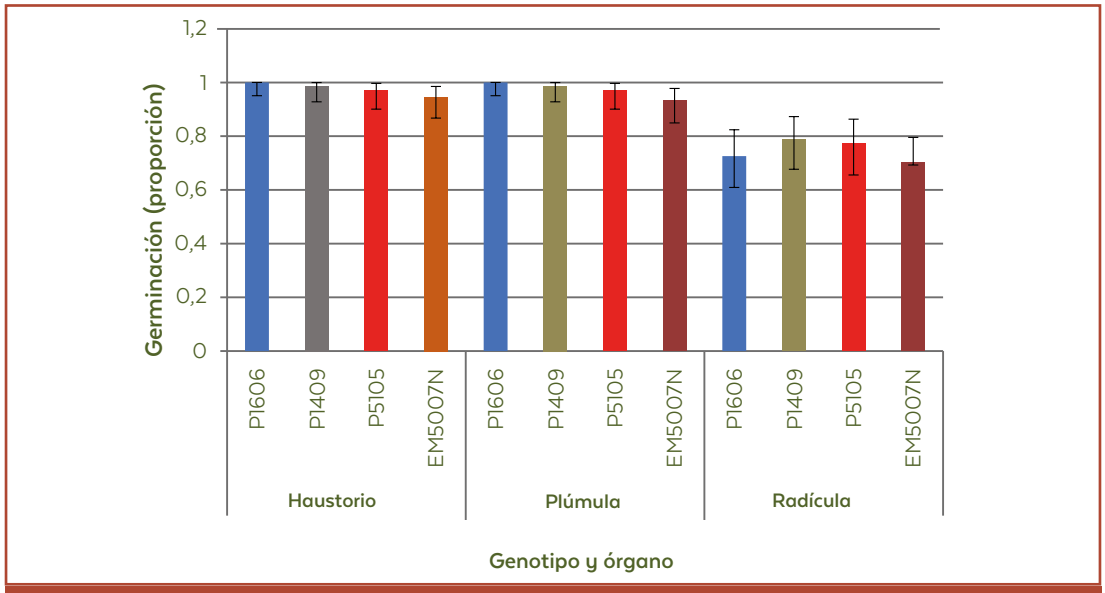


Figura 11.3. Proporción de germinación de las estructuras de los embriones de *E. oleifera* secados durante dos horas en gel de sílice.

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior indica que el proceso de secado de dos horas llevado a cabo en las accesiones EM5007N y P1409 posiblemente afectó la presencia de radícula, debido al tiempo de exposición a secado, y evidenció la susceptibilidad de estos materiales al secado en sílica gel. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que la humedad de la accesión EM5007N fue de 19,55 %, la más alta de las cuatro accesiones. Esto indica que el tiempo pudo haber sido insuficiente para extraer el mayor contenido de agua a nivel celular y que por tanto se presentó una disminución en la proporción de aparición de radícula.

Asimismo, la prueba de viabilidad para esta accesión fue de 50 %, lo que significa que es altamente susceptible a la pérdida de humedad por la categorización de la semilla como intermedia, afectando visiblemente la viabilidad de los embriones cigóticos. En términos generales, la accesión P1409, después del proceso de secado y frente a las otras accesiones, presentó la mayor proporción de aparición de radícula (0,78), dado que al inicio del proceso la humedad fue de 17,17 % y la viabilidad de 60 %.

De acuerdo con Engelmann et al. (1995), la desecación parcial de los embriones cigóticos es necesaria para que puedan sobrevivir a la crioconservación, cuando se compara con los controles no tratados. Asimismo, se reporta que algunas estructuras modifican su desarrollo, como en el caso del haustorio, cuya emisión se modifica en embriones de *Veitchia, Howea* y coco (en ensayos con palma de aceite se evidenció que los daños eran más severos). De otra parte, Aberlenc-Bertossi et al. (2003) afirman que los embriones de palma, durante su desarrollo en la planta, adquieren tolerancia a la desecación, lo cual fue similar a lo obtenido por Grout et. (1983) con embriones rescatados y desecados en cámara de flujo laminar.

El análisis X^2 comparó los resultados obtenidos de los embriones germinados *in vitro* (sin secado) con el material secado durante dos horas en sílica gel y se encontró que en ninguna de las accesiones evaluadas existen diferencias significativas en cuanto a $P > 0,05$ (tabla 11.5). Sin embargo, se evidencia una vez más que la proporción de germinación de la radícula es menor en todas las accesiones, sobre todo en P1606 sin secado (con solo 0,55) y en EM5007N después del secado (0,70) (las cuales presentaron un menor desarrollo), y esta proporción constituye así un indicativo del estado fisiológico inicial (figura 11.4). Sin embargo, la accesión P1606 evidenció una

mayor proporción de formación de radícula durante el proceso de secado, lo que puede deberse a la tolerancia de este material a la desecación, y esto se relaciona con el contenido de humedad inicial, que fue de 16,13 %.

Tabla 11.5. Prueba de X^2 para los embriones sin secado y con secado en sílica gel de las cuatro accesiones de *E. oleifera*

Accesión	Plúmula	Radícula	Haustorio
P1606	1	0,0896	1
P1409	0,4982	0,173	0,5251
P5105	0,373	0,9586	0,3497
EM5007N	0,5909	0,5157	0,7537

Nota: significativo al $p > 0,05$.
Fuente: Elaboración propia

De esta manera, se encontró que la respuesta del material cuando es sometido al proceso de secado no afecta el desarrollo de las estructuras que componen el embrión, en comparación con un material que no ha sido sometido al proceso de secado en sílica gel. Los efectos que puedan evidenciarse son resultado del comportamiento de cada accesión y del embrión cigótico como unidad muestral.

Lo anterior implica que el estado inicial del material es el punto de partida de todo el proceso, y determina que las semillas deban tener un estado fito-sanitario controlable por el protocolo de desinfección. Fisiológicamente, los embriones deben tener un estado de madurez completo, determinado por el tiempo establecido desde la polinización hasta la cosecha, y asimismo, las condiciones de manejo en laboratorio no pueden ser muy prolongadas, en razón a que las semillas pierden rápidamente la humedad y esto hace que el embrión se deshidrate, al punto que no pueda restablecerse y muera. Como lo mencionan Engelmann et al. (1995), en los procesos de crioconservación se deben considerar parámetros como la madurez y el estado fisiológico de los embriones antes de realizar los procedimientos de crioconservación y el restablecimiento en medio de cultivo.

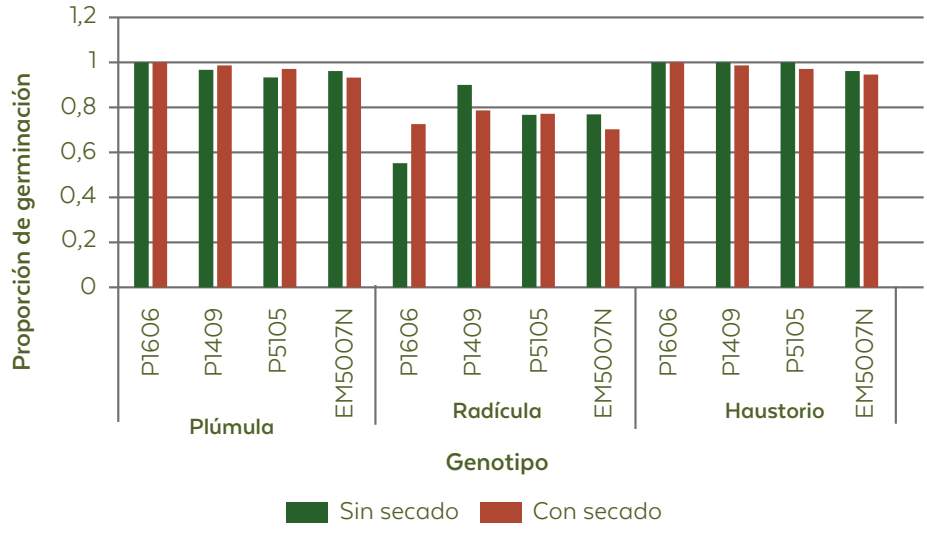


Figura 11.4. Comparación entre las proporciones de germinación de las estructuras plúmula, radícula y haustorio para los embriones sin secado (germinados) y con secado en sílica gel por dos horas.

Fuente: Elaboración propia

Recuperación en medio de cultivo de las accesiones crioconservadas

Se logró la recuperación de los embriones evaluados en los tiempos propuestos de 1, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 días, y el uso del medio de cultivo MS permitió a los embriones recuperarse gracias al aporte de nutrientes para el desarrollo, y también a las condiciones ambientales de luz y temperatura. Dado que los embriones se afectaron en la etapa de secado de forma directa a nivel de radícula y haustorio, representado en un lento crecimiento y/o inhibición de la formación de dichas estructuras, esta inhibición es una condición reversible o irreversible según el caso.

Por lo anterior, en el material descongelado se probó el medio de cultivo MS al 50 %, y a este se le adicionaron 5 mg/L de ácido indol acético (AIA) y 5 mg/L de ácido giberélico (AG_3). Este medio tuvo la misma respuesta que el medio convencional empleado en la recuperación, aunque favoreció una mayor elongación de la plúmula y la radícula en los casos en que no había lesiones, por lo cual se siguió usando el medio convencional debido a la obtención de los mismos resultados.

De otra parte, los embriones que germinaron y formaron plántulas pero que tuvieron desarrollo nulo de radícula y parcial del haustorio, presentaron una alta oxidación en estas estructuras (a las cuales se les removió el tejido oxidado y muerto) (figura 11.5), y se colocaron en el medio de cultivo fresco. No obstante, en la mayoría de casos la radícula no se logró restablecer. De acuerdo con Engelmann et al. (1995), los daños ocasionados en el proceso de desecación pueden ser irreversibles y las estructuras lesionadas jamás podrán recuperarse en el medio de cultivo.

En vista de lo anterior, el análisis de X^2 aplicado a las accesiones criocon-servadas solo mostró diferencias significativas a nivel de $p > X^2 < 0{,}05$ para la accesión EM5007N en cuanto a emisión de plúmula (0,0002) y haustorio (0,0142). Como este material presentó diferencias significativas, se llevó a cabo una prueba de bondad de ajuste en la que se compararon los valores reales con los ajustados por el modelo, y no se encontró una diferencia significativa entre los valores observados y los estimados.



Figura 11.5. Plántula solo con plúmula sin desarrollo de radícula y haustorio, en la que se evidencia alta oxidación.
Foto: Alba Villa

La regresión logística de las accesiones crioconservadas para la variable plúmula evidenció una tendencia constante en el comportamiento de la probabilidad de germinación de la estructura para las accesiones P1606 (0,98, la más alta), P1409 (0,97) y P5105 (0,92). Esta tendencia se mantuvo a lo largo del tiempo (figura 11.6) y posiblemente obedezca a la condición fisiológica (tolerancia a la desecación) de cada accesión. Así lo indican los resultados obtenidos en los procesos de germinación y secado de los embriones, en los que la accesión P1606 presentó una mayor tolerancia a la desecación, reflejada en un menor porcentaje de humedad (16,13 %), un mayor porcentaje de germinación y tolerancia al secado en sílica gel y en un 100 % de germinación a nivel de plúmula, que se mantuvo en condiciones de crioconservación. En la accesión EM5007N, la tendencia de esta estructura (plúmula) fue decreciente, ya que registró una probabilidad de 0,94 en el tiempo 0 y de 0,75 a los 240 días. Esto indica que al aumentar el tiempo de almacenamiento, la probabilidad de germinación de la plúmula disminuye, lo que evidencia la alta susceptibilidad de este material a la crioconservación y lo cataloga como de baja respuesta a la metodología de crioconservación para la variable plúmula.

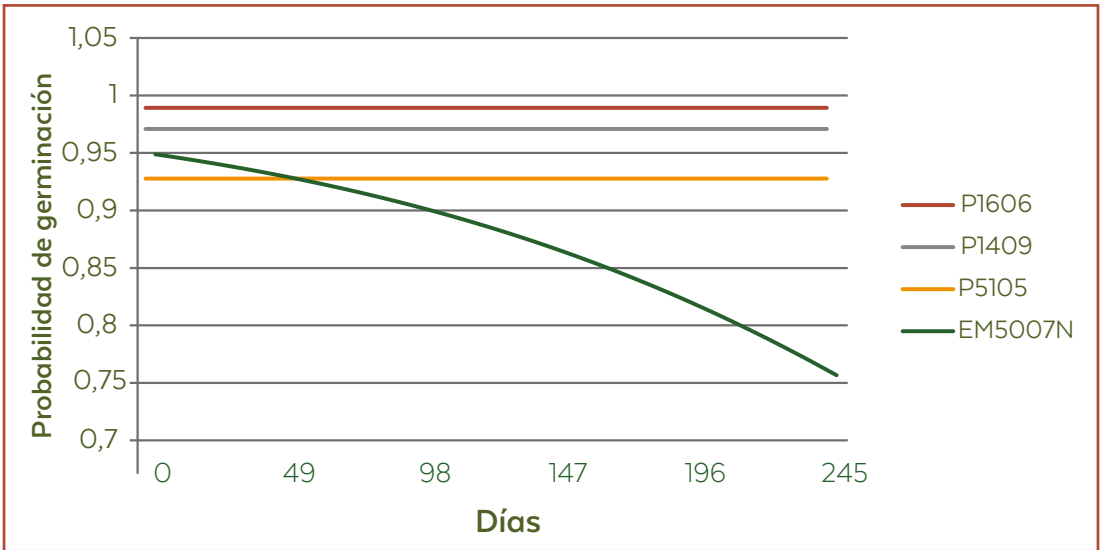


Figura 11.6. Probabilidad de formación de plúmula en embriones de cuatro accesiones de *E. oleifera* en función del tiempo de almacenamiento en nitrógeno líquido.

Fuente: Elaboración propia

Complementario a estos resultados, el comportamiento biológico obtenido con las proporciones de germinación de la plúmula de las accesiones (figura 11.7) refleja leves diferencias en sus respuestas a lo largo del tiempo. Por ejemplo, es posible que la germinación de la plúmula baje en un tiempo evaluado y que después la estructura recupere su viabilidad, debido a que cada embrión cigótico puede reflejar un comportamiento independiente. La accesión EM5007N mostró este comportamiento, ya que a los 180 días su proporción de germinación fue de 0,52, a los 210 días se recuperó y fue de 0,96, y a los 240 días bajó a 0,84 (figura 11.7). Esto muestra una fluctuación que es normal por la naturaleza de los embriones cigóticos, que forma parte del comportamiento de la población en estudio y que estadísticamente se refleja en diferencias significativas, aunque la prueba de bondad determinó que la diferencia entre valores observados y estimados no es relevante. Asimismo, la accesión P1606 presentó menos fluctuaciones a lo largo del tiempo, de 0,96 a 1, por lo cual fue más constante su comportamiento en cada uno de los tiempos evaluados (figura 11.7).

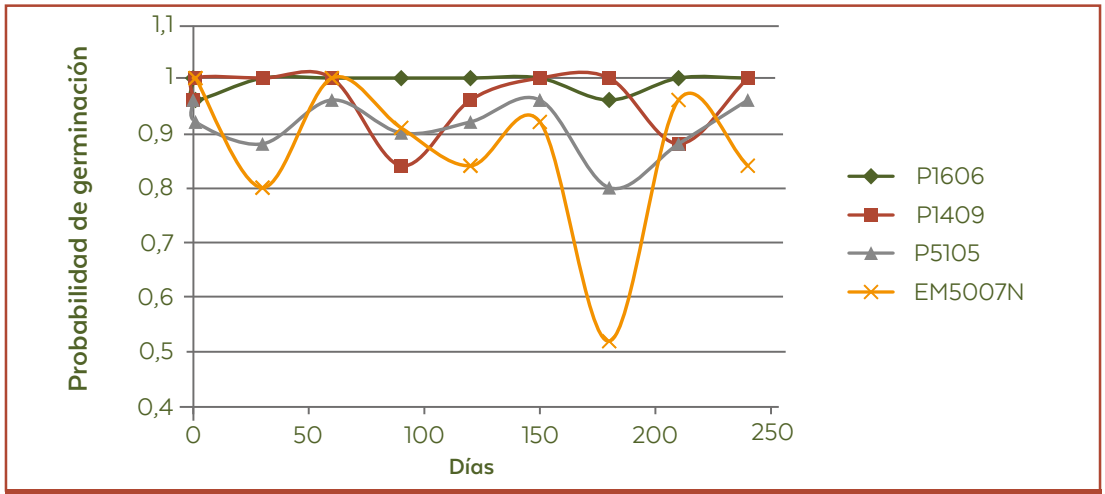


Figura 11.7. Proporción de germinación de plúmula en las cuatro accesiones de *E. oleifera* crioconservadas a lo largo del tiempo (días).

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la respuesta de las cuatro accesiones a la formación de radícula, la prueba de X^2 no arrojó diferencias significativas en torno a $p > 0,05$. Cabe resaltar, no obstante, que en todas las accesiones la respuesta de esta estructura es menor que la de plúmula y haustorio.

Según la regresión logística, la probabilidad de formación de radícula en los embriones de las cuatro accesiones tiene una tendencia constante durante el tiempo de evaluación. La accesión con mejor respuesta de germinación de radícula fue P1409 (0,84), y la de menor respuesta, EM5007N (0,72) (figura 11.8). Las proporciones de crioconservación de esta última accesión se movieron en un rango de mínimo 0,6087 y de máximo 0.8182 durante los diferentes tiempos evaluados de almacenamiento. En esta accesión, se compararon las proporciones de germinación (0,76) y secado (0,70) con las obtenidas en crioconservación (en donde la mayoría de los tiempos fueron cercanos a 0,60). Al relacionar esto con el contenido de humedad inicial de la accesión, que fue de 19,55 %, se puede inferir que el tiempo de secado fue insuficiente para remover la cantidad de agua que requería para someterse al proceso de crioconservación.

Un factor que puede incidir notablemente en la germinación de la radícula es su posición en el embrión con respecto a la semilla. La radícula está próxima al poro germinativo, el cual está recubierto con un tapón de fibra que permite la salida de humedad de la semilla (deshidratación) y por lo tanto cualquier cambio ambiental (en temperatura y humedad) puede afectar la estructura. El hecho de que la semilla sea susceptible a la pérdida de humedad, y por ende se catalogue como intermedia, explicaría por qué, al poner a germinar los embriones sin someterlos a ningún procedimiento (secado o crioconservación), la radícula de las cuatro accesiones se ve afectada y tenga un nivel de germinación más bajo en comparación con la plúmula y el haustorio.

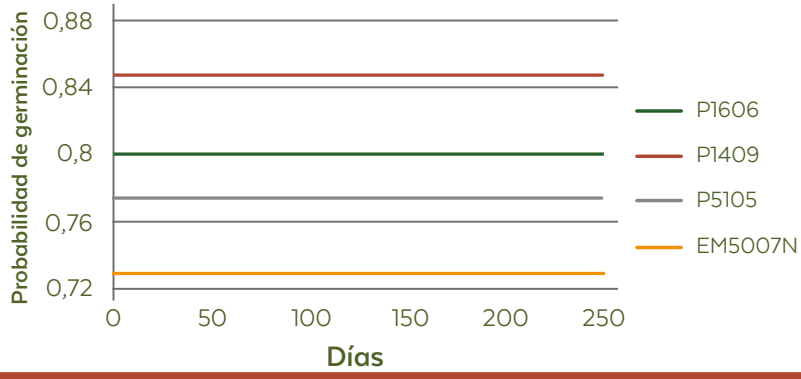


Figura 11.8. Probabilidad de formación de radícula en embriones de cuatro accesiones de *E. oleifera* en función del tiempo de almacenamiento en nitrógeno líquido.

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento biológico de la radícula lo determina la proporción de germinación. La accesión P5105 presentó fluctuaciones a lo largo del tiempo de evaluación, con una baja respuesta (0,44) a los 210 días y una recuperación (0,6) a los 240. La accesión que presentó la mejor respuesta fue la accesión P1606, con proporciones que fluctuaron entre 0,72 y 0,94. La fluctuación experimentada por la radícula quizás obedezca, en primera instancia, a la condición fisiológica que tienen los materiales cuando llegan de campo, evidenciada en la prueba de germinación. Asimismo, dado que al someter el material al proceso de secado no se encuentran diferencias significativas entre accesiones, podría pensarse que los contenidos de humedad de los embriones son diferentes en cada accesión y al interior de cada una, ya que cada embrión es capaz de manifestar un comportamiento independiente (figura 11.9).



Figura 11.9. Proporción de germinación de radícula en las cuatro accesiones de *E. oleifera* crioconservadas a lo largo del tiempo (días).

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la presencia del haustorio, los análisis con la prueba de X^2 en las accesiones P1606, P1409 y P5105 no arrojaron diferencias significativas en torno a $p > X^2 < 0,05$. La probabilidad de germinación del haustorio fue superior a 0,95, aunque en la accesión EM5007N se presentaron diferencias significativas, de 0,0142, con respecto a $p > X^2 < 0,05$. Por lo tanto, fue necesario llevar a cabo una prueba de bondad de ajuste, similar a la que se realizó con esta misma accesión a nivel de plúmula, la cual mostró que la

probabilidad según el modelo sí presentó ajuste, ya que la diferencia entre los valores observados y los estimados no fue significativa.

La tendencia de la regresión logística determinó que el comportamiento de las accesiones P1606, P1409 y P5105 se mantiene constante a lo largo del tiempo, y que en todos los materiales los valores de la probabilidad de germinación son superiores a 0,95. Solo se evidenció que la accesión EM5007N no se mantiene constante ya que la emergencia del haustorio disminuye a lo largo del tiempo (figura 11.10).

La probabilidad en esta accesión indica que la germinación del haustorio se reduce conforme aumenta el tiempo de almacenamiento y que el material tiene alta susceptibilidad en cuanto a formación de esta estructura (figura 11.10), dado que fluctuó entre 0,95 (dato inicial en el punto 0) y 0,76 (a los 240 días). Esto, a su vez, evidencia la alta susceptibilidad de la accesión al proceso de crioconservación, ya que al relacionar las proporciones obtenidas en germinación (0,96) y secado (0,94) con las de crioconservación se observa una baja en la respuesta de la formación del haustorio, con 0,68 a los 180 días. Las diferencias significativas presentadas en esta estructura reafirman el comportamiento de la accesión.

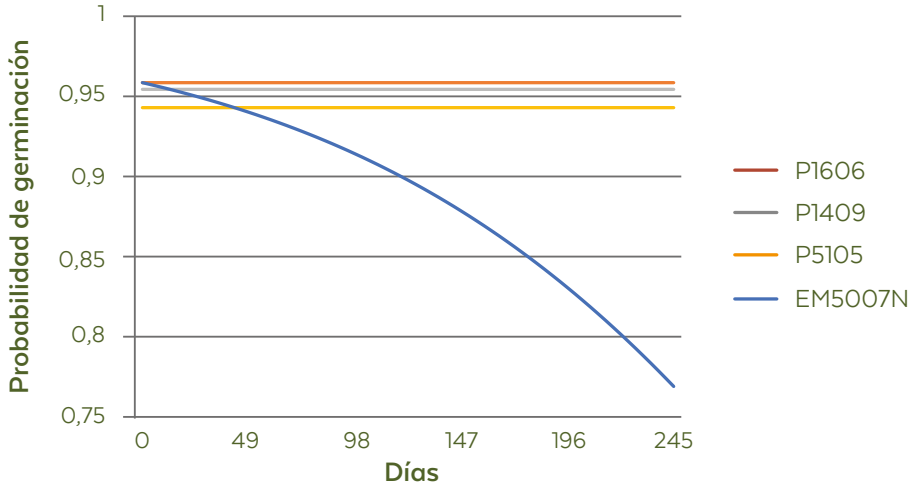


Figura 11.10. Probabilidad de formación de haustorio en embriones de cuatro accesiones de *E. oleifera* en función del tiempo de almacenamiento en nitrógeno líquido.

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, desde el punto de vista biológico el haustorio se afectó en una baja proporción, lo que corrobora la susceptibilidad de esta estructura, dado que está desprovista de protección porque los embriones cigóticos empleados en esta metodología se extrajeron de la semilla. El estudio mostró que el haustorio se vio afectado en una porción del extremo en todas las accesiones, aunque su desarrollo no se inhibió totalmente en la etapa de recuperación en medio de cultivo después de que los embriones cigóticos se crioconservaron (figura 11.11).

Julcéia et al. (2009) lograron recuperar los embriones de las semillas de *E. guineensis* que habían sido almacenadas en nitrógeno líquido durante siete días. Encontraron que la crioconservación no había afectado el desarrollo de ninguna de las estructuras que componen el embrión de las accesiones evaluadas gracias a la protección que brindan las coberturas de la semilla. En cuanto al estudio del embrión desnudo, este quedó expuesto a daño mecánico por manipulación durante el proceso de secado y/o crioconservación (pre- y poscongelación). Sin embargo, una de las ventajas de esta metodología es que con ella se seleccionan los embriones antes de que se almacenen para que cumplan los parámetros mínimos de tamaño y fisiológicamente estén en buen estado. Esto evita trabajar con semillas vanas (sin embrión) o contaminadas y garantiza que, al rescatar los embriones, se pueda seleccionar el material antes de someterlo a las pruebas de crioconservación.

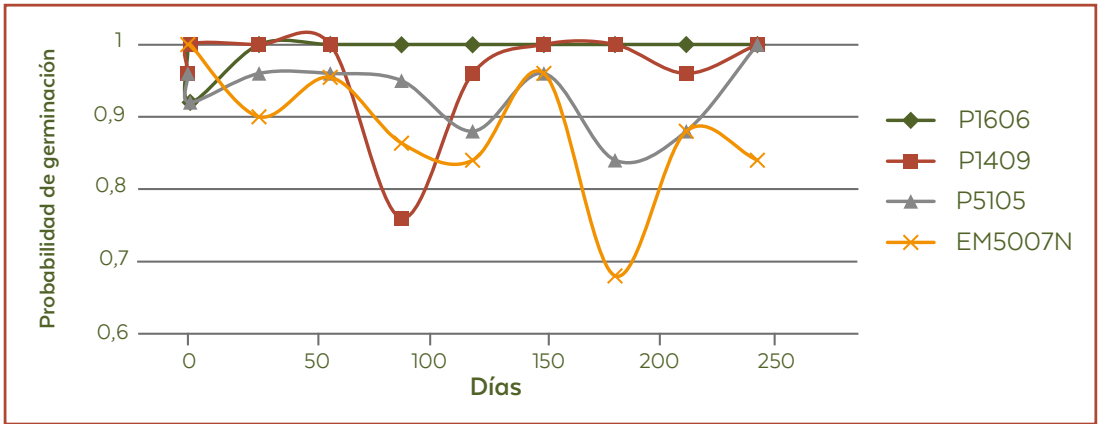


Figura 11.11. Proporción de germinación de haustorio en las cuatro accesiones de *E. oleifera* crioconservadas a lo largo del tiempo (días).

Fuente: Elaboración propia

La accesión con mayor fluctuación en la respuesta a la germinación del haustorio fue la EM5007N. Su proporción fue de 1 en el tiempo 0, de 0,68 a los 180 días y de 0,88 a los 210, con una leve disminución a los 240 (0,84) (figura 11.11). No obstante, todas las accesiones presentaron fluctuación durante el tiempo de almacenamiento.

El desarrollo de un embrión cigótico y su germinación pueden ser heterogéneos (figura 11.12). La accesión EM5007N presentó baja respuesta en la formación de plúmula y haustorio; P1409 y P5105 tuvieron mediana respuesta, y P1606 registró alta respuesta. Gracias al estudio, se estableció que cada accesión puede tener una respuesta diferente de comportamiento, pero que es necesario adelantar análisis con un mayor número de accesiones de *E. oleifera* para determinar si efectivamente existen materiales de alta, mediana y baja respuesta.

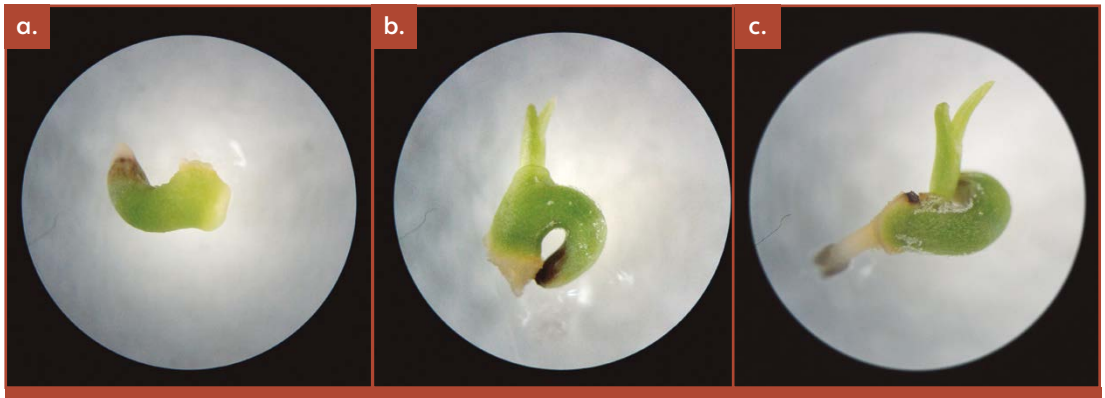


Figura 11.12. Desarrollo heterogéneo de los embriones crioconservados en nitrógeno líquido.
a. Embrión con poco desarrollo: sin radícula ni plúmula definida y con el haustorio afectado;
b. Embrión de menor crecimiento con el haustorio afectado en su extremo derecho;
c. Embrión con todas sus estructuras (plúmula, radícula y haustorio) con un buen desarrollo.
Fotos: Alba Villa

Aplicación de la crioconservación de embriones cigóticos de la palma americana y de sus híbridos en la palma africana de aceite

Como se indicó anteriormente, se llevó a cabo esta investigación sobre criopreservación de embriones de palma americana de aceite o nolí (*E. oleifera*), y en ella se incluyeron embriones de los híbridos *E. oleifera* × *E. guineensis* (O × G), a fin de evaluar la aplicabilidad de la tecnología en la multiplicación de materiales de siembra.

El protocolo de germinación in *vitro* de los embriones (figura 11.13) se elaboró inicialmente en el Laboratorio de Cultivo de Tejidos del Banco de Germoplasma C. I. Tibaitatá. Los embriones fueron extraídos de semillas de diferentes especies y se sometieron a criopresevación en nitrógeno líquido a -196 °C, durante periodos de 10, 20, 30 y 40 meses. Posteriormente, los embriones se descongelaron y se sometieron a germinación *in vitro* con el medio de cultivo MS, y se obtuvieron las plantas, a las cuales se les realizó el proceso de endurecimiento y adaptación (figura 11.14). En el C. I. El Mira, se establecieron y manejaron las plantas en etapas de previvero y vivero, y posteriormente se establecieron y se les hizo mantenimiento en campo (figura 11.15). En las etapas de vivero, establecimiento y juvenil de campo, se elaboraron los registros de variables biométricas de crecimiento (Bastidas & Hurtado, 1993; Corpoica & MADR, 2017a, 2017b, 2017c).

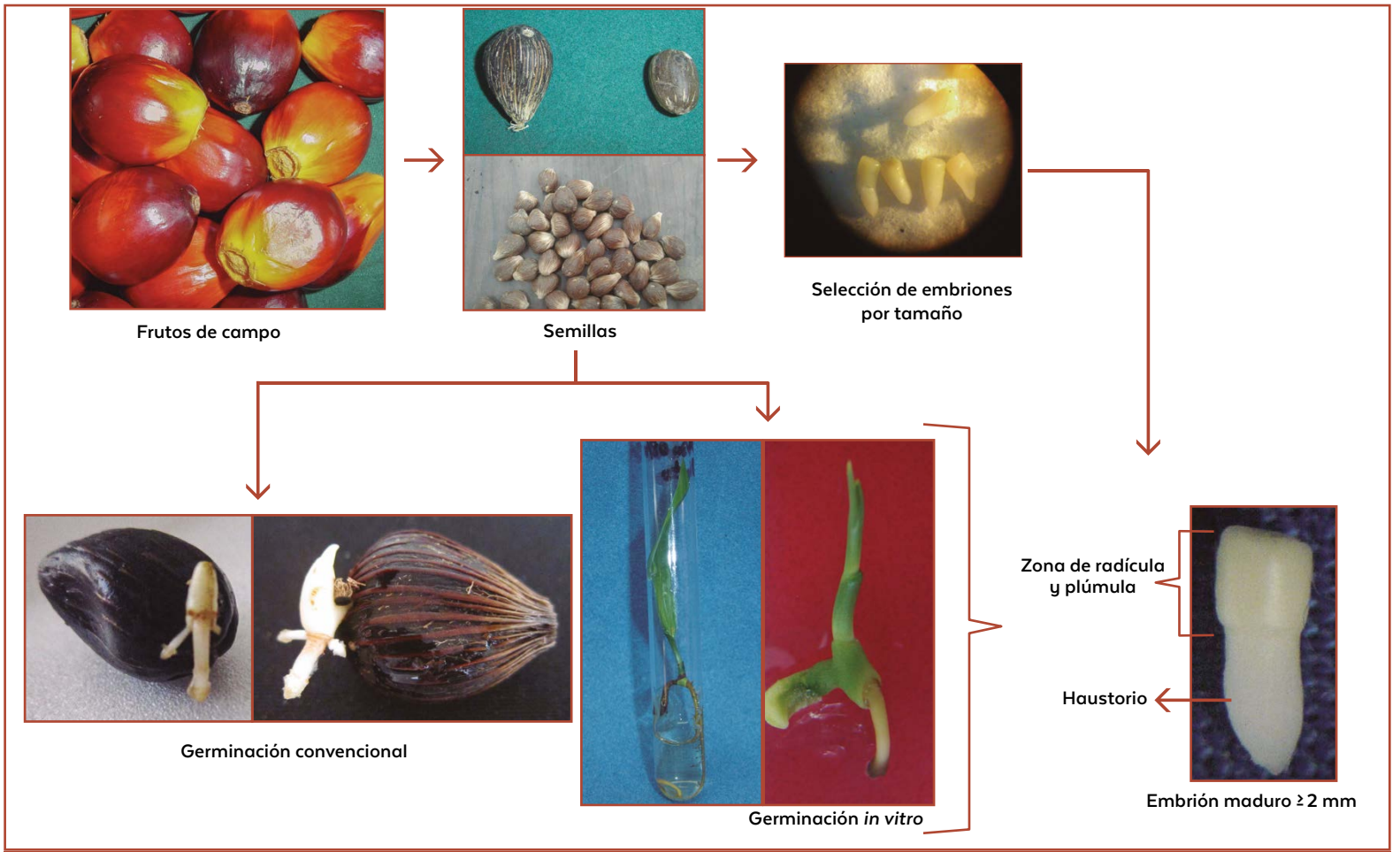


Figura 11.13. Esquema del protocolo para rescate de embriones, germinación *in vitro* y formación de plantas de *E. oleifera* e híbridos *E. oleifera* × *Elaeis guineensis*.

Fotos: Alba Villa

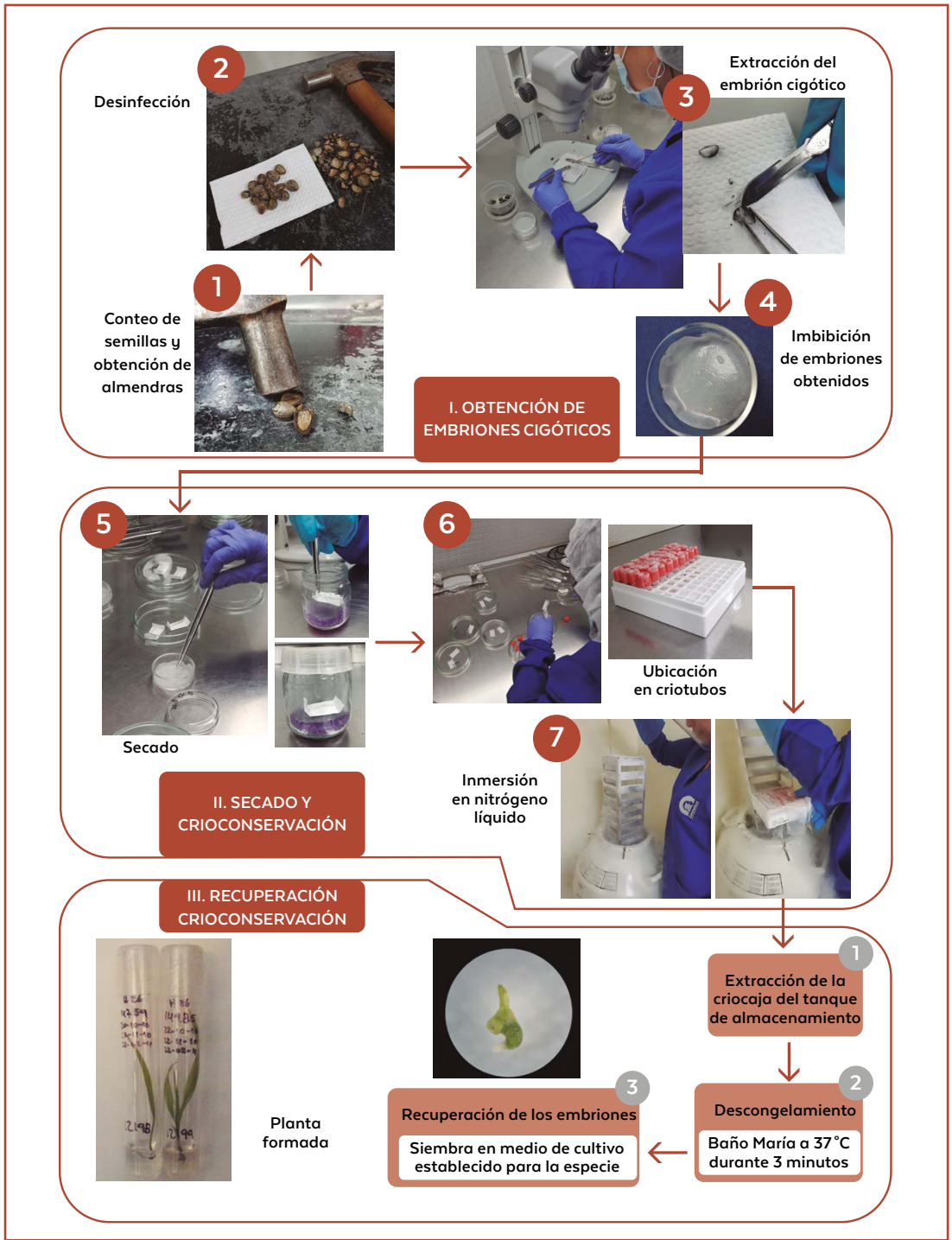


Figura 11.14. Esquema del protocolo para criopresevación en nitrógeno líquido, rescate de embriones, germinación *in vitro* y formación de plantas de *E. oleifera* e híbridos *E. oleifera* × *E. guineensis*.

Fotos: Alba Villa



Figura 11.15. Proceso de endurecimiento y adaptación, manejo en previvero y vivero, establecimiento y mantenimiento en campo de plantas del híbrido *E. oleifera* × *E. guineensis*, obtenidas mediante criopresevación en nitrógeno líquido, rescate y germinación *in vitro* de embriones, y formación de plantas (C. I. El Mira, Tumaco). a. Casa de malla; b. Adaptación en cubículos; c. Establecimiento y mantenimiento en campo; d. Planta normal en producción.

Fotos: Alba Villa

El propósito del establecimiento de parcelas de observación del desarrollo de las plantas en fases de previvero, vivero y campo permitió:

- Verificar viabilidad de las técnicas desarrolladas para criopreservar embriones en nitrógeno líquido y obtener a partir de ellos plántulas completas mediante germinación *in vitro,* con el propósito de formar materiales nolí (*E. oleifera*) e híbridos O × G (*E. oleifera* × *E. guineensis*).

- Verificar ausencia de anormalidades en plantas de vivero y durante la primera fase de la etapa de establecimiento en campo, de materiales nolí y O × G obtenidos mediante las técnicas de criopreservación de embriones y su germinación *in vitro*.
- Verificar que la técnica de criopreservación de embriones de semillas de materiales nolí e híbridos O × G amplíe el periodo de almacenamiento de sus embriones viables, en comparación con el periodo de almacenamiento de semillas con embriones viables mediante el método convencional.
- Generar conocimiento a fin de elaborar un protocolo para la criopreservación de embriones y la obtención de plántulas completas mediante germinación *in vitro,* de materiales nolí e híbridos O × G.
- Solucionar el problema de la baja germinación de semillas en cultivares O × G F1, el cual limita la disponibilidad de semilla germinada para siembra. Entre tanto, convertir los materiales *E. oleifera* en una herramienta útil para beneficiar a productores de semillas, por medio de la conservación de su germoplasma.

Conclusiones

La germinación de las diferentes estructuras que componen el embrión de la palma americana de aceite estuvo determinada por la capacidad de este último de desarrollarse en el medio de cultivo. Los embriones lograron diferenciar la plúmula, la radícula y el haustorio en cada una de las accesiones sin necesidad de adicionar hormonas al medio de cultivo. Además, se evidenció que el crecimiento de las estructuras germinadas de los materiales secados y crioconservados disminuye si se compara biológicamente con material no sometido a ningún proceso, aunque estadísticamente no se encontraron diferencias significativas.

Se encontró que la accesión EM5007N disminuye el desarrollo de la plúmula y el haustorio con un mayor tiempo de almacenamiento. Esta accesión registró mayor humedad que las otras y el resultado de su prueba de viabilidad con tetrazolio fue de 50 %. Lo anterior indica que la relación entre alto contenido de humedad, susceptibilidad al proceso de secado y condiciones fisiológicas iniciales afecta la formación del embrión en condiciones *in vitro* después de un proceso de crioconservación.

Los embriones crioconservados de las accesiones P1606, P1409 y P5105 presentaron una probabilidad de viabilidad constante a lo largo del tiempo, que se traduce en la capacidad de desarrollar estructuras tales como plúmula, haustorio y radícula, aunque en esta última la probabilidad de germinación es menor dada su poca capacidad de desarrollo al momento de llegar a campo.

La accesión P1606 tuvo la mayor probabilidad de formación de plúmula y haustorio. Esta probabilidad fue superior a 0,95 en la primera estructura y cercana a 0,80 en el haustorio, y se mantuvo constante en el tiempo. En esto debe tenerse en cuenta que el material presentó el menor porcentaje de humedad (16,3 %) y que la prueba de viabilidad con sal de tetrazolio arrojó un resultado de 70 %, lo que equivale a una alta respuesta al protocolo de crioconservación.

En cuanto a la formación de plúmula, radícula y haustorio, se pudo establecer que *E. oleifera* cuenta con accesiones de alta (P1606), mediana (P1409 y P5105) y baja respuesta (EM50007N). Esto constituye una categorización de la capacidad de formar las estructuras y del estado fisiológico de la semilla (embrión cigótico).

Los siguientes son los logros obtenidos en lo concerniente a la criopreservación y la producción de material de siembra:

- Se verificó como viable la técnica para criopreservación de embriones en nitrógeno líquido y para obtención de plántulas completas de materiales nolí (*E. oleifera*) e híbridos O × G (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*), mediante germinación *in vitro* de los embriones cuando son criopreservados durante 10, 20, 30 y 40 meses.
- La técnica para criopreservación de embriones de palma de aceite (durante 10 y 20 meses) y para obtención de plántulas mediante germinación *in vitro* de esos embriones, permitió obtener plantas de los materiales nolí y O × G con crecimiento normal en vivero y sin anormalidades en la primera fase del establecimiento en campo. Lo anterior indica que es viable la técnica para conservar embriones y producir materiales de siembra normales de nolí e híbridos O × G.

- Es posible ampliar el periodo de almacenamiento de embriones de semillas nolí e híbridos O × G mediante la técnica de criopreservación en nitrógeno líquido con respecto al periodo de almacenamiento de semillas con embriones viables del método convencional, en el cual son viables hasta por cinco meses bajo las condiciones de Tumaco. Pasado ese tiempo, los embriones reducen drásticamente su germinación, debido a la disminución de la humedad de las semillas, lo que deteriora el embrión y aminora la viabilidad.
- La criopreservación puede ser una opción para almacenamiento de embriones de semillas cosechadas. La técnica mantiene los embriones disponibles para una eventual solicitud de plántulas de previvero y conserva la viabilidad del material durante largos periodos de tiempo, con lo cual se evitan pérdidas de producción de semillas. En la actualidad no se cuenta con un sistema controlado de almacenamiento de semillas y estas pierden rápidamente su viabilidad si no existen condiciones óptimas de acopio.
- La germinación *in vitro* con rescate de embriones permite aumentar la germinación de híbridos O × G en comparación con la germinación convencional. A lo anterior se suma que en condiciones de campo estos materiales se comportan igual que el material germinado de forma convencional, tal como se está corroborando en la actualidad.
- Se recogió información dirigida a elaborar un protocolo para criopreservar embriones en nitrógeno líquido y obtener plántulas completas mediante germinación *in vitro* de estos embriones, tanto de materiales nolí (*E. oleifera*) como de híbridos O × G (*E. oleifera* × *E. guineensis*) de palmas de aceite.

Referencias

Aberlenc-Bertossi, F., Chabrillange, N., Corbineau, F., & Duval, Y. (2003). Acdquisition of desiccation tolerance in developing oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) embryos *in planta* and *in vitro* in relation to sugar content. *Seed Science Research, 13*(2), 179-186. https://doi.org/10.1079/SSR2003135

Assy-Bah, B. (1992). *Utilization de la culture* in vitro *d´embryons zygotiques pour la collecte et la conservation des resources genétiques du* cocotier (Cocos nucifera *L.*) [Thése] Unversité Paris 6.

Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., & Casas, H. (2002). *Recomendaciones generales para el manejo de semilla germinada y viveros de palma de aceite (*Elaeis guineensis *Jacq.).* [Programa Regional Agrícola 5, Boletín divulgativo 12]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1193/41508_41469.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica] & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2017a). *Macroproyecto 133 "Generación de bases tecnológicas para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles y competitivos en palmáceas de interés económico: marzo/2013-diciembre/2017* [Informe técnico final]*".*

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica] & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2017b). *Meta 3114 "Viabilidad evaluada de embriones de* E. oleifera *e híbrido O × G criopreservados durante 6 a 30 meses* [Informe final de meta]*", producto o proyecto 680 "Desarrollo de la técnica de criopresevación de embriones para materiales de palma de aceite* Elaeis oleifera *e híbridos* Elaeis oleifera × Elaeis guineensis *en condiciones de Colombia: marzo/2013-diciembre/2017", macroproyecto 133 "Generación de bases tecnológicas para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles y competitivos en palmáceas de interés económico: marzo/2013-diciembre/2017".*

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica] & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2017c). *Meta 3118 "Caracterización fenotípica de variables biométricas en etapa de establecimiento en campo de los híbridos O × G F1 obtenidos por germinación* in vitro *de sus embriones* [Informe final de meta]*", producto o proyecto 680 "Desarrollo de la técnica de criopresevación de embriones para materiales de palma de aceite* Elaeis oleifera *e híbridos* Elaeis oleifera × Elaeis guineensis *en condiciones de Colombia: marzo/2013-diciembre/2017", macroproyecto 133 "Generación de bases tecnológicas para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles y competitivos en palmáceas de interés económico: marzo/2013-diciembre/2017".*

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica] & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2017d). *Meta 3119 "Estructura de costos de producción de plántulas F1 O × G obtenidas a partir de embriones criopreservados y germinados* in vitro [Informe final de meta]*", producto o proyecto 680 "Desarrollo de la técnica de criopresevación de embriones para materiales de palma de aceite* Elaeis oleifera *e híbridos* Elaeis oleifera × Elaeis guineensis *en condiciones de Colombia", macroproyecto 133 "Generación de bases tecnológicas para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles y competitivos en palmáceas de interés económico: marzo/2013-diciembre/2017".*

Dumet, D., Engelmann, F., Chabrillange, N., & Duval, Y. (1993). Cryopreservation of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) somatic embryos involving a desiccation step. *Plant Cell Reports, 12*, 352-355. https://doi.org/10.1007/BF00237434

Ellis, R. H., Hong, T. D., & Roberts, E. H. (1991). Effect of storage temperature and moisture on the germination of papaya seeds. *Seed Science Research, 1*(1), 69-72. https://doi.org/10.1017/S0960258500000659

Engelmann, F., Dumet, D., Chabrillange, N., Abdelnour-Esquivel, A., Assy-Bah, B., Dereuddre, J., & Duval, Y. (1995). Factors affecting the cryopreservation of coffee, coconut and oil palm embryos. *Plant Genetic Resources Newsletter, 103*, 27-31.

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [Fedepalma]. (2019). *Anuario estadístico 2019: principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia 2014-2018*. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1452/La%20agroindustria%20de%20la%20palma%20de%20aceite%20en%20Colombia%20y%20en%20el%20mundo

Grout, B. W. W., Shelthon, K., & Pritchard, H. W. (1983). Orthodox behavior of oil palm seed and cryopreservation or excised embryo for genetic conservation. *Annals of Botany, 53*, 381-384. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086586

Guerrero, J., Bastidas, S., & García, L. (2011). Estandarización de una metodología para germinar semillas del híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* H. B. K. × *Elaeis guineensis* J. *Revista de Ciencias Agrícolas, 28*(1), 132-146.

International Seed Testing Association (ISTA). (1992). *Regras para análise de sementes*.

Julcéia, C., Zanderluce, L., & Scherwinski-Pereira, J. E. (2009). Tolêrance de sementes de dendezeiro à criopreservação: notas científicas. *Pesquisa Agropecuaria, 44*(2). https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000200015

Little, T. M., & Hills, F. J. (1976). *Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura*. Editorial Trillas.

Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays whit tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum, 15*(3), 473-497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

SAS Institute Inc. (2009). Statistical Analysis System, North Caroline, USA, v.9.2. https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=590544

Seed Science and Technology [SST]. (1993). *International rules for seed testing* (Vol. 21).

Smith, N. (2015). *Elaeis oleifera.* En *Palms and people in the amazon* (pp. 225-234). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05509-1_32

Steel, R. G., & Torrie, J. H. (1985). *Bioestadística: principios y procedimientos.* McGraw-Hill.

Villa, A. L., Jiménez, P. E., Valbuena, R. I., Bastidas, S., & Núñez, V. M. (2007). Estudio preliminar para el establecimiento de un protocolo de crioconservación para palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Agronomía Colombiana, 25*(2), 215-223. https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/14124

Villa, A. L., & Sánchez, A. M. (2003). *Evaluación de las metodologías de la crioconservación de una accesión de* Solanum phureja [Tesis de pregrado]. Universidad del Tolima, Ibagué.



Terminó de diseñarse
en noviembre de 2023,
Bogotá, D. C., Colombia



En 1957, el Gobierno colombiano decidió promover la sustitución de grasas animales por vegetales, tarea que encomendó al Instituto de Fomento Algodonero (IFA), el cual inició la investigación para el mejoramiento genético y el fomento del cultivo de palma de aceite. El trabajo fue continuado por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) (1968-1993) y más adelante por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA (Corpoica hasta 2017). Fruto de esta labor, se han generado cultivares nacionales de palma de aceite, que forman parte de la oferta de materiales mejorados para los productores colombianos. Este logro se obtuvo gracias a la aplicación de la investigación científica y al uso y aprovechamiento de los recursos genéticos de las palmas africana (*Elaeis guineensis*) y americana (*Elaeis oleifera*), que en la actualidad se encuentran en los Bancos de Germoplasma de la Nación colombiana. El presente documento reúne información científica sobre las actividades del programa estatal colombiano de mejoramiento genético de la palma de aceite, las cuales contribuyeron a conseguir los cultivares mejorados nacionales liberados y los materiales avanzados con los que se cuenta. La información se elaboró con el aporte de investigadores de trayectoria y se publica en este libro con el fin de darla a conocer a las comunidades científica y académica, de profesionales expertos y en formación, para que la aprovechen.

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria