



Capítulo XVII

Calidad y potenciales usos del aceite de palma extraído de cultivares híbridos interespecíficos OxG

Alexis González Díaz¹ ✉ Iván Mauricio Ayala Díaz²
César Augusto Díaz Rangel¹ ✉ Adriana Isabel Rada Bula¹
Diana Catalina Chaparro Triana¹ ✉ Darlis Adriana Varón Cárdenas¹
Jesús Alberto García Núñez¹ ✉ Hernán Mauricio Romero^{2,3}

1 Programa de Procesamiento y Usos, Cenipalma

2 Programa de Biología y Mejoramiento, Cenipalma

3 Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia

Autores para correspondencia: agonzalezd@cenipalma.org, jgarcia@cenipalma.org



La versatilidad del aceite de palma de cultivares híbridos OxG puede proporcionar características deseadas para diferentes aplicaciones.

Resumen

En el mercado, el aceite de palma obtenido del híbrido interespecífico OxG es todavía considerado un nuevo producto del que se desconocen sus características fisicoquímicas. En consecuencia, es pertinente caracterizar los parámetros de calidad de este aceite con el fin de que sea calificado comercialmente, lo cual se hace tomando como base ciertos criterios de calidad ya establecidos para la comercialización del aceite de palma de los cultivares comerciales *E. guineensis*. Con este propósito, en el presente capítulo se describen y se discuten algunos de los parámetros fisicoquímicos de calidad de mayor relevancia en el aceite extraído de diferentes cultivares de híbridos interespecíficos OxG de palma y se comparan con los resultados de cultivares comerciales *Elaeis guineensis* tipo DxP (*dura* x *pisifera*). Sumado a lo anterior, se presenta el efecto que puede tener la mezcla de aceite de palma crudo proveniente de cultivares DxP y del híbrido OxG sobre el índice de yodo y el perfil de ácidos grasos de los aceites resultantes. Adicionalmente, se describen algunos aspectos relevantes del grupo de compuestos menores en el aceite de palma producido por determinados cultivares del híbrido OxG. Por otra parte, se aborda la investigación relacionada con tecnologías emergentes para la evaluación de parámetros de calidad en aceite de cultivares híbridos OxG y la identificación del aceite según el cultivar del que provenga, por medio de espectroscopía del infrarrojo cercano. Por último, la versatilidad del aceite de palma de cultivares híbridos OxG puede proporcionar características deseadas en distintos frentes de aplicación, mediante su conversión en oleoquímicos potencialmente comercializables que agregan valor a la cadena productiva del aceite de palma, a saber: epóxidos y polioles para la fabricación de poliuretanos, extractos ricos en fitoquímicos de alto valor nutricional para el enriquecimiento de matrices alimentarias, entre otros.

Palabras clave

Extracción, híbridos OxG, evaluación calidad, espectroscopía del infrarrojo cercano, usos aceite de palma

17.1. Introducción

El híbrido interespecífico entre las especies *Elaeis oleifera* (Kunt) Cortés y *Elaeis guineensis* Jacq., conocido como el híbrido interespecífico OxG, ha sido utilizado como una alternativa para enfrentar la problemática fitosanitaria provocada por la enfermedad de la pudrición del cogollo, que arrasó numerosas plantaciones de palma en distintas zonas de Colombia y de Latinoamérica (Corredor *et al.*, 2008; Navia *et al.*, 2014). Por otra parte, el aceite extraído de los cultivares híbridos OxG tiene características fisicoquímicas que lo convierten en un producto versátil y de interés comercial; una de estas es el gran contenido de ácidos grasos mono y poliinsaturados en su matriz lipídica (Mozzon *et al.*, 2018). En otros estudios se ha determinado, además, que algunos cultivares híbridos OxG se destacan por presentar concentraciones totales de tocoferoles y tocotrienoles (de 1.299 mg·kg⁻¹ a 1.549 mg·kg⁻¹) y de carotenoides (de 1.413 mg·kg⁻¹ a 1.449 mg·kg⁻¹) (Chaves *et al.*, 2018), superiores a las que se han reportado en la caracterización del aceite de *E. guineensis* DxP (Lim, 2012; Ribeiro *et al.*, 2018). En consecuencia, algunos de los criterios de calidad utilizados para calificar el aceite de *E. guineensis* en el mercado han tenido que ser reevaluados y ajustados, para valorar el aceite extraído del híbrido OxG, con el propósito de determinar las nuevas especificaciones de este tipo de óleos.

Por otra parte, la mezcla entre aceites de palma extraídos de cultivares híbridos

OxG y de *E. guineensis* DxP (*dura* x *pisifera*) es una práctica que se ha vuelto común en las plantas de beneficio en Colombia. No obstante, tales mezclas tienden a ocasionar cambios imprevistos en las operaciones ya estandarizadas en las refinadoras de aceite de palma, principalmente, en operaciones como el blanqueo (más consumo de tierras de blanqueo, dada la elevada carga de compuestos cromóforos en la matriz lipídica) y el fraccionamiento de este tipo de aceite (cambios composicionales en los niveles de oleína y estearina). Como consecuencia, dichas mezclas generan modificaciones en los acuerdos comerciales entre las plantas de beneficio y las refinadoras y, a su vez, entre las refinadoras y sus mercados objetivos (González *et al.*, 2019).

Actualmente, otros parámetros de calidad, como fósforo, cloruros, trazas de hidrocarburos minerales derivados del petróleo (hidrocarburos saturados de aceites minerales, o MOSH, por sus siglas en inglés, e hidrocarburos aromáticos de aceites minerales, o MOAH, por sus siglas en inglés) y algunos metales (Fe, Cu, Pb y As) son monitoreados con más frecuencia en el aceite de palma crudo (APC) de diferente origen; en primera medida, para reducir la tasa de síntesis involuntaria de contaminantes de proceso durante la refinación de estos aceites y evitar así efectos nocivos sobre la salud de los consumidores y, en segunda instancia, para cumplir con las nuevas exigencias de calidad propuestas en los mercados internacionales para la comercialización del aceite de palma crudo y refinado.

Dadas las propiedades fisicoquímicas del aceite de palma de los cultivares del híbrido OxG, como el contenido porcentual másico de ácidos grasos mono y poliinsaturados, una concentración importante de compuestos menores, estabilidad oxidativa, densidad y viscosidad, entre otras, este sustrato lipídico de origen natural puede considerarse como una materia prima excepcional para la producción de derivados oleoquímicos de mayor valor agregado para diversas aplicaciones. La generación de biocombustibles; la síntesis de polioles, haloalcanos, aminas grasas, sales de ácidos grasos y demás, al igual que la extracción, purificación y concentración de fitonutrientes, forman parte de las posibles alternativas para la explotación industrial de este tipo de aceite.

17.2. Parámetros de calidad monitoreados en el aceite de palma extraído del híbrido interespecífico OxG

El APC procedente de los cultivares de palma tipo DxP (APC DxP) y de los cultivares de palma del híbrido OxG (APC OxG), es obtenido por extracción mecánica de los frutos maduros producidos por ambos cultivares en condiciones específicas de temperatura y presión en las plantas de beneficio de palma de aceite. Por otra parte, el APC puede contener naturalmente pequeñas cantidades de peróxidos, fosfolípidos, metales y compuestos cromóforos que afectan

la estabilidad, la calidad final del aceite o la percepción de los consumidores (Sampaio *et al.*, 2017), por lo que la refinación del APC es el mecanismo más adecuado para la remoción de este tipo de compuestos. El APC se refina por medio de procesos físicos o químicos y se fracciona para obtener oleína de palma líquida y estearina de palma sólida (González *et al.*, 2021).

El APC OxG presenta una gran concentración de carotenoides, que son responsables directos del color rojo intenso, típico de este tipo de óleos. Al igual que en el APC DxP, el perfil de ácidos grasos (PAG) del APC OxG está tipificado por trece especies de ácidos grasos (AG): láurico (C12:0), mirístico (C14:0), pentadecanoico (C15:0), palmítico (C16:0), palmitoleico (C16:1), margárico (C17:0), esteárico (C18:0), oleico (C18:1n9c), vaccénico (C18:1n7c), linoleico (C18:2n6c), α -linolénico (C18:3n3), araquídico (C20:0) y gondoico (C20:1n9). No obstante, los AG palmítico, esteárico, oleico, vaccénico y linoleico constituyen, en promedio, más del 97 % del total de las especies de AG en ambos tipos de aceite. La información anterior se basa en estudios de la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma), en proceso de publicación. Además, en la Tabla 17.1 se muestran algunas de las propiedades fisicoquímicas del APC OxG que fueron contrastadas con las del APC DxP, por medio de un consolidado (sin publicar) de resultados obtenidos de diversos trabajos de Cenipalma.

Tabla 17.1. Perfil de ácidos grasos, compuestos menores y algunos parámetros de calidad en APC extraído de distintos cultivares del híbrido interespecífico OxG y de cultivares DxP.

Ácidos grasos (% p/p)	Coari x La Mé (n = 1100)			Cereté x Deli (n = 72)			Brasil x Djongo (n = 69)			Manaos x Compacta (n = 152)			E. guineensis DxP (n = 257)		
	\bar{x}	Mín.	Máx.	\bar{x}	Mín.	Máx.	\bar{x}	Mín.	Máx.	\bar{x}	Mín.	Máx.	\bar{x}	Mín.	Máx.
Ácido palmítico (C16:0)	29,80	28,90	30,40	35,30	29,90	42,20	36,80	26,20	45,40	36,60	28,70	45,80	41,70	40,50	44,80
Ácido esteárico (C18:0)	2,80	2,50	2,90	2,50	1,80	3,30	3,10	2,20	5,00	3,50	1,90	6,00	5,50	4,00	6,30
Ácido oleico (C18:1n7c)	54,40	52,60	54,90	49,90	43,40	56,40	44,00	35,80	55,20	46,90	36,40	57,10	39,80	38,70	41,00
Ácido vaccénico (C18:1n7c)	1,30	1,10	1,30	1,30	1,00	1,80	1,10	0,60	1,60	1,00	0,60	1,80	0,60	0,10	0,80
Ácido linoleico (C18:2n6c)	11,20	10,90	11,50	9,30	5,20	12,70	13,20	9,20	19,60	9,90	5,30	16,10	10,40	9,70	10,80
AGS (% p/p)	32,60	31,40	33,30	37,80	31,70	45,60	39,80	28,40	50,40	40,10	30,60	51,80	47,10	44,50	51,20
AGMI (% p/p)	55,70	53,70	56,20	51,30	44,40	58,20	45,10	36,40	56,80	47,90	37,00	58,90	40,40	38,80	41,80
AGPI (% p/p)	11,20	10,90	11,50	9,30	5,20	12,70	13,20	9,20	19,60	9,90	5,30	16,10	10,40	9,70	10,80

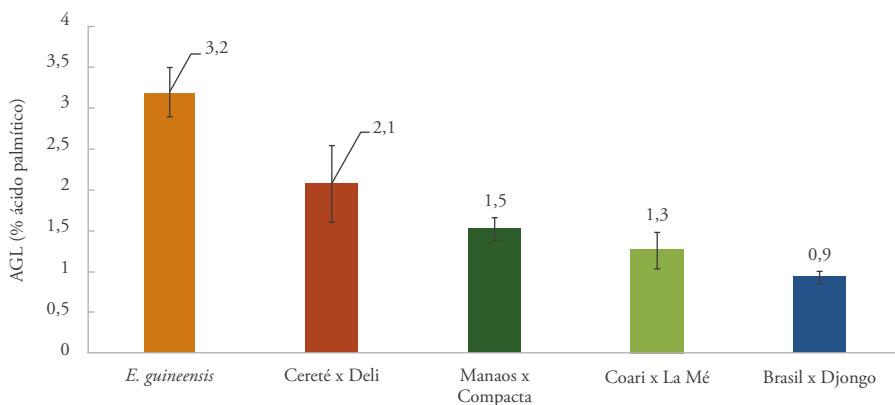


Compuestos menores	Coari x La Mé (n = 673)		Cereté x Deli (n = 72)		Brasil x Djongo (n = 182)		Manaos x Compacta (n = 23)		E. guineensis DxP (n = 132)		
	\bar{x}	Mín. Máx.	\bar{x}	Mín. Máx.	\bar{x}	Mín. Máx.	\bar{x}	Mín. Máx.	\bar{x}	Mín. Máx.	
Vitamina E (mg·kg ⁻¹)	1.445,90	897,90 1.873,30	1.036,50	652,30 1.473,40	547,80	213,40 1.193,00	274,70	52,90 490,60	853,90	665,30 1.127,30	
Carotenoides (mg·kg ⁻¹)	1.026,00	775,30 1.245,50	854,00	209,10 1.684,10	765,50	301,60 1.773,90	244,30	34,50 628,90	753,30	387,40 943,30	
Fitoesteroles (mg·kg ⁻¹)	538,50	396,30 832,60	710,20	500,20 965,30	552,40	228,80 2.085,70	369,30	654,20	634,80	230,40 1.273,40	
Coari x La Mé (n = 112)											
Escualeno (mg·kg ⁻¹)	273,50	176,30 487,40									
Polifenoles (mg·kg ⁻¹)	172,50	165,30 193,40									
Fosfolípidos (mg·kg ⁻¹)	110,70	15,70 143,10									
Otros parámetros de calidad	Coari x La Mé (n = 1100)		Cereté x Deli (n = 72)		Brasil x Djongo (n = 69)		Manaos x Compacta (n = 152)		E. guineensis DxP (n = 257)		
	\bar{x}	Mín. Máx.	\bar{x}	Mín. Máx.	\bar{x}	Mín. Máx.	\bar{x}	Mín. Máx.	\bar{x}	Mín. Máx.	
IY	69,20	67,00 70,10	61,70	48,30 73,60	63,40	48,80 85,00	60,10	42,30 80,50	54,60	52,30 56,50	
AGL (% ácido palmítico)	1,30	0,30 1,80	2,10	0,70 2,90	0,90	0,60 1,30	1,50	1,00 2,10	3,20	2,30 4,20	
Ácidos grasos saturados (AGS); ácidos grasos monoinsaturados (AGMI); ácidos grasos polinsaturados (AGPI); índice de yodo (IY); ácidos grasos libres (AGL).											

17.2.1. Ácidos grasos libres, humedad, impurezas, DOBI y compuestos relacionados con la oxidación del APC procedente de cultivares del híbrido interespecífico OxG

La cantidad de ácidos grasos libres (AGL) y el contenido porcentual de humedad y de impurezas en el APC OxG conforman el grupo de parámetros de calidad monitoreados regularmente en las plantas de beneficio primario y forman parte, con el índice de deterioro de la blanqueabilidad (DOBI, por sus siglas en inglés) y el índice de yodo (IY), de los requerimientos exigidos por las refinadoras para la compra de esta materia prima. Los AGL se generan como resultado de la hidrólisis de los aceites y las grasas (Bouaid *et al.*, 2016; Tan *et al.*, 2009). Tanto en el APC OxG como en el APC DxP, el porcentaje de AGL depende, principalmente, de factores como el estado de madurez de los racimos de fruta fresca (RFF), del tiempo transcurrido entre su cosecha y su procesamiento, de variables como el contenido de humedad y de la temperatura durante la extracción y del almacenamiento de los aceites en las plantas de beneficio (Azeman *et al.*, 2015; Tan *et al.*, 2017). Asimismo, el porcentaje de AGL y de humedad en el APC son factores determinantes para el direccionamiento comercial de este tipo de materias primas, que pueden destinarse tanto a la manufactura de productos alimentarios como a la producción de biocombustibles u otros oleoquímicos.

Un contenido elevado de AGL en el APC OxG indica una alta concentración de especies prooxidantes, estrechamente relacionadas con la peroxidación lipídica o enranciamiento oxidativo de los aceites y las grasas (Szydłowska-Czerniak & Łaszewska, 2015), que además contribuyen al incremento en el valor de los índices de *p*-anisidina y de oxidación total de los aceites. Por esta razón, los AGL deben eliminarse durante el proceso de refinación del APC. La formación de AGL en el APC es atribuida a las lipasas que, naturalmente, contiene el mesocarpio de los frutos de palma (triacilglicerol acilhidrolasa, E.C. 3.1.1.3), moléculas que catalizan la degradación de los triglicéridos a glicerol y a AGL (Ngando *et al.*, 2006; Sambanthamurthi *et al.*, 2000). En el trabajo desarrollado por Cadena y otros investigadores (2013), se estableció que la actividad de la lipasa en *E. oleifera* (<0,6 % AGL) y en tres progenies del cultivar Coari x La Mé (32,9 % AGL) fue menor que en *E. guineensis* (52,7 % AGL). Debido a esta situación, ciertos cultivares híbridos OxG pueden ser predilectos para la obtención de APC con poco contenido de AGL, siempre y cuando el APC OxG sea producido según las buenas prácticas de cultivo, cosecha y procesamiento. En la Figura 17.1 se presenta el porcentaje de AGL determinado en APC proveniente de diferentes cultivares híbridos OxG, extraído de racimos en buen estado de madurez y procesados según las buenas prácticas, y se compara con la misma variable determinada en el APC DxP (AOCS Official Method Ca 5a-40).



 **Figura 17.1.** AGL (como ácido palmítico, %) en APC OxG y en APC DxP.

En esta comparación se resalta que el contenido promedio de AGL fue menor en el APC del híbrido OxG Brasil x Djongo (0,9 % AGL) y mayor para el APC DxP (Figura 17.1). No obstante, todos los aceites caracterizados cumplieron con los parámetros reglamentarios establecidos en las políticas nacionales para su comercialización, es decir, máximo el 5,00 % de AGL como ácido palmítico (Resolución 2154 de 2012). En la Tabla 17.1 se presenta la cantidad de muestras analizadas, lo mismo que los valores mínimos y máximos determinados para la variable AGL durante la caracterización del APC OxG y del APC DxP.

De otro lado, se ha encontrado que el contenido de humedad y materia volátil en muestras de APC OxG procesado adecuadamente ($n=200$) (AOCS Official Method Ca 2b-38) es, en promedio, del 0,15 %, con valores mínimos de 0,08 % y máximos de 0,34 %. Adicionalmente, el contenido mínimo y máximo de impurezas insolubles en estos mismos aceites fue del 0,032 % y del

0,067 %, respectivamente, con un promedio general del 0,046 % (AOCS Official Method Ca 3a-46). Estos valores promedio están dentro del rango establecido como permisible para los parámetros anteriormente mencionados en aceites vegetales, delimitado en la Resolución 2154 de 2012, capítulo VIII, artículo 30 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2012).

Por otra parte, el DOBI es un parámetro de calidad monitoreado, principalmente, en el APC DxP destinado a refinación, blanqueo, desodorización y fraccionamiento; está estrechamente relacionado con el deterioro de este tipo de aceite y es determinante en el establecimiento de las condiciones óptimas para su procesamiento en las refinadoras. En principio, el DOBI fue un parámetro de calidad propuesto para la caracterización del APC proveniente de los cultivares DxP (Gibon *et al.*, 2007; Wondi *et al.*, 2020). De conformidad con diversos autores (Cherie *et al.*, 2019; Hock *et al.*, 2020; Nesti *et al.*, 2019; Wondi *et al.*, 2020), altos

valores en el DOBI ($> 2,99$) indican una gran concentración de carotenoides, estados óptimos de madurez de los RFF procesados y APC recientemente extraído. En contraste, valores bajos en el DOBI ($< 2,31$) señalan altas concentraciones de grupos carbonilos, bajo contenido de carotenoides, niveles elevados de AGL y, asimismo, son un indicativo de que el aceite ha sido almacenado por largos periodos, expuesto a altas temperaturas y deteriorado por procesos oxidativos. Actualmente en Colombia, el DOBI no se ha incluido de manera sistemática en el grupo de especificaciones de calidad para la comercialización nacional del APC DxP; sin embargo, gran parte de los compradores de esta materia solicitan el valor de dicho parámetro durante las negociaciones.

En estudios realizados por Cenipalma (datos no publicados), en los que se evaluaron 65 muestras de APC extraído de RFF del cultivar híbrido Coari x La Mé, recolectados en periodos óptimos de cosecha (estado fenológico 807) y procesados de manera apropiada, el DOBI fue estimado en un valor promedio de 3,4, con valores mínimos de 2,7 y máximos de 3,6. No obstante y debido al amplio rango de concentración en que pueden estar contenidos los carotenoides (α - y β -caroteno, principalmente) en el APC de los cultivares OxG ($244,3$ - $1026,6$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), resulta poco apropiado evaluar dichos resultados según los criterios ya establecidos en el ámbito comercial para el APC de los cultivares DxP.

En la actualidad son pocos los parámetros de calidad relacionados con el estado de

oxidación del APC OxG que son requeridos por las refinadoras durante las negociaciones; además, estos mismos no se determinan con frecuencia en las plantas de beneficio en Colombia. El índice de peróxidos (IP) es útil para establecer el estado de oxidación inicial de los aceites y las grasas y también ayuda a detectar la oxidación antes de que pueda percibirse de manera organoléptica, es decir, como rancidez oxidativa (Cebi *et al.*, 2017; Paunović *et al.*, 2020). El índice de *p*-anisidina (IA), por su parte, representa la oxidación secundaria en aceites y grasas, la cual es atribuible, en primera medida, a la formación de compuestos de oxidación, como aldehídos y cetonas, durante el procesamiento de los aceites a elevadas temperaturas o por el almacenamiento de estos durante largos periodos (Daniali *et al.*, 2016; Loganathan *et al.*, 2020). Por último, el valor de oxidación total (TOTOX, por sus siglas en inglés) es implementado para describir la oxidación completa a la cual ha sido expuesto un aceite; igualmente, de manera conjunta, este parámetro integra las características del IP y del IA de la siguiente manera: $\text{TOTOX} = 2(\text{IP}) + \text{IA}$, de acuerdo con Wai *et al.* (2009).

En estudios realizados por Cenipalma (datos no publicados), el IP (AOCS Official Method Cd 8b-90), el IA (AOCS Official Method Cd 18-90) y el TOTOX fueron determinados en 47 muestras de APC de cultivares híbridos OxG (información tomada de las bases de datos de los laboratorios de Bioquímica y Aceites y de Procesamiento de Cenipalma). El IP presentó valores mínimos y máximos de $0,037$ $\text{mEq O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ y de

0,57 mEq O₂·kg⁻¹, respectivamente, y un valor promedio de 0,23 mEq O₂·kg⁻¹. De otro lado, el IA correspondió, en promedio, a 1,92, con valores mínimos y máximos de 1,15 y 2,32, respectivamente, mientras que para el TOTOX se obtuvo una media de 2,38 a partir de los valores promedio del IP y del IA (valor mínimo TOTOX: 1,22 y valor máximo TOTOX: 3,75). En el mercado, un valor máximo de 10 mEq O₂·kg⁻¹ en el IP es aceptado durante la negociación del APC procedente de cultivares híbridos OxG (Resolución 2154 de 2012). Por otra parte, el IA y el TOTOX son frecuentemente monitoreados en aceite de palma refinado, blanqueado y desodorizado (AP-RBD) como parte de las pruebas de calidad con las que se busca conocer los niveles de oxidación que alcanzan los aceites de palma refinados al ser sometidos a diferentes temperaturas; sin embargo, en Colombia, el IA y el TOTOX no forman parte del grupo de parámetros de calidad con los que se califica el AP-RBD según los estándares establecidos por el Ministerio de Salud y Protección Social (Resolución 2154 de 2012); o por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) y la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), en el Standard for Named Vegetable Oils Codex Stan 210-1999.

17.2.2. Perfil de ácidos grasos e índice de yodo (IY)

Los cultivos oleaginosos producen la mayor cantidad de lípidos en el mundo y son la principal fuente de calorías y de ácidos gra-

dos esenciales en la dieta humana y animal. En las plantas, los ácidos grasos (AG) son necesarios para la síntesis de membranas celulares, señalizadores de moléculas, antioxidantes y fuentes de carbono y energía (Aid, 2019). En las semillas de los cultivos oleaginosos, incluidas las de la palma de aceite, la síntesis de AG se localiza en los plástidos, mientras que el ensamblaje de la molécula de triglicéridos, donde los AG son empaquetados en moléculas de tres ácidos grasos y un glicerol, llamados triglicéridos, puede ocurrir tanto en el retículo endoplásmico como con los cuerpos oleosos u oleosomas (Bates *et al.*, 2013). Los AG pueden ser de dos tipos: saturados (ácidos carboxílicos de cadena larga con enlaces simples entre sus átomos de carbono [C-C]) o insaturados (monoinsaturados o poliinsaturados, con uno o más dobles enlaces entre átomos de carbono en su estructura molecular [-HC=CH-n-HC=CH-], respectivamente) y, dependiendo del contenido mayoritario de uno o del otro tipo en un aceite, este último puede emplearse de manera predilecta para la elaboración de alimentos y producción de biocombustibles, cosméticos, detergentes o productos farmacéuticos, entre otros (Harwood, 1996).

Para el APC OxG, los AG que componen más del 95 % de su perfil de ácidos grasos (PAG) son el palmítico (C16:0), el esteárico (C18:0), el oleico (C18:1n9c), el vacénico (C18:1n7c) y el linoleico (C18:2n6c) (Tabla 17.1); sin embargo, de acuerdo con el cultivar del cual hayan sido extraídos, estos AG pueden estar en mayor o menor

proporción. En el cultivar Coari x La Mé del híbrido OxG (OxG CxL) se presentan los mayores contenidos de ácido oleico, seguido por los cultivares Cereté x Deli (OxG CxD), Manaos x Compacta (OxG MxC) y Brasil x Djongo (OxG BxD). Además, el contenido de ácido oleico en los cultivares híbridos OxG es superior al encontrado comúnmente en los cultivares *tenera* de *E. guineensis* (del 38,7 % p/p al 41,0 % p/p). Por el contrario, los cultivares comerciales del híbrido OxG presentan menores contenidos de ácido palmítico, en comparación con los cultivares *tenera* (Figura 17.2).

En estudios llevados a cabo por Cenipalma, se han observado cambios importantes en la composición másica de los ácidos grasos saturados (AGS), monoinsaturados (AGMI) y polinsaturados (AGPI) cuando se compara entre los APC extraídos de los diferentes cultivares híbridos OxG (Tabla 17.1). Es así como el contenido total de insaturaciones en

el APC del cultivar OxG CxL es del 67,4 % p/p, que es superior a la misma variable medida en el resto de los cultivares híbridos OxG evaluados, y está constituido por un 56,2 % p/p de AGMI y un 11,2 % p/p de AGPI (Figura 17.3). Los cultivares comerciales del híbrido OxG presentan, en general, un contenido mayor de AG insaturados (AGMI + AGPI), que es superior al que se encuentra en los cultivares *tenera* de *E. guineensis* (Tabla 17.1); esta es una de las características de diferenciación del APC OxG que permite explotar el valor agregado de este tipo de material oleoso.

Por otra parte, el IY mide el grado de insaturaciones o el número promedio de dobles enlaces en aceites y grasas (Adeyemi *et al.*, 2014; Lam *et al.*, 2020). En el APC OxG, el comportamiento de este parámetro de calidad se ve influenciado significativamente por las variaciones en el contenido porcentual másico de los AGMI y de los AGPI (González *et al.*, 2019).

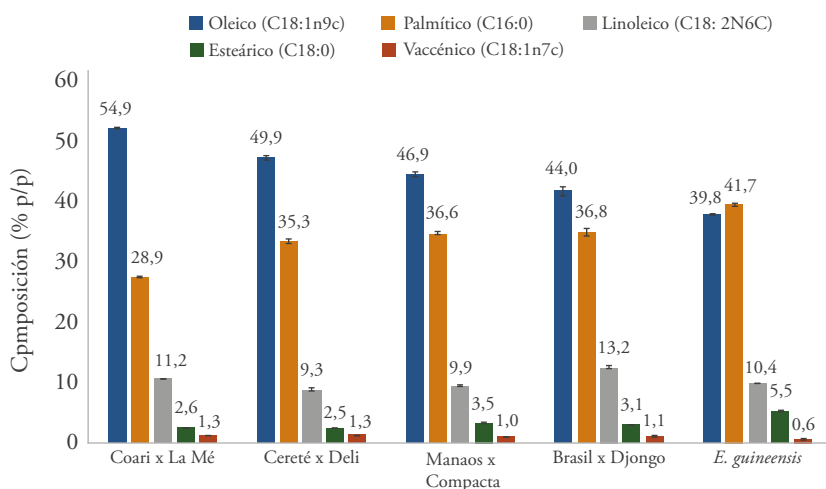


Figura 17.2. Perfil de ácidos grasos de APC del híbrido interespecífico OxG y de APC DxP.

En trabajos aún no publicados por Cenipalma se ha encontrado que el APC del cultivar OxG CxL presenta, en promedio, el valor más alto de IY (69,2), en comparación con los cultivares OxG CxD, OxG BxD y OxG MxC (Figura 17.3). Adicionalmente, el valor del IY en el APC OxG es superior al rango de cifras encontrado de manera común en el APC de los cultivares DxP (50 a 55).

17.2.3. Perfil de triglicéridos en el APC OxG CxL y en el APC DxP

Los triglicéridos conforman cerca del 95 % de los aceites y las grasas (Zhang *et al.*, 2018). Químicamente, un triglicérido (TG) es una molécula de glicerol a la que se han unido tres moléculas de AG. Tanto las especies de AG (AGS, AGMI y AGPI) como su proporción y su acomodación en la molécula de glicerol determinan las propiedades físico-

químicas de un aceite o de una grasa (González & Scanlon, 2018; Moorthy, 2018). Los AGMI y AGPI que constituyen los TG del APC OxG CxL son el oleico + el vaccénico (con cerca del 56,2 % p/p) y el linoleico (con aproximadamente el 11,1 % p/p) (Figura 17.2), ambos con configuración *cis*; y los AG palmítico (cerca del 28,9 % p/p) y esteárico (alrededor del 2,6 % p/p) son las especies de AGS predominantes en estos mismos aceites (Figura 17.2). El APC OxG CxL está constituido, en mayor medida, por los TG POO (sn-1-palmitoil-2,3-dioleoil glicerol) con cerca del 23,3 %, POL (sn-1-palmitoil-2-oleoil-3-linoleoil glicerol), con alrededor del 19,0 %, y POP (sn-1-palmitoil-2-oleoil-3-linoleoil glicerol), que tiene aproximadamente el 13,2 % (Tabla 17.2). Estos se caracterizan por la presencia del ácido oleico en la posición sn-2 del TG, resultado que está acorde con el presentado por Mozzon *et al.* (2013). La ubicación del ácido oleico en la posición sn-2 de los TG puede conferirle al APC OxG CxL

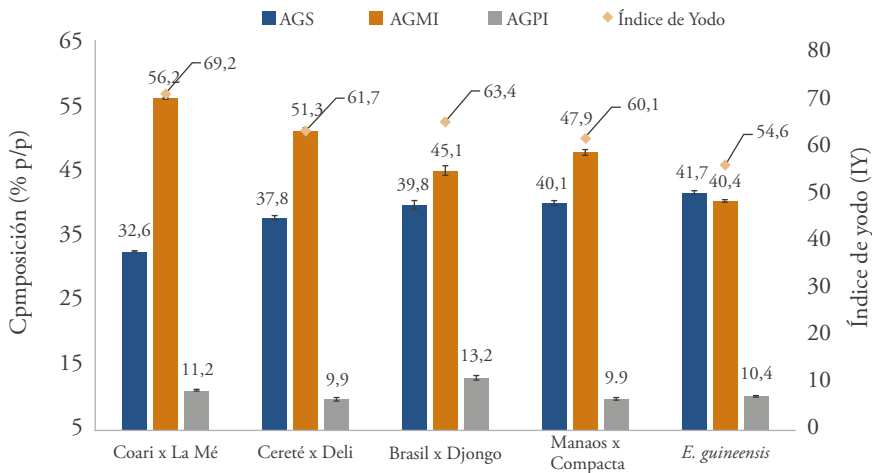


Figura 17.3. Contenido de AGS, AGMI, AGPI e índice de yodo en APC OxG y en APC DxP.

propiedades reguladoras sobre los niveles de colesterol sérico en los consumidores de este tipo de aceite, de conformidad con lo establecido en la hipótesis de la posición de los AG en la estructura molecular de los del TG (Teh *et al.*, 2018) (véase con más detalle en el siguiente capítulo). En contraste con el APC

OxG CxL, el APC DxP presenta un contenido inferior de TG POO, cercano al 18,80 %, y una concentración superior de TG POP, de aproximadamente el 23,13 % (Tabla 17.2).

Sin embargo, en el trabajo desarrollado por Prada *et al.* (2011) se encontró que, del



Tabla 17.2. Perfil de triglicéridos en APC OxG CxL y en APC DxP.

Triglicéridos (%)	APC OxG CxL *			APC DxP **		
	\bar{x}	Mín.	Máx.	\bar{x}	Mín.	Máx.
OLL	4,50	3,90	5,00	1,41	1,06	1,76
PLL	8,10	7,40	9,40	7,86	7,24	8,71
MLP	0,30	<LCM	0,70	1,22	0,77	2,11
OOL	9,70	8,50	11,30	3,22	2,88	3,57
POL	19,00	17,80	20,20	N.D	N.D	N.D
PLP	8,30	5,60	9,40	15,78	14,41	16,72
OOO	9,70	8,50	12,80	3,02	2,64	3,79
POO	23,30	21,90	24,80	18,80	17,43	19,77
POP	13,20	10,40	15,30	23,13	22,10	24,20
PPP	0,40	<LCM	0,60	1,33	0,64	3,89
SOO	1,60	1,10	2,50	2,10	1,73	2,37
POS	1,60	1,50	1,80	4,14	3,50	4,92
PPS	0,10	<LCM	0,20	0,31	0,11	0,80
SOS	0,30	0,20	0,40	0,19	N.D	0,19

<LCM: menor que el límite de cuantificación del método; N.D: no disponible; * Tomado de Rincón *et al.* (2013); **Tomado de Rincón y Martínez (2009).

OLL: 1-oleoil-2,3-di-linoleoil-sn-glicerol; PLL: 1-palmitoil-2-linoleoil-3-linoleoil glicerol; MLP: 1-miristoil-2-linoleoil-3-palmitoil glicerol; OOL: 1,2-dioleoil-3-linoleoil glicerol; POL: 1-palmitoil-2-oleoil-3-linoleoil glicerol; PLP: 1,3-dipalmitoil-2-linoleoil glicerol; OOO: trioleoil glicerol; POO: 1-palmitoil-2,3-dioleoil glicerol; POP: 1,3-dipalmitoil-2-oleoil glicerol; PPP: tripalmitoil glicerol; SOO: 1-estearoil-2,3-dioleoil glicerol; POS: 1-palmitoil-2-oleoil-3-estearoil glicerol; PPS: 1-palmitoil-2-palmitoil-3-estearoil glicerol; SOS: 1-estearoil-2-oleoil-3-estearoil glicerol.

total de TG en el APC extraído de tres cultivares de palma tipo *tenera* de *E. guineensis* (Deli x La Mé, Deli x Ekona y Deli x Avros), en la semana 24 de maduración, aproximadamente el 75 % en Deli x La Mé, cerca del 74 % para Deli x Ekona y más del 60 % en Deli x Avros, correspondían a TG con el ácido graso oleico en la posición *sn*-2 de su estructura molecular. Esta situación resulta positiva para el APC obtenido de cultivares de *E. guineensis*, dadas las implicaciones que tiene para la salud de los consumidores la composición de los TG en los aceites y grasas de la dieta.

17.2.4. Compuestos menores

La vitamina E y los carotenoides forman parte del grupo de constituyentes minoritarios del APC OxG (González *et al.*, 2021). Este tipo de aceite contiene, además, fitoesteroles, escualeno, ubiquinonas y fosfolípidos (Mozzon *et al.*, 2018). Adicionalmente, es una fuente natural de polifenoles y otros antioxidantes (Rodríguez *et al.*, 2016).

17.2.4.1. Vitamina E, provitamina A y fitoesteroles

El término vitamina E hace referencia al grupo conformado por ocho vitaminas liposolubles que pueden clasificarse en cuatro isoformas de tocoferol (α -, β -, γ - y δ -tocoferol) y cuatro de tocotrienol (α -, β -, γ - y δ -tocotrienol) (Bartella *et al.*, 2019; Peh *et al.*, 2016). En forma pura, la vitamina E es de apariencia viscosa, de color amarillo, y se oxida con facilidad al estar expuesta a la luz,

al oxígeno y en contacto con iones de metales en transición; también es un compuesto insoluble en agua, pero soluble en alcoholes, solventes orgánicos y aceites vegetales (Peh *et al.*, 2016).

Por otro lado, el α - y el β -caroteno son dos de los más de 600 carotenoides liposolubles caracterizados, procedentes de fuentes naturales (Gul *et al.*, 2015). Ambas sustancias actúan como provitaminas A, indispensables para la síntesis de vitamina A (retinol) en el organismo. El APC OxG es considerado como uno de los óleos de origen natural con más concentración de carotenoides, y son el β -caroteno (del 55 % al 72 %) y el α -caroteno (del 32 % al 36 %) los más abundantes (Chaves *et al.*, 2018; Mozzon *et al.*, 2018).

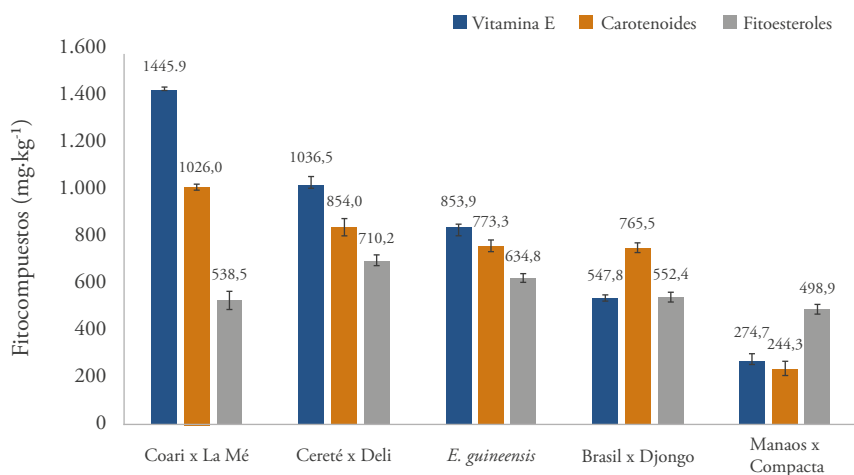
En estudios por Rincón-Miranda *et al.* (2013), el contenido de vitamina E en el APC OxG CxL, extraído de RFF en el estadio fenológico 807, que corresponde al tiempo óptimo de cosecha para este cultivar OxG, fue encontrado en un rango comprendido entre 876 y 1.843 mg·kg⁻¹, con un promedio de 1.316 mg·kg⁻¹, mientras que la concentración de carotenoides fue en promedio de 820 mg·kg⁻¹, con valores mínimos de 514 mg·kg⁻¹ y máximos de 1.042 mg·kg⁻¹. Un resultado similar se halló en diversos trabajos realizados por Cenipalma (Figura 17.4), en los que el APC OxG CxL presentó en promedio una concentración mayor de vitamina E (1.445,9 mg·kg⁻¹) y de carotenoides (1.026 mg·kg⁻¹) respecto a otros aceites extraídos tanto de cultivares híbridos OxG como de DxP (Figura 17.4). Hoy por hoy,

estos compuestos son catalogados como antioxidantes naturales de gran valor nutricional (Karmowski *et al.*, 2015; Peh *et al.*, 2016). En este sentido, el APC OxG CxL puede considerarse un sustrato lipídico con concentraciones importantes de compuestos como tocoferoles y tocotrienoles, carotenoides, fenoles, escualeno, fitoesteroles y otros, que pueden explotarse tanto para la extracción, concentración y purificación de este tipo de sustancias, así como para la formulación y la producción de alimentos funcionales con una abundante carga de antioxidantes que contribuyan o traten, por ejemplo, el déficit o el desequilibrio de vitaminas liposolubles en el organismo.

En contraste con el APC OxG CxL, el APC procedente del cultivar MxC tiene la concentración más baja de vitamina E (274,7 mg·kg⁻¹) y de carotenoides (244,3 mg·kg⁻¹) entre todas las muestras de APC OxG estudiadas; incluso la concentración de vitamina E y

de carotenoides en el APC OxG MxC fue inferior a la encontrada en el APC DxP (Figura 17.4). Por otra parte, en la Tabla 17.1 se puede observar la totalidad de los valores obtenidos y la cantidad de muestras analizadas.

Por otro lado, los fitoesteroles son alcoholes monohidroxílicos policíclicos diferenciados entre sí, por la presencia de uno o más grupos funcionales o de dobles enlaces en la cadena lateral que forma parte de su estructura molecular (Cheung & Mehta, 2015; Finley & DeMan, 2018). Asimismo, más de 200 tipos de fitoesteroles han sido reportados (Uddin *et al.*, 2015), y son el colesterol, el β-sitosterol, el campesterol y el estigmasterol los de más abundancia en el APC OxG. El colesterol es precursor de moléculas bioquímicamente activas como hormonas (Šošić-Jurjević *et al.*, 2017), vitamina D (Prabhu *et al.*, 2016; Hanel & Carlberg, 2020) y ácidos biliares (Hanel & Carlberg, 2020; Nuno *et al.*, 2016; Zerbinati & Iuliano, 2017). En la caracterización de



 **Figura 17.4.** Vitamina E, provitamina A (carotenoides) y fitoesteroles en APC OxG y en APC DxP.

APC OxG, llevada a cabo por Cenipalma, se determinaron concentraciones promedio de fitoesteroles desde $498,9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en el aceite del cultivar MxC (mínimo: $369,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; máximo: $654,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), hasta $710,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en el aceite del híbrido CxD (mínimo: $500,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; máximo: $965,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Figura 17.4). No obstante, en el aceite del cultivar OxG BxD se han encontrado valores máximos de concentración de fitoesteroles cercanos a $2.085,7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tabla 17.1). Con base en lo anterior, pudo establecerse que en el APC obtenido tanto del cultivar OxG CxD como del cultivar DxP, se presentaron las concentraciones promedio más elevadas de fitoesteroles encontradas en los aceites estudiados (Figura 17.4). En la Tabla 17.1 se pueden consultar los demás valores obtenidos y el número de muestras analizadas.

17.2.4.2. Escualeno, polifenoles y fosfolípidos

El escualeno es un precursor bioquímico del colesterol y de otros esteroides en el cuerpo humano; además, es una sustancia bioactiva perteneciente a la clase de antioxidantes denominados isoprenoides (Rohman, 2017; Singh *et al.*, 2019). El contenido de escualeno en el APC OxG CxL fue determinado en concentraciones mínimas de $176,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y máximas de $487,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con un promedio de $273,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, en estudios no publicados aún, que fueron llevados a cabo por Cenipalma (Tabla 17.1). De otro lado, Choo *et al.* (2002) reportaron un rango de concentración para el escualeno de $200\text{-}600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en muestras de APC DxP.

Por otra parte, en estudios de Mozzon *et al.* (2015) y Lucci *et al.* (2015), se encontró que el contenido de escualeno, lo mismo que el de metilesteroles isoprenoides y de alcoholes isoprenoides, es mayor en el APC extraído de *E. guineensis* que en el APC OxG CxL.

Además, el APC OxG CxL contiene cantidades importantes de ácidos fenólicos (p. ej., ácidos protocatequico, gálico, vanílico y ferúlico); aldehídos fenólicos (p. ej., protocatechualdehído); fitohormonas fenólicas (p. ej., ácido p-salicílico) y flavonoides, que conforman el grupo de compuestos fenólicos en este tipo de aceite (Rodríguez *et al.*, 2016). Estos metabolitos secundarios poseen notables propiedades como antioxidantes, característica atribuida a la capacidad que tienen para actuar como quelantes de cationes divalentes e inhibidores de radicales libres (Darvin *et al.*, 2011; Liochev, 2013; Nimse & Pal, 2015). En trabajos de Cenipalma, el contenido de fenoles totales en el APC OxG CxL fue, en promedio, de $172,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con concentraciones mínimas de $165,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y máximas de $193,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Resultados similares fueron obtenidos por Pacetti *et al.* (2016).

Por otra parte, los fosfolípidos son lípidos anfipáticos, hidrofílicos e hidrofóbicos, que forman parte de las membranas celulares de animales y plantas, y que se encuentran de manera regular para el consumo humano en alimentos y aceites vegetales obtenidos por extracción (Torres y Durán, 2015). Los fosfolípidos pertenecen al grupo de lípidos derivados del glicerol y tienen estructura similar a la de los TG. Los fosfolípidos

están compuestos por una molécula de glicerol a la que se unen dos AG en las posiciones *sn-1* y *sn-2* y una molécula de ácido ortofosfórico en la posición *sn-3* (Cui & Decker, 2016). En el APC DxP, el contenido de fosfolípidos oscila entre 20 mg·kg⁻¹ y 80 mg·kg⁻¹, y constituye una pequeña parte del contenido total de fósforo elemental en este tipo de aceite (Lim, 2012). Por otra parte, en trabajos efectuados por Cenipalma se encontró que el contenido de fosfolípidos en el APC OxG CxL estaba en un rango entre 15,7 mg·kg⁻¹ y 143,1 mg·kg⁻¹, con un promedio de 110,7 mg·kg⁻¹ (Tabla 17.1). De acuerdo con Panpipat & Chaijan (2015), los fosfolípidos más abundantes en el APC son la fosfatidiletanolamina, el fosfatidilinositol, la fosfatidilcolina y el fosfatidilglicerol, pero también se pueden encontrar ácido fosfatídico, difosfatidilglicerol y lisofosfatidilcolina en menor cantidad y trazas de fosfatidilserina y de lisofosfatidiletanolamina.

17.2.5. Espectroscopía del infrarrojo cercano como una tecnología emergente para la evaluación de parámetros de calidad en APC OxG

La espectroscopía del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) es, actualmente, una de las técnicas instrumentales de más versatilidad para la caracterización de distintos productos y subproductos de proceso que son generados en algunos eslabones de la cadena productiva del aceite de palma (Díaz *et al.*, 2019); este es el caso de las plantas de beneficio de palma de aceite, donde la tec-

nología NIR puede utilizarse para el análisis de materiales sólidos, semisólidos, acuosos y aceitosos. Este tipo de tecnologías se proyectan como alternativas efectivas para el seguimiento de diversas variables relacionadas con el control de los procesos y para el monitoreo continuo de diferentes parámetros de la calidad en los productos. Otras cadenas productivas de oleaginosas (por ejemplo, la soya) también utilizan la tecnología NIR para la determinación del contenido de nitrógeno y de materia orgánica en varios de sus productos y subproductos (Zhang, 2018). Asimismo, esta tecnología es empleada en industrias cárnicas y pesqueras, para la cuantificación de contenido de proteína y de grasa en sus productos (Hassoun *et al.*, 2020; Kademi *et al.*, 2019).

Como parte de los resultados que se lograron en el marco del convenio de investigación entre Cenipalma y la empresa de origen suizo Büchi Labortechnik AG, ha sido posible, mediante los equipos NIR Proximate y NIRflex N500 (Büchi Labortechnik AG, Suiza), el desarrollo de diferentes modelos de predicción para la determinación simultánea de varios parámetros de calidad en APC de distinto origen.

Específicamente, en el equipo NIR Proximate, construido como un sistema NIR dispersivo, la luz se emite constantemente desde una fuente NIR (generalmente, una lámpara halógena de tungsteno) sobre una muestra. La luz, difusamente reflejada de la muestra, se dirige hacia un elemento dispersivo (por ejemplo, una rejilla estacionaria) y se detecta

la luz monocromática resultante. En lugar de un monocromador móvil y un solo detector, se puede usar una matriz de diodos. Esta, generalmente, consta de 256 diodos, cada uno de los cuales recopila la intensidad de un determinado rango de longitud de onda según su posición espacial. Estas señales de diodo individuales se conocen, comúnmente, como píxeles. La división de la intensidad medida (I) por la intensidad de un espectro de referencia blanco (I_0), así como la conversión de píxeles a una escala de longitud de onda, da como resultado el llamado espectro I/I_0 , representado frente a nm o cm^{-1} .

Por otra parte, el equipo NIRflex N500 está construido con base en el principio de funcionamiento de un sensor FT-NIR (NIR por transformada de Fourier) y utiliza un interferómetro para modular la señal NIR y una computadora para obtener los espectros de los materiales. La forma más simple de un interferómetro es el Michelson clásico, que consta de un divisor de haz y dos espejos planos mutuamente perpendiculares: uno que permanece estático y otro que se mueve. El divisor de haz refleja parte de la energía NIR de la fuente (típicamente, una bombilla halógena) en cada espejo. Los haces reflejados se recombinan en el divisor de haz y se desvían. Cuando la distancia entre el divisor de haz y los dos espejos es equidistante, los dos haces interfieren constructivamente. La interferencia entre los haces con una diferencia de trayectoria óptica (es decir, cuando se desplaza el espejo en

movimiento) crea un interferograma. El tratamiento matemático llamado transformada de Fourier se utiliza para convertir el interferograma en un espectro.

Tanto para los cultivares de *E. guineensis* DxP, como para los cultivares híbridos OxG, Cenipalma ha desarrollado modelos de predicción de matrices sólidas, tales como fibra de mesocarpio prensada, torta de palmiste, tusa prensada, almendra, cuesco y mesocarpio. En el caso de las matrices oleosas, se han desarrollado modelos de predicción, con el fin de caracterizar el APC y el aceite de palmiste crudo. En el grupo de parámetros que son evaluados en el análisis de muestras oleosas o sólidas hay variables como humedad y materia volátil (%), pérdidas de aceite (%), AGL (%), DOBI, impurezas insolubles en hexano (%), y se tienen otros en desarrollo, como el PI, el IP y el PAG, entre otros. En el caso del APC OxG, en la Tabla 17.3 se indican los modelos de predicción desarrollados hasta el momento, los cuales están sustentados por valores estadísticos descriptivos que facilitan la evaluación del desempeño de los modelos (R^2 : coeficiente de determinación; SEC: error estándar de calibración). Para la conformación de los modelos de predicción se analizaron entre 30 y 90 muestras de ambos cultivares (*E. guineensis* y OxG CxL), tanto en laboratorio como en planta de beneficio, con el fin de generar modelos cuya capacidad de predicción responda a la gran variabilidad estadística asociada a los productos y subproductos analizados.



Tabla 17.3. Modelos generados con la tecnología NIR a partir del análisis de componentes oleosos y sólidos en cultivares del híbrido interespecífico OxG.⁽¹⁾

Matriz	Parámetro	Método de referencia	Calibración		Validación	
			R ²	SEC	R ²	SECV ⁽²⁾
APC DxP	Humedad y materia volátil (%)	AOCS Ca 2b-38	0,78	0,03	0,77	0,03
	AGL (%)	AOCS Ca 5a-40	0,99	0,49	0,99	0,49
	Impurezas insolubles en hexano (%)	AOCS Ca 3a-46	0,87	0,18	0,84	0,17
	DOBI	MPOB Test methods, 2005, p. 414	0,95	0,04	0,95	0,04
Aceite de palmiste crudo	AGL (%)	AOCS Ca 5a-40	0,99	0,07	0,96	0,07
DxP	Impurezas insolubles en hexano (%)	AOCS Ca 3a-46	0,92	0,0002	0,69	0,0003
APC OxG	Humedad y materia volátil (%)	AOCS Ca 2b-38	0,77	0,01	0,61	0,02
	AGL (%)	AOCS Ca 5a-40	0,85	0,10	0,74	0,13
	Impurezas insolubles en hexano (%)	AOCS Ca 3a-46	0,90	0,002	0,83	0,004
Fibra de prensado en cultivares híbridos OxG	Humedad y materia volátil (%)	AOCS Ca 2b-38	0,84	1,69	0,76	2,10
	Pérdidas de aceite (%)	CenML-S3-Pac1/ CenMLS3-Pac4	0,99	0,21	0,96	0,41
Torta de palmiste cultivares híbridos OxG	Humedad y materia volátil (%)	AOCS Ca 2b-38	0,93	0,31	0,91	0,36
	Impregnación de aceite (%)	CenML-S3-Pac1/ CenMLS3-Pac4	0,90	0,65	0,87	0,76

⁽¹⁾ Se usaron de guía otros documentos de soporte, tales como gestión del instrumento de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) y desarrollo de modelos de predicción (AOCS Analytical Guidelines Am 1a-09) y *Manual de procedimientos de laboratorio de plantas de beneficio*, Cenipalma (basado en Manual Palm Oil Factory Process Handbook Part 3).

⁽²⁾ SECV (error estándar de validación cruzada, por sus siglas en inglés): representa la desviación estándar de las diferencias entre los valores de referencia (laboratorio) y valores obtenidos por el equipo NIR.

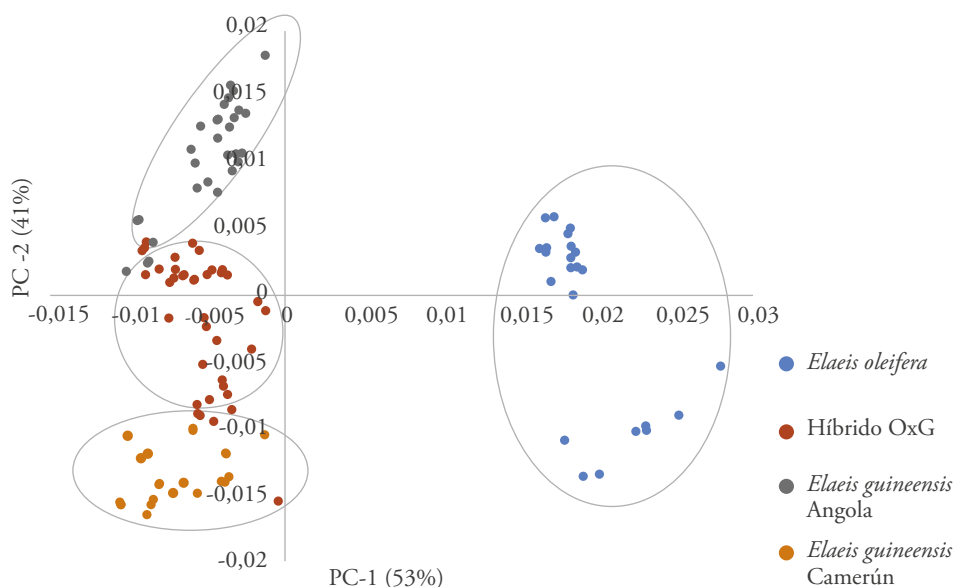
Entre las funcionalidades de los equipos NIR es pertinente destacar la construcción de un modelo que facilite la identificación de cultivares a partir de muestras de mesocarpio seco. Tomando como punto de partida el análisis de 104 muestras y la calibración de modelos a partir de los resultados obtenidos de los análisis, fue posible diferenciar muestras de cultivares de *E. guineensis* por su origen, en este caso Camerún y Angola, como también para *E. oleifera* y para el híbrido OxG. Estas muestras provienen de plantas de beneficio de las zonas Central, Oriental y Suroccidental. En la Figura 17.5, a partir de un análisis de componentes principales, con un 94 % de la varianza explicada, se observa que el grupo de muestras de *E. oleifera* es fácilmente diferenciable del resto de cultivares. En el caso del grupo de muestras del híbrido OxG, a pesar de estar circundado por los materiales de *E. guineensis* de Angola y Camerún, el modelo permite su diferenciación. Las firmas espectrales obtenidas mediante NIR podrían ser una herramienta robusta para la clasificación por cultivar o por origen de muestras tomadas del mesocarpio o la almendra y los de frutos de palma de aceite, por cultivar o por origen, al igual que en muestras de almendra seca y molida, con resultados obtenidos de forma instantánea. Este modelo de trazabilidad de aceites sería una herramienta de gran utilidad para empresas refinadoras, comercializadoras de aceites y entidades gubernamentales de control, debido a que permitiría la identificación de mezclas de aceites y su proporción de acuerdo con el material presente en dicho producto final.

Otras tecnologías emergentes para el uso en los laboratorios que pueden aplicarse durante el procesamiento de RFF del híbrido OxG se mencionan en el capítulo 16, como, por ejemplo, en la determinación de contenido de aceite en mesocarpio, mediante la tecnología de resonancia magnética nuclear (RMN), en el marco del uso de la metodología de MPD (masa que pasa al digestor).

17.3. Actividad antioxidante del APC OxG CxL: factor determinante para combatir el estrés oxidativo y las especies reactivas de oxígeno

El APC OxG CxL contiene grandes concentraciones de antioxidantes naturales, entre los que pueden destacarse compuestos como los tocoferoles y tocotrienoles, los carotenoides, el escualeno y los polifenoles (Tabla 17.1) (Choo *et al.*, 2002; Loganathan *et al.*, 2013; Sanagi *et al.*, 2005). Estas sustancias son capaces de neutralizar radicales libres y combatir el efecto negativo de las especies reactivas de oxígeno, entre las que se encuentran radicales libres, iones de oxígeno y peróxidos orgánicos e inorgánicos (Buddhan *et al.*, 2007; Narayan *et al.*, 2010; Peh *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2018).

En otro orden de ideas, el radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH[•]) es susceptible de reaccionar con compuestos antioxidantes mediante un mecanismo de reacción caracterizado por la transferencia de un átomo de hidrógeno procedente del



 **Figura 17.5.** Análisis de componentes principales de firmas espectrales calculadas a partir de parámetros de mesocarpio, fibra y tusa, para diferentes genotipos de palma de aceite.

sustrato antioxidante (Bao *et al.*, 2020; Goujot *et al.*, 2019; Kandi & Charles, 2019). Por tal razón, este radical sintético es utilizado de manera frecuente en los laboratorios, y sirve para determinar la capacidad antioxidante de diversos extractos, compuestos y alimentos (Ali *et al.*, 2020; Jamil *et al.*, 2019; Tsai & Lin, 2019).

En estudios realizados por Cenipalma, la capacidad antioxidante en muestras de APC OxG CxL fue determinada al implementar el método del radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH[•]), propuesto por Szydłowska-Czerniak *et al.* (2011) y por Brand-William *et al.* (1995), con algunas modificaciones. El estudio se llevó a cabo en 120 muestras de APC OxG CxL, que fueron recolectadas en dos plantas de beneficio de la Zona Oriental de Colombia (planta de

beneficio A ($n=60$); planta de beneficio B ($n=60$)), y en 10 muestras de aceite de palma OxG CxL, listo para consumo humano (OxG CxL para CH), disponible en superficies comerciales. Este estudio, además, incluyó la determinación de la capacidad antioxidante por el método del radical libre DPPH[•] en 83 muestras de APC DxP, que fueron recolectadas para diferentes estudios y en distintas plantas de beneficio de la Zona Oriental. En la Figura 17.6 se presenta el porcentaje promedio de inhibición del radical libre DPPH[•] logrado por los extractos metanólicos de las muestras analizadas.

En promedio, las muestras de APC OxG CxL recolectadas en las plantas de beneficio A y B lograron inhibir el 77,7 % (mínimo: 73,7 %, máximo: 87,8 %) y el 74 % (mínimo: 70,8 %, máximo: 81,9 %) del radical

libre DPPH[•], respectivamente (Figura 17.6). De otro lado, el porcentaje de inhibición del radical libre DPPH[•], por los extractos del OxG CxL para CH, fue en promedio del 76,4 % (mínimo: 72,3 %, máximo: 78,7 %). No se encontraron cambios importantes en la variable «capacidad de inhibición del radical libre DPPH[•]» entre los extractos de APC OxG CxL y los de OxG CxL para CH. En consecuencia, pudo establecerse que, en las condiciones de este trabajo, el contenido de compuestos con actividad antioxidante en el OxG CxL no decrece o se modifica de manera sustancial a medida que se desarrollan las etapas de extracción en las plantas de beneficio, durante su refinación por cristalización secuencial en frío en las refinadoras (Ramli *et al.*, 2008) o durante su empaquetado y comercialización. Esta situación garantiza que el aceite del híbrido OxG tenga una contribución de alto impacto para la salud de los con-

sumidores y agrega valor a su cadena de producción comercial.

En general, el porcentaje de inhibición del radical libre DPPH[•] alcanzado por los extractos de las muestras de APC OxG CxL y de OxG CxL para CH (Figura 17.6) fue superior al determinado para los extractos de APC DxP (promedio: 52,8 %, mínimo: 41,7 %, máximo: 58,6 %). Un resultado similar fue reportado por Duarte *et al.* (2016) durante la determinación de la capacidad antioxidante del APC DxP al implementar el método del radical libre DPPH[•] ($56,8 \pm 2,49$ %). En el trabajo desarrollado por Cenipalma, este fenómeno pudo atribuirse al contenido de compuestos con capacidad antioxidante en las muestras caracterizadas (tocolos, carotenoides y fenoles, principalmente), el cual es mayor en el APC OxG CxL que en el APC DxP, como puede apreciarse en la Tabla 17.1.

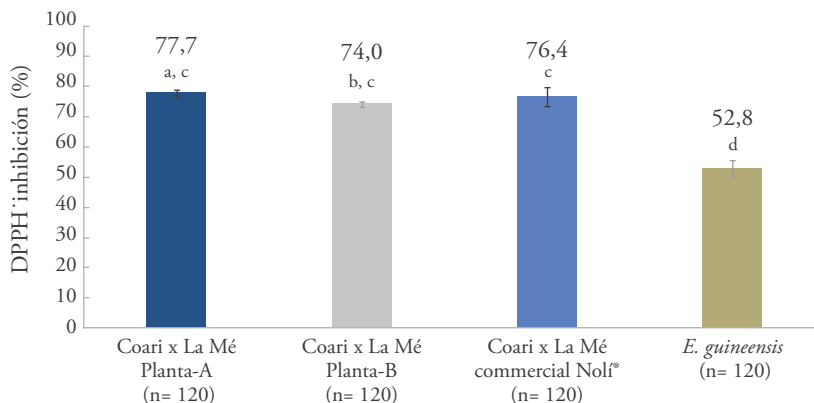


Figura 17.6. Porcentaje de inhibición del radical libre DPPH[•] por extractos metanólicos de APAO crudo (PB-A: Planta de beneficio A; PB-B: Planta de beneficio B), de APAO comercial Noli® y de APC DxP. Las barras de error corresponden al error estándar de la media. Los valores con las letras «a» y «b» no son estadísticamente diferentes entre ellos según la prueba t de Student ($p > 0,05$), con $\alpha = 0,05$. Los valores con la letra «c» no presentan diferencias estadísticas entre ellos según el ANOVA de una vía ($p > 0,05$), con $\alpha = 0,05$.

174. Mezclas entre APC procedente de cultivares DxP y del cultivar del híbrido interespecífico OxG CxL

La mezcla entre APC DxP y OxG CxL es una práctica que se ha vuelto común en las plantas de beneficio, la cual se lleva a cabo por la gran cantidad de RFF procesados de cada uno de los cultivares, debido a la facilidad o no de separar los aceites durante el procesamiento o el almacenamiento y por la factibilidad o no de vender aceites mezclados. Con esta práctica se logra la disminución del contenido de AGL en los aceites resultantes, siempre y cuando el APC OxG CxL haya sido extraído de RFF en buen estado de madurez y procesado en el menor tiempo posible. Sin embargo, la mezcla entre APC OxG CxL y APC DxP trae resultados negativos para las refinadoras de aceite de palma, como un consumo mayor de tierras de blanqueo. Por esto es preciso que se procese en condiciones diferentes a las convencionalmente empleadas para la refinación del APC DxP puro. En consecuencia, la mezcla de estos aceites genera como resultado cambios imprevistos en las operaciones estandarizadas en las refinadoras; además, tiene efectos sobre la calidad de la oleína y la estearina que se producen en estas mismas industrias. Así pues, un porcentaje alto de APC OxG CxL en mezcla con APC DxP disminuye la cantidad de estearina, fracción más sólida, compuesta, principalmente, por AGS; y aumenta la proporción de oleína, fracción más líquida con mayor contenido de AGMI y AGPI (González *et al.*, 2019). Dependiendo

de los mercados objetivos de las refinadoras, dichas mezclas podrían afectar las relaciones comerciales de estas mismas industrias.

El contenido de AGS (láurico, mirístico, palmítico, esteárico y araquídico), AGM (oleico) y AGPI (linoleico) en el APC DxP se ve alterado al modificar la matriz natural del aceite como resultado de su mezcla con APC OxG CxL (Figura 17.7). Estas mezclas provocan variaciones significativas en el PAG de los aceites resultantes, en dependencia con la concentración de cada tipo de aceite en la mixtura (González *et al.*, 2019). El porcentaje de mezcla entre APC DxP y APC OxG CxL puede establecerse mediante la determinación del PAG utilizando cromatografía de gases; sin embargo, esta técnica no es de uso común en las plantas de beneficio, debido, en un principio, a los elevados costos relacionados con su implementación y el mantenimiento de los equipos. Por ello, Cenipalma propone establecer el contenido de APC OxG CxL (%) presente en una mezcla con APC DxP, a partir de la relación encontrada entre esta variable y el valor del IY de la matriz aceitosa resultante. En el APC, el IY puede determinarse por medio de los métodos de Wijs o Hanus, procedimientos volumétricos estándar de laboratorio, de bajo costo y de fácil implementación en las plantas de beneficio.

A partir de los resultados obtenidos en el estudio se establecieron algunos de los valores estadísticos descriptivos, que dieron indicios clave acerca del comportamiento del conjunto de datos. Adicionalmente, se obtuvo un modelo de regresión lineal simple

(Figura 17.8). Dicho modelo ayuda a visualizar la relación entre el IY y los porcentajes de mezcla indicados en la Figura 17.8.

La relación encontrada entre el IY y las mezclas permitió ajustar el modelo descrito por la ecuación 17.1:

$$IY = 0,149 \times (\% \text{ m/m APC CxL en mezcla con APC DxP}) + 54,125$$

(Ec. 17.1)

En esta ecuación, el porcentaje de APC OxG CxL en las mezclas explica los cambios en el valor del IY en un 98,71 %, lo que indica un buen ajuste del modelo (Figura 17.8). El coeficiente de determinación encontrado (0,9871) mostró, igualmente, una gran significancia estadística e indica que, por cada unidad que se cambia en la mezcla, el valor del IY se incrementa en 0,149 unidades. Por tanto, este modelo permite estimar el valor del IY para cualquier mezcla de APC

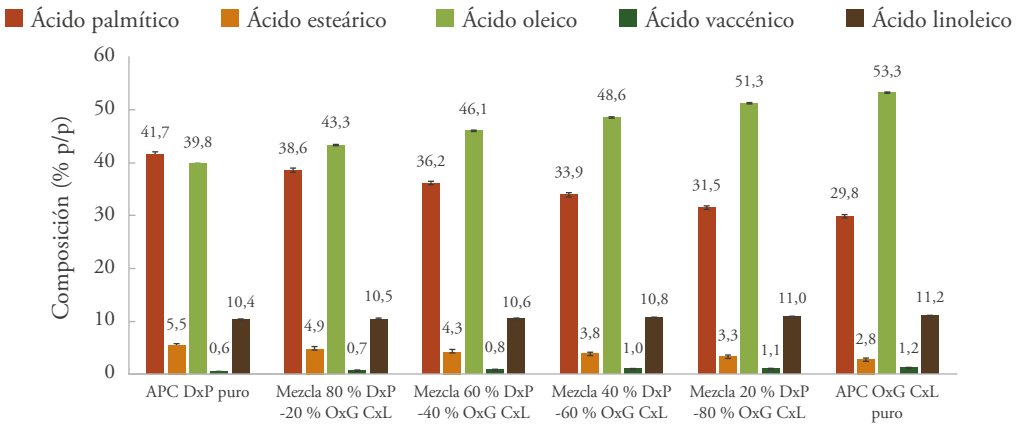


Figura 17.7. Perfil de ácidos grasos de las muestras de aceites procedentes de cultivares DxP e híbridos OxG CxL puros y las mezclas estudiadas de ellos.

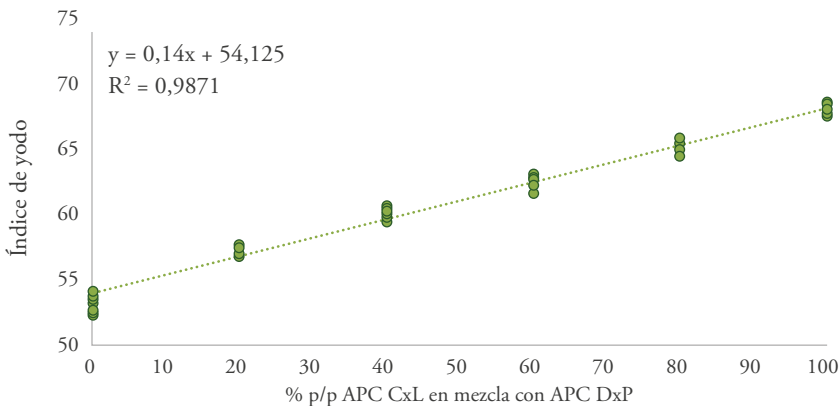


Figura 17.8. Modelo de regresión lineal que relaciona el valor del IY y la composición porcentual másica del APC OxG CxL en mezcla con APC DxP.

DxP y APC OxG CxL. En un ámbito práctico, en las plantas de beneficio, el modelo de regresión lineal propuesto (Figura 17.8) puede usarse para determinar de manera aproximada el porcentaje de APC OxG CxL en la mezcla con un valor estimado para el IY según el método de Wijs y la ecuación 17.2.

$$\% \text{ m/m APC CxL en mezcla con APC DxP} = \frac{\text{IY} - 54,125}{0,149}$$

(Ec. 17.2)

17.5. APC OxG como materia prima en la formulación de alimentos para animales

La gran demanda de productos de origen animal, tales como carnes, huevos, lácteos y derivados, y el crecimiento dinámico de esta industria han generado la necesidad de evaluar diferentes alternativas como fuente de alimento, debido a la poca disponibilidad y al alto costo de los ingredientes utilizados tradicionalmente para la nutrición animal. En los últimos años, diversos aceites vegetales, como el de soya, colza, girasol y palma, entre otros, han sido evaluados como fuente nutricional y de energía en las dietas animales, es decir, por su capacidad para proporcionar AG esenciales; por ejemplo, ácido linoleico, que no pueden ser sintetizados por el animal, pero que resultan necesarios para procesos metabólicos y para la formación celular. Es así como los alimentos que proporcionan AG contribuyen a la absorción de vitaminas liposolubles (A, D, E y K) y suministran AG bioactivos específicos (Tomkins & Drackley, 2010), especialmente para especies bovinas, porcinas, avícolas y, en menor

proporción, caprinas, equinas, cunícolas y animales de compañía (canina y felina). El consumo de grasas y aceites para la industria de nutrición animal se estima entre 8 y 10 millones de toneladas al año (Tomkins & Drackley, 2010).

El APC DxP y el APC OxG, así como parte de la biomasa derivada de la agroindustria de la palma de aceite, han sido considerados como una buena alternativa para la elaboración de alimentos animales, por las propiedades nutricionales identificadas en estos productos. El APC OxG se caracteriza por tener un gran contenido de AGMI, AGPI y de compuestos menores de valor nutricional, como tocotrienoles y carotenos (Tabla 17.1). Las características bromatológicas de este aceite lo convierten en una buena alternativa para incluirlo como materia prima en la nutrición animal. No obstante, debe evaluarse el porcentaje de participación de este insumo en las formulaciones de las dietas y la forma de suministro, que puede corresponder a sal de calcio, gránulos, cristales, piensos, etc. De acuerdo con algunos estudios, el contenido de aceite en sustratos alimentarios para animales está en un rango del 5 % al 20 % (Tomkins & Drackley, 2010), el cual varía según sea la capacidad digestiva de AG de la especie y la edad de los animales, así como de la calidad y las propiedades características de los alimentos, es decir, humedad, rigidez, compactación, textura, etc.

De otro lado, en estudios realizados por Tomkins & Drackley (2010) y Méndez (2006)

se observó que algunos de los beneficios en los animales a los que se les incluyó en su dieta APC OxG fueron los siguientes: 1) contribución a la ganancia promedio de peso corporal y la producción de leche (de 0,9 kg·día⁻¹ a 1,8 kg·día⁻¹, en vacas), carne o huevos; 2) incremento del porcentaje de materia grasa (=0,38 %) y de proteína en la leche (=0,23 %), atribuido a la multiplicación de lípidos en la sangre, responsables de más del 40 % de los precursores de la grasa láctea; 3) aumento en la fertilidad y decrecimiento en las pérdidas embrionarias; 4) disminución en el uso de alimentos con grandes contenidos de almidones y azúcares, los cuales fomentan el síndrome de acidosis ruminal aguda, para el caso de las especies ruminantes; 5) mejoras en la palatabilidad del alimento; y 6) reducción del estrés calórico (déficit o exceso de calor), debido a que es una gran fuente de energía. Finalmente, los estudios concluyeron que hay mejoras generales en la salud y en el bienestar de los animales.

Sumado a lo anterior, un estudio realizado en conejos por Méndez (2006), en el que se evaluaron seis diferentes tipos de alimentación, demostró que los conejos a los que se les incluyó APC OxG en su nutrición tuvieron una ganancia diaria promedio en su peso de 20,9 g y un peso final superior (2.341,3 g) con respecto a otros de los individuos alimentados con otros productos (conejina, APC DxP, aceite de girasol, aceite de soya y manteca), para los cuales se identificaron valores entre 1.513,8 g y 1.998,8 g. De igual manera, el consumo de alimento diario también aumentó (167 g·animal⁻¹), lo

que indicó mejor palatabilidad en relación con las demás opciones. Una de las conclusiones de este estudio fue que el APC OxG, por ser un compuesto rico en AGMI, AGPI y en antioxidantes, como tocotrienoles y carotenos, favoreció la digestibilidad y el peso ideal de sacrificio de los conejos en menor tiempo.

Los estudios descritos anteriormente ejemplifican el potencial del APC OxG como insumo en la nutrición y dietas animales y ayudan a establecer la base para profundizar en la caracterización de potenciales productos destinados a la alimentación de diferentes especies y comprender mucho más acerca de los beneficios industriales que pueden obtenerse de esta materia prima.

17.6. Oleoquímicos básicos y potenciales derivados del APC OxG

Por la versatilidad de su composición química, es posible utilizar el APC extraído de distintos cultivares híbridos OxG como materia prima para la producción de polímeros, biocombustibles, ácidos grasos, glicerol y concentrados de fitonutrientes para distintas aplicaciones, entre otros oleoquímicos que agregan valor a la cadena productiva del aceite de palma. En la Figura 17.9 se presentan algunos de los oleoquímicos derivables del APC OxG, potencialmente escalables en el ámbito industrial. A continuación, se resaltan algunos de los potenciales productos.

17.6.1. Polioles

La transformación química de los triglicéridos que forman parte de los aceites y grasas permite la generación de múltiples tipos de monómeros, entre los que se destacan los aceites epoxidados, los polioles, los diácidos grasos, los hidroxiaácidos, las aminas y los compuestos que contienen cadenas grasas insaturadas (Angulo, 2018).

Los polioles o alcoholes polihidroxílicos son compuestos químicos que contienen en su estructura más de un grupo hidroxilo reactivo. Los poliuretanos (PU) son polímeros de gran importancia industrial que se fabrican, principalmente, por la reacción entre isocianatos (aromáticos o alifáticos) y polioles de diferentes tipos (Li *et al.*, 2015; Malik & Kaur, 2018). La posibilidad de obtener PU con una variedad de propiedades lleva a que estos sean de interés en varias industrias para la fabricación de diversos materiales, entre los que sobresalen las espumas flexibles y rígidas, los recubrimientos, los adhesivos y los elastómeros.

De acuerdo con Koleske & Charleston (2012), los polioles más utilizados para la formulación de PU son: polioles poliéteres, que se obtienen por la polimerización de éteres cíclicos; polioles poliésteres, que se producen por la polimerización de polialcoholes con un ácido dicarboxílico o un diéster, y polioles tipo carbonato, los cuales se generan como resultado de la condensación de dioles no vecinales. Esta variabilidad de polioles se emplea en la fabricación

de productos como fibras, sellantes, pinturas, espumas, adhesivos y tintas; además, han sido utilizados en las industrias de alimentos y de productos farmacéuticos.

Los polioles grasos naturales (NOP, por sus siglas en inglés) son los más utilizados comercialmente (Hapiot & Monflier, 2019). Para la obtención de los NOP se requiere de aceites vegetales con un gran contenido de AG insaturados o de hidroxiaácidos. Si bien es posible obtener NOP a partir de APC DxP, por su poco contenido de AGMI y de AGPI (Tabla 17.1), se pueden conseguir polioles con bajo contenido de grupos hidroxilos reactivos (OH). En consecuencia, se recomienda utilizar como materia prima la fracción líquida obtenida del prensado del APC DxP o el APC OxG CxL, debido a que contiene una fracción más grande de AGMI y AGPI en su matriz lipídica (Figura 17.3).

Como se mencionó en los numerales 17.2.1 y 17.2.2 del presente capítulo, el APC OxG tiene características que lo diferencian del APC procedente de los cultivares DxP. Los polioles se pueden obtener a partir de APC DxP; sin embargo, este aceite presenta un IY entre 50 y 55 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Organización Mundial de la Salud, 2019), lo que limita la posibilidad de su transformación en polioles útiles para la fabricación de polímeros. En general, los polioles de aceites vegetales se obtienen a partir de materias primas con un IY mínimo de 60, como es el caso del APC OxG CxL (Figura 17.3). Esencialmente, los triglicéridos

del APC OxG CxL contienen una mayor proporción de AGMI y de AGPI y un menor contenido de AGS (Tabla 17.2), lo que permite alcanzar un IY \geq 68 en este tipo de aceite en crudo (Tabla 17.1) y cercano a 75 después de su fraccionamiento. Dicho valor es adecuado para esta variable en la síntesis de polioles de aceite de palma.

En la Figura 17.9 se presentan las rutas de producción para la manufactura de polioles a partir de APC. En general, los polioles comerciales más comunes para la producción de poliésteres y PU son los NOP. Típicamente, el proceso de producción de los NOP incluye una etapa de epoxidación de los AGMI y de los AGPI, seguido de la apertura del anillo oxirano mediante hidroxilación (Kirpluks *et al.*, 2013).

Los polioles naturales se han destacado en el ámbito industrial como materias primas para la producción de PU, debido a que los productos obtenidos tienen características y propiedades similares a las de productos elaborados a base de petroquímicos. Hoy en día, gran parte de los PU biobasados producidos en el mundo son considerados parcialmente renovables, gracias a que se derivan de la cadena de un polioli; no obstante, el contenido de isocianatos que adquieren del petróleo no permite que sean considerados 100 % renovables. Con investigaciones que ayuden a mejorar los procesos y desarrollar nuevas tecnologías, se espera viabilizar la implementación industrial de los PU sin isocianatos (Kathalewar *et al.*, 2013) y de esta manera impulsar aún más el uso del

APC OxG CxL al transformarlo en oleoquímicos para la fabricación de polímeros.

Actualmente, el mercado de los polímeros biobasados está concentrado en la producción de PU obtenidos a partir de polioles oleoquímicos. De conformidad con estudios hechos por Cenipalma, el contenido de polioles en los PU representa entre el 30 % y el 50 % del peso, lo que lleva a estimar un mercado para los polioles grasos cercano a las 2 t anuales, sin tener en cuenta el crecimiento del mercado de los PU y el uso en la producción de poliésteres y resinas, entre otros.

El valor de los polioles oleoquímicos comerciales varía sustancialmente, desde 1 USD·kg⁻¹ hasta precios superiores a los 12 USD·kg⁻¹ (el valor promedio del mercado global está cercano a 3,6 USD·kg⁻¹); depende de la materia prima oleoquímica, del grado de funcionalidad, del proceso de producción (por ejemplo, epoxidación o hidroformilación) y de la estructura química del polioli, entre otros (Grand View Research, 2019).

17.6.2. Potencial del APC OxG para la producción de biodiésel

El biodiésel es una mezcla de monoalquil ésteres de AG de cadena larga, derivados de aceites vegetales o grasas animales (Benjumea *et al.*, 2008; Manik *et al.*, 2013), el cual ha sido implementado como combustible alternativo de origen biológico en motores diésel (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2006).

Las tecnologías para la producción de biodiésel en diferentes partes del mundo están sujetas a la disponibilidad de la materia prima. En la Unión Europea, la principal fuente para la producción de biodiésel es el aceite de soya, seguido por los aceites de colza y de palma, mientras que en América y en Asia prevalece el uso del aceite de palma para la obtención de este biocombustible, seguido por los aceites de soya, colza y *Jatropha curcas* L. (Ziolkowska, 2019). En el ámbito industrial, el biodiésel de palma se obtiene por medio de una reacción química de transesterificación, en la cual los triglicéridos del AP-RBD y un alcohol en medio catalizado dan como resultado ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos y glicerol (Knothe *et al.*, 2005; Pleanjai & Gheewala, 2009). De otro lado, parte del glicerol (o glicerina) asociado a la estructura de los TG, una pequeña fracción de TG remanentes y mínimas trazas de algunos productos de reacción, tales como agua, metanol, restos de catalizador, sales inorgánicas, jabones y AGL, pueden permanecer en el biodiésel de palma aun después de ser purificado (Knothe, 2010). La glicerina remanente en el biodiésel purificado puede ocasionar problemas en los motores diésel. Además, al acumularse en los tanques de combustible, originaría obstrucciones en los sistemas de dosificación de combustible, suciedad en los inyectores y depósitos en las válvulas (Hayyan *et al.*, 2010). Debido a esta situación, actualmente, es común encontrar etapas adicionales a las ya empleadas para la producción convencional del biodiésel de palma en las refinadoras, como es el caso

de la destilación al vacío, la cual permite obtener biodiésel de más pureza y glicerina comercializable (Xie *et al.*, 2019).

Las especies de AG en el aceite vegetal o en la grasa animal determinan las propiedades del biodiésel obtenido a partir de estos (Alptekin *et al.*, 2014); en consecuencia, las variaciones en el PAG de estas materias primas traen como resultado biocombustibles con diferentes propiedades fisicoquímicas (Folayan *et al.*, 2019). Actualmente en Colombia, el biodiésel de palma se produce a partir de APC DxP, en mayor medida (Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, 2017), o con base en mezclas entre APC DxP (-90 %) y APC OxG (-10 %).

Tanto APC OxG CxD como el APC OxG CxL contienen, en promedio, una mayor cantidad de AGMI que el APC DxP (Figura 17.3), pero, el contenido de AGPI es similar entre los diferentes cultivares híbridos OxG y de *E. guineensis* que han sido objeto de estudio por Cenipalma (Tabla 17.1). En general, un contenido mayor de AGMI en el APC mejora las propiedades de flujo en frío del biodiésel, tales como el punto de nube, el punto de fluidez y el punto de obstrucción del filtro en frío (Bhuiya *et al.*, 2016; Lanjekar & Deshmukh, 2016; Sierra-Cantor & Guerrero-Fajardo, 2017). Por estas características, los aceites vegetales con altos niveles de AGMI son preferidos para la producción de biodiésel, ya que no incrementan la oxidación y disminuyen las emisiones de óxido de nitrógeno. No obstante, un gran contenido de AGPI en los aceites afecta variables como

la viscosidad, la estabilidad a la oxidación y el índice de cetano en el biodiésel (Mondal *et al.*, 2019; Woyann *et al.*, 2019), y todas estas son determinantes para la buena calidad de este biocombustible.

La estabilidad de la oxidación representa la resistencia a los cambios fisicoquímicos del biodiésel causados por la interacción con el ambiente durante su almacenamiento (McCormick *et al.*, 2007). En el aspecto molecular, los AGPI contienen sitios más reactivos que dan lugar a la secuencia de autooxidación del biodiésel. No obstante, el uso de APC OxG como materia prima para la producción de biodiésel podría no tener afectaciones importantes sobre la oxidación del producto por el gran contenido de AGMI, por un contenido de AGPI semejante al de los cultivares DXP (Figura 17.3) y por la concentración de antioxidantes en este tipo de materias primas (Figura 17.7). En este sentido, respecto a la oxidación, podría presentar características similares a las del biodiésel obtenido a partir de APC DXP (Zuleta *et al.*, 2012).

Por otra parte, las propiedades de flujo en frío del biodiésel limitan su uso como combustible, puro o mezclado, en grandes proporciones (%) con el combustible diésel de petróleo. Las mejores propiedades de flujo en frío se dan en menor punto de nube y de fluidez, debido a que esto evita la formación de cristales que pueden bloquear el paso de las líneas de combustible y los filtros en motores de inyección directa. Como consecuencia de que el biodiésel de palma,

producido a partir de APC DXP, tuviese un punto de fluidez de 9 °C y un punto de nube de 16 °C, su desempeño era objeto de cuestionamientos para su uso a bajas temperaturas. Asimismo, el punto de obstrucción del filtro en frío (10 °C) es alto en comparación con los puntos de obstrucción del filtro en frío reportados para materias primas como soya (-5 °C) o colza (-10 °C) (Benjumea *et al.*, 2007; Ramos *et al.*, 2009). Sin embargo, en 2009, en Colombia, se llevó a cabo un estudio con el que se buscó evaluar el desempeño de cinco mezclas de diésel y biodiésel de palma (B5, B10, B20, B30 y B50) con diésel fósil (B0), en condiciones normales de operación de buses articulados del sistema de transporte masivo de Bogotá, ciudad situada a una altura de 2.600 metros sobre el nivel del mar y con una temperatura promedio de 14 °C. De los resultados pudo destacarse que las mezclas de diésel y biodiésel de palma hasta en un 50 % (B5, B10, B20, B30 y B50) cumplieron con las especificaciones de calidad establecidas para el combustible diésel en Colombia (véase NTC 5444:2018) (Amado *et al.*, 2008). Lo anterior refutó la hipótesis inicial sobre el uso del biodiésel de palma a bajas temperaturas. En adición, el biodiésel de palma producido a partir de APC OxG podría mejorar las propiedades de flujo en frío, atribuidas al biodiésel de palma producido a partir de APC DXP, como consecuencia de una mayor concentración de AGMI, especialmente en el cultivar híbrido OxG CxL.

Con respecto a la viscosidad cinemática del biodiésel, parámetro que representa la

medida de la resistencia del fluido al desplazamiento, una alta viscosidad puede provocar daños en los motores diésel, debido a que afecta la atomización de inyección de combustible en la cámara de combustión. A causa de que la viscosidad aumenta con la longitud de la cadena y decrece con el número de dobles enlaces, o de insaturación en la cadena, se infiere que más contenido de AGMI en el APC OxG influiría en la disminución de la viscosidad. Puesto que el rango aceptado para la viscosidad en el biodiésel es suficientemente amplio (de $1,9 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ a $6,0 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$), es posible que el biodiésel producido a partir de APC OxG cumpla las especificaciones de calidad establecidas en las normas ASTM D6751 de la American Society for Testing and Materials o en la EN 14214, del European Committee for Standardization, que en el marco normativo colombiano se incorporan con la Resolución 182087 de 2007.

17.6.3 Extracción y purificación de fitocompuestos

El APC OxG contiene grandes concentraciones de biocompuestos de valor, como carotenoides, tocoferoles, tocotrienoles, escualeno y polifenoles (Tabla 17.1), moléculas que tienen campos de aplicación en industrias tales como la alimentaria, la cosmética y la farmacéutica. Diversos mecanismos han sido implementados para la extracción y purificación de los fitonutrientes presentes en el APC o en fracciones lipídicas concentradas de este tipo de aceites naturales. Tales procesos comprenden etapas como la esterificación y transesterificación (Ngurah, *et. al*,

2019), la destilación molecular y la cristalización (Sawadikiat *et al.*, 2015), la extracción con fluidos supercríticos (Han & Choo, 2015; Ibáñez *et al.*, 2002; Iftikhar *et al.*, 2017), la extracción con solventes orgánicos y el fraccionamiento (Kua *et al.*, 2018), entre otros. Algunas de estas metodologías están direccionadas hacia la recuperación de ubiquinonas, escualeno (Al-Darmaki *et al.*, 2012; Md Sarip *et al.*, 2016; Phoon *et al.*, 2018), carotenoides y tocoles (Md Sarip *et al.*, 2016; Sangkharak *et al.*, 2016; Teh *et al.*, 2017; Tehlah *et al.*, 2017). La Figura 17.10 muestra el grupo de tecnologías potencialmente aplicables para la extracción de fitonutrientes contenidos en el mesocarpio o en el APC del híbrido OxG.

Una de las principales ventajas de estas técnicas es la obtención de compuestos de interés altamente concentrados con buenos rendimientos en el proceso; sin embargo, algunas de estas metodologías son muy costosas, y otras, poco viables para escalarlas a un nivel industrial. De otro lado, las tecnologías de separación por membranas y adsorción mediante resinas sintéticas han mostrado resultados prometedores en la obtención de extractos ricos en biocompuestos a partir de diferentes aceites, por lo que, actualmente, son una potencial alternativa para la extracción de los biocompuestos que se encuentran en el APC OxG CxL. Ambos métodos, aún con estudios crecientes en la recuperación de fitonutrientes de palma, pueden ser explorados y explotados. Las tecnologías de membranas consisten en la separación de componentes de interés que, de manera general, son consecuencia de una combinación

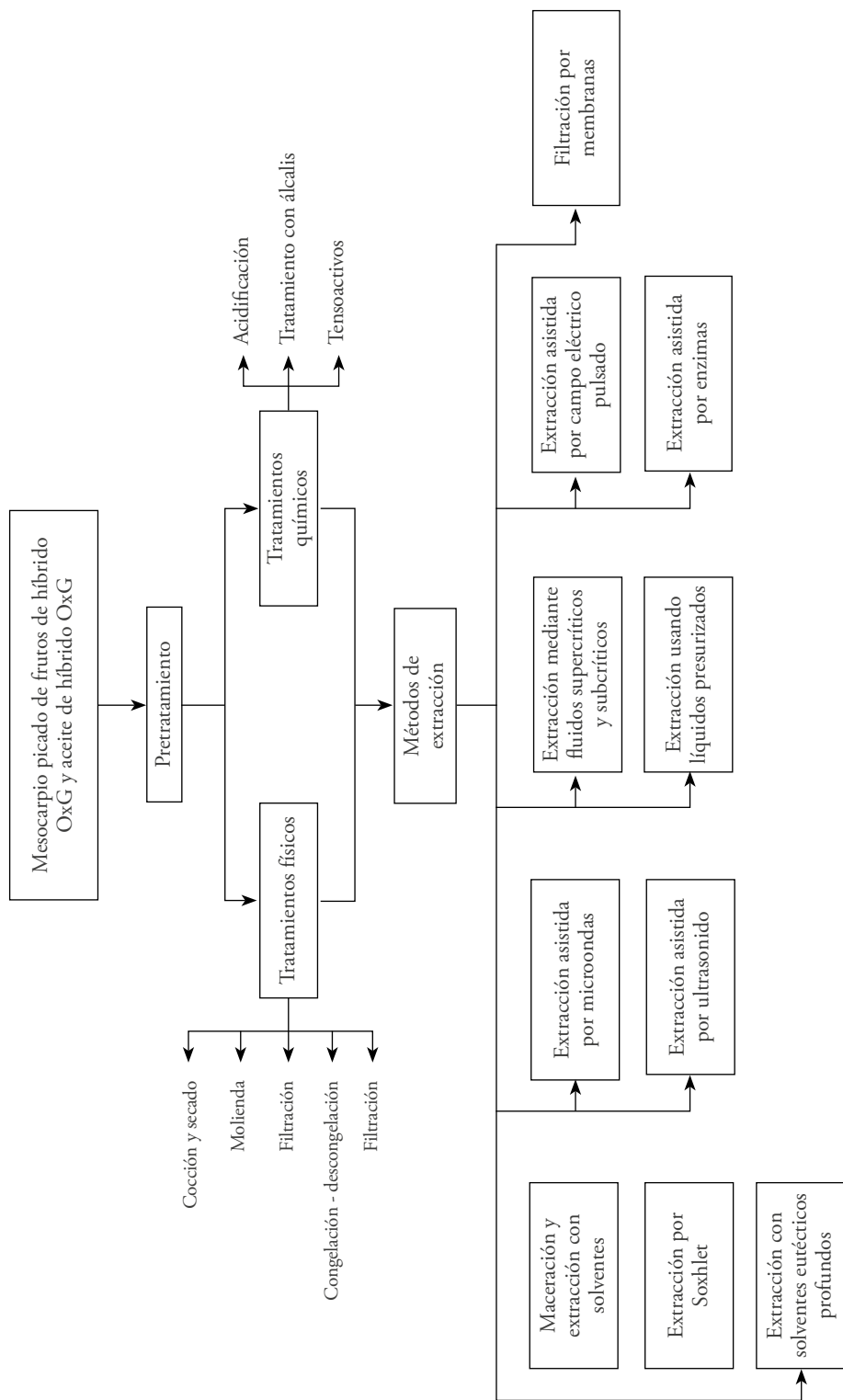


Figura 17.10. Metodologías utilizables para la extracción y purificación de fitocompuestos contenidos en el mesocarpio o en el APC del híbrido interespecífico OxG. Tomado y modificado de Gast *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2006; Lau *et al.*, 2007; Maarasyid *et al.*, 2014; Choo *et al.*, 2002; Gutiérrez *et al.*, 2014.

de efectos estéricos de Donnan, dieléctricos y de transporte (Mohammad *et al.*, 2019). Esta separación se lleva a cabo con la aplicación de una fuerza motriz que conduciría el APC a través de una membrana, en este caso, de nanofiltración, donde se esperaría retener los biocompuestos entre 350 y 1.000 Da a una presión de operación entre 1 MPa y 4 MPa (Morais de *et al.*, 2009; Nakao, 1994). De acuerdo con esto, dicha tecnología ayudaría a retener carotenoides, tocoferoles y tocotrienoles contenidos en el APC OxG CxL, puesto que su peso molecular varía entre los 300 y los 550 Da, aproximadamente (α -caroteno, $C_{40}H_{56}$, 536 Da; β -caroteno, $C_{40}H_{56}$, 536 Da; α -tocoferol, $C_{29}H_{50}O_2$, 430 Da; β -tocotrienol, $C_{29}H_{44}O_2$, 424 Da; γ -tocotrienol, $C_{28}H_{42}O_2$, 410 Da; δ -tocotrienol, $C_{27}H_{40}O_2$, 396 Da). Igualmente, el uso de esta tecnología abriría la posibilidad de recuperar compuestos bioactivos de palma con propiedades funcionales y nutricionales. De momento, son pocos los estudios realizados para este fin (Chiu *et al.*, 2009; Darnoko & Cheryan, 2006).

De otro lado, la tecnología de adsorción y desorción es una estrategia empleada como proceso de separación en la que los componentes de interés se unen a un adsorbente sólido y se recuperan mediante un proceso inverso, denominado desorción, seguido por una extracción con solvente (Phoon *et al.*, 2018). De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés), un proceso de adsorción se define como el enriquecimiento de uno o más componentes cerca de una

interfaz, en el cual una de las fases, necesariamente, es un sólido, y la otra, un fluido (líquido o gaseoso) (Rouquerol *et al.*, 2013). La desorción, por su parte, es un fenómeno descrito como un proceso inverso a la adsorción. En el caso específico de la adsorción de biocompuestos presentes en el APC OxG CxL, el adsorbente es la fase sólida definida según criterio técnico (polaridad, porosidad y desorción) y la fase líquida corresponde a los componentes menores en el APC OxG CxL, es decir, carotenoides, tocoferoles y tocotrienoles solubilizados en un sustrato líquido.

De manera general, se pueden enumerar diferentes materiales adsorbentes, algunos de origen natural, como el carbón activado, tierras de blanqueo, ceniza de cáscara de arroz, almidón, arcilla y montmorillonita, y adsorbentes de origen sintético, como sílica gel, poliestireno sulfonato, copolímero divinil benceno estireno, Diaion HP (de las series Diaion HP 10-50) y series SP (SP 800-875, SP 205, SP 207), Relite Exa 32 y Relite Exa 50 (Karo *et al.*, 2014; Latip *et al.*, 2000). De estos, los más empleados para la adsorción de carotenoides y de otros componentes menores en el APC son las resinas de origen sintético (Karo *et al.*, 2014; Phoon *et al.*, 2018).

17.7. Conclusiones

Las características fisicoquímicas del APC obtenido de los diferentes cultivares del híbrido interespecífico OxG difieren sustancialmente de las propiedades encontradas

de manera común en el APC DxP. Esta situación representa nuevos retos y oportunidades para el sector palmero colombiano y para las refinadoras de APC. El panorama se vuelve aún más complejo al considerar las singularidades de los aceites que se obtienen de cada uno de los cultivares híbridos OxG en virtud de las variaciones en la composición porcentual másica de los AGS, AGMI y AGPI y del contenido total de compuestos menores. Sin embargo, las características distintivas y de diferenciación entre el APC OxG y el APC DxP son, en cierta medida, las que permiten explotar el valor agregado del híbrido interespecífico OxG.

De conformidad con diferentes trabajos adelantados por Cenipalma, el contenido de AGL es cuantitativamente superior en el APC DxP que en el APC procedente de los diferentes cultivares híbridos OxG. Este fenómeno es atribuido, en primera medida, a una mayor actividad lipasa, que prevalece en los cultivares DxP, la cual es inferior en los cruces de híbridos OxG y mínima en los frutos producidos por *E. oleifera*. En segunda instancia, un bajo contenido de AGL en el APC es el resultado de buenas prácticas de cultivo, cosecha y procesamiento. Dada esta situación, ciertos cultivares híbridos OxG pueden preferirse para la obtención de APC con bajos niveles de AGL.

Por otra parte, el APC es considerado un sustrato lipídico rico en compuestos antioxidantes, como los polifenoles que, junto con los tocoferoles, los tocotrienoles, los carotenoides, el escualeno, los fitoesteroles y

los fosfolípidos, constituyen la mayor parte del grupo de compuestos menores en dicho aceite. El APC OxG CxL se destaca frente al APC DxP y al APC de otros de los cultivares híbridos OxG por presentar un contenido promedio superior de compuestos fenólicos, vitamina E y carotenoides, los cuales son potentes antioxidantes capaces de inhibir el efecto negativo de los radicales libres y de otras especies reactivas de oxígeno en sistemas biológicos. Lo anterior puede traducirse en nuevas oportunidades en el mercado para el APC del cultivar OxG CxL, dada la creciente demanda global de fitoquímicos con propiedades funcionales y nutricionales y de origen natural.

De otro lado, dada la relación encontrada entre el valor del IY y el PAG en las muestras de APC constituido a partir de la mezcla entre APC procedente de diferentes cultivares de palma, pudo obtenerse un modelo que permite determinar la pureza del APC OxG o del APC DxP y establecer el nivel de mezcla entre ambos tipos de aceite. En las refinerías de APC, dichas mezclas tienden a ocasionar cambios en las operaciones ya estandarizadas para la refinación, el blanqueo y el fraccionamiento de este tipo de materias primas, al igual que en el rendimiento y en las propiedades fisicoquímicas de la oleína y de la estearina producida. Dicha situación hace que se generen productos que no cumplen con los criterios de calidad estipulados en el mercado. Con el fin de reducir la mezcla de estos aceites, los RFF deben segregarse, según su origen genético, durante su procesamiento y su almacenamiento, lo mismo

que el APC resultante de su beneficio en las plantas. Esta práctica contribuirá a la reducción de limitaciones y restricciones durante las operaciones de compra y venta del APC entre las refinadoras y las plantas de beneficio de palma de aceite.

Por último, se ha identificado que el APC OxG puede ser materia prima en la manufactura de diversos oleoquímicos básicos y derivados que agregan valor a la cadena productiva del aceite de palma. Es

así como el alto contenido de AGMI en el APC OxG puede mejorar ciertas propiedades del flujo en frío del biodiésel. De otro lado, el APC OxG CxL puede aprovecharse en la fabricación de polioles y en la formulación de alimentos para consumo animal. Además, la extracción, concentración y purificación de fitonutrientes a partir de APC OxG CxL, lograda con distintas tecnologías, forma parte de otra de las aplicaciones potencialmente escalables en el ámbito industrial para este tipo de aceite.

17.8. Referencias bibliográficas

- Adewale, P., Mba, O., Dumont, M. J., Ngadi, M., & Cocciardi, R. (2014). Determination of the iodine value and the free fatty acid content of waste animal fat blends using FT-NIR. *Vibrational Spectroscopy*, 72, 72-78.
- Aid, F. (2019). Plant lipid metabolism. In R. Valenzuela (Ed.), *Advances in lipid metabolism*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81355>
- Al-Darmaki, N., Lu, T., Al-Duri, B., Harris, J. B., Favre, T. L. F., Bhaggan, K., & Santos, R. C. D. (2012). Isothermal and temperature gradient supercritical fluid extraction and fractionation of squalene from palm fatty acid distillate using compressed carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*, 61, 108-114.
- Ali, B. M., Boothapandi, M., & Nasar, A. S. (2020). Nitric oxide, DPPH and hydrogen peroxide radical scavenging activity of TEMPO terminated polyurethane dendrimers: Data supporting antioxidant activity of radical dendrimers. *Data in Brief*, 28, 104972. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104972>
- Alptekin, E., Canakci, M., & Sanli, H. (2014). Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. *Waste Management*, 34(11), 2146-2154.
- Amado, M. A., García, J. A., Carranza, R., Cuéllar, M., Torres, J. A., Acero, J. R., Sarmiento, J. A., Sarmiento, J. L., Cabuya, D. y Rincón, Ó. (2008). Pruebas de larga duración con biodiésel de palma en una flota de servicio público en Bogotá. *Palmas*, 29(4), 11-20. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1360/1360>
- Angulo, B. (2018). *Transformación de derivados de ácidos grasos para la obtención de productos de interés industrial* [tesis doctoral, Universidad de Zaragoza]. Repositorio institucional UZ. <https://zaguan.unizar.es/record/86263/files/TESIS-2019-170.pdf>
- Azeman, N. H., Yusof, N. A., & Othman, A. I. (2015). Detection of free fatty acid in crude palm oil. *Asian Journal of Chemistry*, 27(5), 1569-1573. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2015.17810>
- Bao, Y., Ren, X., Zhu, Y., Zhang, Y., Peng, Z., & Zhou, G. (2020). Comparison of lipid radical scavenging capacity of spice extract *in situ* in roast beef with DPPH and peroxy radical scavenging capacities *in vitro* models. *LWT*, 130, 109626.
- Bartella, L., Di Donna, L., Napoli, A., Sindona, G., & Mazzotti, F. (2019). High-throughput determination of vitamin E in extra virgin olive oil by paper spray tandem mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 411, 2885-2890.

- Bates, P. D., Stymne, S., & Ohlrogge, J. (2013). Biochemical pathways in seed oil synthesis. *Current Opinion in Plant Biology*, 16(3), 358-364. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.02.015>
- Benjumea, P., Agudelo, J., & Agudelo, A. (2008). Basic properties of palm oil biodiesel-diesel blends. *Fuel*, 87(10-11), 2069-2075.
- Benjumea, P. N., Agudelo, J. R. y Ríos, L. A. (2007). Propiedades de flujo a baja temperatura del biodiesel de aceite de palma. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (42), 94-104. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n42/n42a07.pdf>
- Bhuiya, M. M. K., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., Azad, A. K., & Hazrat, M. A. (2016). Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel - Part 2: Properties, performance and emission characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1129-1146.
- Bouaid, A., Vázquez, R., Martínez, M., & Aracil, J. (2016). Effect of free fatty acids contents on biodiesel quality. Pilot plant studies. *Fuel*, 174, 54-62.
- Brand-William, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25-30.
- Buddhan, S., Sivakumar, R., Dhandapani, N., Ganesan, B., & Anandan, R. (2007). Protective effect of dietary squalene supplementation on mitochondrial function in liver of aged rats. *Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 76(6), 349-355.
- Cadena, T., Prada, F., Perea, A., & Romero, H. M. (2013). Lipase activity, mesocarp oil content, and iodine value in oil palm fruits of *Elaeis guineensis*, *Elaeis oleifera*, and the interspecific hybrid OxG (*E. oleifera* x *E. guineensis*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(3), 674-680.
- Cebi, N., Yilmaz, M. T., Sagdic, O., Yuce, H., & Yelboga, E. (2017). Prediction of peroxide value in omega-3 rich microalgae oil by ATR-FTIR spectroscopy combined with chemometrics. *Food Chemistry*, 225, 188-196.
- Chaves, G., Ligarreto, G. A., & Cayón, D. G. (2018). Physicochemical characterization of bunches from American oil palm (*Elaeis oleifera* H.B.K. Cortes) and their hybrids with African oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Acta Agronómica*, 67(1), 168-176. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/62028/63827
- Cherie, D., Rini, R., & Makky, M. (2019). Determination of the optimum harvest window and quality attributes of oil palm fresh fruit bunch using non-destructive shortwave infrared spectroscopy. *AIP Conference Proceedings*, 2155(1), 020034. <https://doi.org/10.1063/1.5125538>

- Chiu, M. C., Morais de, C., & Gonçalves, Guaraldo, L. A. (2009). Carotenoids concentration of palm oil using membrane technology. *Desalination*, 245(1-3), 783-786.
- Choo, Y. M., Ching, B. S., Nang, H. L. L., Ngan, M. A., Han, N. M., Wei, P. H., & Basiron, Y. (2002). Production of phytonutrients (carotenes, vitamin E, sterols, squalene, co-enzyme Q and phospholipids) from palm methyl esters.
- Corredor, A., Martínez, G. y Silva, Á. (2008). Problemática de la pudrición del cogollo en Tumaco e instrumentos para su manejo y la renovación del cultivo. *Palmas*, 29(3), 11-16. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1353/1353>
- Cui, L., & Decker, E. A. (2016). Phospholipids in foods: prooxidants or antioxidants? *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(1), 18-31.
- Daniali, G., Jinap, S., Hajeb, P., Sanny, M., & Tan, C. P. (2016). Acrylamide formation in vegetable oils and animal fats during heat treatment. *Food Chemistry*, 212, 244-249.
- Darvin, M. E., Fluhr, J. W., Meinke, M. C., Zastrow, L., Sterry, W., & Lademann, J. (2011). Topical beta-carotene protects against infra-red-light-induced free radicals. *Experimental Dermatology*, 20(2), 125-129. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0625.2010.01191.x>
- Díaz, C. A., Forero, N. M., Ramírez, L., González, A., Fernández, C. A. y García, J. A. (2019). Tecnología NIR para plantas de beneficio: optimización de resultados de calidad de aceites y subproductos para tomar decisiones estratégicas durante el procesamiento de fruto. *Palmas*, 40(4), 179-206. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12953/12809>
- Duarte, C., da Linhares, E. J., Souza, B. A., Stahl, V., Oliveira de, A., Druzian, J. I., & Larroza, I. (2016). Physicochemical characterization and oxidative stability of microencapsulated crude palm oil by spray drying. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 124-136.
- Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. (2017). *Boletín*, 164.
- Finley, J. W., & DeMan, J. M. (2018). Lipids. In *Principles of food chemistry* (pp. 39-116). Springer.
- Folayan, A. J., Lucky, P. A., Aladejare, A. E., & Ayeni, A. O. (2019). Experimental investigation of the effect of fatty acids configuration, chain length, branching and degree of unsaturation on biodiesel fuel properties obtained from lauric oils, high-oleic and high-linoleic vegetable oil biomass. *Energy Reports*, 5, 793-806. <https://doi.org/10.1016/j.egyri.2019.06.013>
- Gast, K., Jungfer, M., Saure, C., & Brunner, G. (2005). Purification of tocopherols from edible oil. *The Journal of Supercritical Fluids*, 34(1), 17-25.

- Gibon, V., De Greyt, W., & Kellens, M. (2007). Palm oil refining. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(4), 315-335.
- González, A., Pataquiva, A., & García, J. A. (2021). Recovery of palm phytonutrients as a potential market for the by-products generated by palm oil mills and refineries-A review. *Food Bioscience*, 41, 100916.
- González, A., Pataquiva, A., & García, J. A. (2021). Characterization and response surface optimization driven ultrasonic nanoemulsification of oil with high phytonutrient concentration recovered from palm oil biodiesel distillation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 612, 125961.
- González, J., & Scanlon, M. G. (2018). Rheology and mechanical properties of fats. In A. G. Marangoni (Ed.), *Structure-Function Analysis of Edible* (2nd Ed.) (pp. 119-168). AOCS Press.
- González, A., García, J. A. y Dueñas, J. (2019). Índice de yodo: un parámetro determinante para establecer el nivel de mezcla entre aceites de palma crudos (APC) provenientes de cultivares DxP e híbridos O-G- "CxL". *Ceniavances*, 192. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/ceniavances/issue/view/1453/No.%20192>
- Goon, J. A., Nor, N. H. E., Abdul, S. M., Hamid, Z., & Wan, W. Z. (2017). Comparing palm oil tocotrienol rich fraction with α -tocopherol supplementation on oxidative stress in healthy older adults. *Clinical Nutrition Espen*, 21, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2017.07.004>
- Goujot, D., Cuvelier, M. E., Soto, P., & Courtois, F. (2019). A stoichio-kinetic model for a DPPH·-ferulic acid reaction. *Talanta*, 196, 284-292.
- Grand View Research. (2019). Polyurethane market analysis report by product (rigid foam, flexible foam, coatings), by application (furniture & interiors, construction, automotive), and segment forecasts, 2019-2025.
- Gul, K., Tak, A., Singh, A. K., Singh, P., Yousuf, B., & Wani, A. A. (2015). Chemistry, encapsulation, and health benefits of β -carotene - A review. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1018696>
- Han, N. M., May, C. Y., Ngan, M. A., Hock, C. C., & Ali Hashim, M. (2006). Separation of coenzyme Q10 in palm oil by supercritical fluid chromatography. *American Journal of Applied Sciences*, 3(7), 1929-1932.
- Han, N. M., & Choo, M. Y. (2015). Enhancing the separation and purification efficiency of palm oil carotenes using supercritical fluid chromatography. *Journal of Oil Palm Research*, 27(4), 387-392. <http://jopr.mpob.gov.my/wp-content/uploads/2015/12/jopr27dec-ng.pdf>
- Hanel, A., & Carlberg, C. (2020). Vitamin D and evolution: Pharmacologic implications. *Biochemical Pharmacology*, 173, 113595.

- Hapiot, F., & Monflier, E. (2019). Natural oil polyols. In R. Höfer, A. S. Matharu, Z. Zhang (Eds.), *Green chemistry for surface coatings, inks and adhesives: Sustainable applications* (pp. 260-284). The Royal Society of Chemistry.
- Harwood, J. L. (1996). Recent advances in the biosynthesis of plant fatty acids. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Lipids and Lipid Metabolism*, 1301(1-2), 7-56.
- Hassoun, A., Gudjónsdóttir, M., Prieto, M. A., Garcia-Oliveira, P., Simal-Gandara, J., Marini, F., Di Donato, F., D'Archivio, A. A., & Biancolillo, A. (2020). Application of novel techniques for monitoring quality changes in meat and fish products during traditional processing processes: Reconciling novelty and tradition. *Processes*, 8, 988. <https://doi.org/10.3390/PR8080988>
- Hayyan, M., Mjalli, F. S., Hashim, M. A., & AlNashef, I. M. (2010). A novel technique for separating glycerine from palm oil-based biodiesel using ionic liquids. *Fuel Processing Technology*, 91(1), 116-120.
- Hock, T. K., Chala, G. T., & Cheng, H. H. (2020). An innovative hybrid steam-microwave sterilization of palm oil fruits at atmospheric pressure. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102289.
- Ibáñez, E., Hurtado, A. M., Señoráns, F. J., & Reglero, G. (2002). Concentration of sterols and tocopherols from olive oil with supercritical carbon dioxide. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 79(12), 1255-1260.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2006). *NTC 5444:2006. Biodiesel para uso en motores diesel. Especificaciones*.
- Iftikhar, Tan, H., & Zhao, Y. (2017). Enrichment of β -carotene from palm oil using supercritical carbon dioxide pretreatment-solvent extraction technique. *LWT - Food Science and Technology*, 83, 262-266. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.026>
- Jamil, W., Solangi, S., Ali, M., Khan, K. M., Taha, M., & Khuhawar, M. Y. (2019). Syntheses, characterization, *in vitro* antiglycation and DPPH radical scavenging activities of isatin salicylhydrazidehydrazone and its Mn (II), Co (II), Ni (II), Cu (II), and Zn (II) metal complexes. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 2262-2269. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.02.015>
- Kademi, H. I., Ulusoy, B. H., & Hecer, C. (2019). Applications of miniaturized and portable near infrared spectroscopy (NIRS) for inspection and control of meat and meat products. *Food Reviews International*, 35(3), 201-220.
- Kandi, S., & Charles, A. L. (2019). Statistical comparative study between the conventional DPPH [rad] spectrophotometric and dropping DPPH [rad] analytical method without spectrophotometer: Evaluation for the advancement of antioxidant activity analysis. *Food Chemistry*, 287, 338-345.
- Karmowski, J., Hintze, V., Kschonsek, J., Killenberg, M., & Böhm, V. (2015). Antioxidant activities of tocopherols/tocotrienols and lipophilic antioxidant

- capacity of wheat, vegetable oils, milk and milk cream by using photochemiluminescence. *Food Chemistry*, 175, 593-600.
- Karo, J. A., Sembiring, S. B., Bangun, N., & Herawan, T. (2014). Adsorption and desorption carotenoids of raw palm oil (crude palm Oil/CPO) using salt M-Polystyrene sulfonate (M = Na, Mg, Ca, Sr and Ba). *Indian Journal of Science and Technology*, 7(12), 1925-1932. <https://indjst.org/articles/adsorption-and-desorption-carotenoids-of-raw-palm-oil-crude-palm-oilcpo-using-salt-m-polystyrene-sulfonate-m-na-mg-ca-sr-and-ba>
- Kathalewar, M. S., Joshi, P. B., Sabnis, A. S., & Malshe, V. C. (2013). Non-isocyanate polyurethanes: from chemistry to applications. *RSC Advances*, 3(13), 4110-4129.
- Kirpluks, M., Cabulis, U., Kurańska, M., & Prociak, A. (2013). Three different approaches for polyol synthesis from rapeseed oil. *Key Engineering Materials*, 559, 69-74.
- Knothe, G. (2010). Calidad del combustible biodiésel y la norma ASTM. *Palmas*, 31(Especial II), 162-171. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1563/1563>
- Knothe, G., Krahl, J. & Gerpen, J. (Eds.). (2005). *The Biodiesel Handbook*. AOCS Press.
- Koleske, J. V. & Charleston, W. V. (2012). Miscellaneous materials and coatings. In J. Koleske (Ed.), *Paint and coating testing manual* (15th Ed.) (pp. 128-135). ASTM International.
- Kua, Y. L., Gan, S., Morris, A., & Ng, H. K. (2018). Optimization of simultaneous carotenes and vitamin E (tocols) extraction from crude palm olein using response surface methodology. *Chemical Engineering Communications*, 205(5), 596-609.
- Lam, H. Y., Roy, P. K., & Chattopadhyay, S. (2020). Thermal degradation in edible oils by surface enhanced Raman spectroscopy calibrated with iodine values. *Vibrational Spectroscopy*, 106, 103018.
- Lanjekar, R. D., & Deshmukh, D. (2016). A review of the effect of the composition of biodiesel on NO_x emission, oxidative stability and cold flow properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1401-1411.
- Latip, R. A., Baharin, B. S., Che, Y. B., & Abdul, R. (2000). Evaluation of different types of synthetic adsorbents for carotene extraction from crude palm oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(12), 1277-1282.
- Li, Y., Luo, X., & Hu, S. (2015). *Bio-based polyols and polyurethanes*. Springer.
- Lim, T. K. (2012). *Elaeis guineensis*. In L. T. K. (Ed.), *Edible medicinal and non-medicinal plants* (pp. 335-392). Springer Netherlands.

- Liochev, S. I. (2013). Reactive oxygen species and the free radical theory of aging. *Free Radical Biology and Medicine*, 60, 1-4.
- Loganathan, R., Selvaduray, K. R., Nesaretnam, K., & Radhakrishnan, A. K. (2013). Differential and antagonistic effects of palm tocotrienols and other phytonutrients (carotenoids, squalene and coenzyme Q10) on breast cancer cells *in vitro*. *Journal of Oil Palm Research*, 25(2), 208-215. <http://jopr.mpob.gov.my/differential-and-antagonistic-effects-of-palm-tocotrienols-and-other-phytonutrients-carotenoids-squalene-and-coenzyme-q10-on-breast-cancer-cells-in-vitro/>
- Loganathan, R., Tarmizi, A. H. A., Vethakkan, S. R., & Teng, K. T. (2020). Retention of carotenes and vitamin E, and physico-chemical changes occurring upon heating red palm olein using deep-fat fryer, microwave oven and conventional oven. *Journal of Oleo Science*, 69(3), 167-183. <https://doi.org/10.5650/jos.ess19209>
- Lucci, P., Pacetti, D., Frega, N. G., & Mozzon, M. (2015). Phytonutrient concentration and unsaturation of glycerides predict optimal harvest time for *Elaeis oleifera* × *E. guineensis* palm oil hybrids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(7), 1027-1036.
- Malik, M., & Kaur, R. (2018). Influence of aliphatic and aromatic isocyanates on the properties of poly(ether ester) polyol based PU adhesive system. *Polymer Engineering and Science*, 58(1), 112-117.
- Manik, Y., Leahy, J., & Halog, A. (2013). Social life cycle assessment of palm oil biodiesel: A case study in Jambi Province of Indonesia. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(7), 1386-1392.
- May, C. Y., Liang, Y. C., Foon, C. S., Ngan, M. A., Hook, C. C., & Basiron, Y. (2005). Key fuel properties of palm oil alkyl esters. *Fuel*, 84(12-13), 1717-1720.
- McCormick, R. L., Ratcliff, M., Moens, L., & Lawrence, R. (2007). Several factors affecting the stability of biodiesel in standard accelerated tests. *Fuel Processing Technology*, 88(7), 651-657.
- Md Sarip, M. S., Morad, N. A., Yamashita, Y., Tsuji, T., Yunus, M. A. C., Aziz, M. K. A., & Lam, H. L. (2016). Crude palm oil (CPO) extraction using hot compressed water (HCW). *Separation and Purification Technology*, 169, 103-112.
- Md Sarip, M. S., Yamashita, Y., Morad, N. A., Yunus, M. A. C., & Aziz, M. K. A. (2016). Modeling and optimization of the hot compressed water extraction of palm oil using artificial neural network. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 49(7), 614-621.
- Méndez, S. A. (2006). *Conversión y eficiencia en la ganancia de peso con el uso de seis fuentes diferentes de ácido graso en conejos Nueva Zelanda* [trabajo de grado Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/medicina_veterinaria

- Mohammad, A. W., Teow, Y. H., Ho, K. C., & Rosnan, N. A. (2019). Recent developments in nanofiltration for food applications. In A. López, M. J. Fabra, M. Martínez, L. Gómez (Eds.), *Nanomaterials for Food Applications: Micro and Nano Technologies* (pp. 101-120). Elsevier.
- Mondal, M., Khan, A. A., & Halder, G. (2019). Estimation of biodiesel properties based on fatty acid profiles of *Chlamydomonas* sp. BTA 9032 and *Chlorella* sp. BTA 9031 obtained under mixotrophic cultivation conditions. *Biofuels*, *12*(10), 1175-1181.
- Moorthy, A. S. (2018). Melting and solidification of fats. In A. G. Marangoni (Ed.), *Structure-function analysis of edible fats* (2nd Ed.) (pp. 101-118). AOCS Press.
- Morais de, C., Chiu, M. C., Correa, R., Badan, A. P., Guaraldo, L. A., & Viotto, L. A. (2009). State of art of the application of membrane technology to vegetable oils: A review. *Food Research International*, *42*(5-6), 536-550.
- Mozzon, M., Foligni, R., & Tylewicz, U. (2018). Chemical characteristics and nutritional properties of hybrid palm oils. In V. Y. Waisundara (Ed.), *Palm oil* (pp. 149-170). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75421>
- Mozzon, M., Pacetti, D., Frega, N. G., & Lucci, P. (2015). Crude palm oil from interspecific hybrid *Elaeis oleifera* x *E. guineensis*: Alcoholic constituents of unsaponifiable matter. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *92*(5), 717-724.
- Mozzon, M., Pacetti, D., Lucci, P., Balzano, M., & Frega, N. G. (2013). Crude palm oil from interspecific hybrid *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*: Fatty acid regiodistribution and molecular species of glycerides. *Food Chemistry*, *141*(1), 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.03.016>
- Nakao, S. (1994). Determination of pore size and pore size distribution 3. Filtration membranes. *Journal of Membrane Science*, *96*(1-2), 131-165.
- Nang, H. L., Choo, Y. M., Ma, A. N., & Chuah, C. H. (2007). Production of refined carotene-rich palm oil from palm mesocarp (*Elaeis guineensis*) using supercritical carbon dioxide. *Journal of Food Lipids*, *14*(4), 396-410.
- Narayan, H., Tatewaki, N., Nishida, H., & Konishi, T. (2010). Squalene as novel food factor. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, *11*(8), 875-880.
- Navia, E. A., Ávila, R. A., Daza, E. E., Restrepo, E. F., & Romero, H. M. (2014). Assessment of tolerance to bud rot in oil palm under field conditions. *European Journal Plant Pathology*, *140*, 711-720.
- Nesti, L., Firwantan, Shoffiyati, P., & Ekawati, I. (2019). *Analysis of prospects of crude palm oil (CPO) in west Sumatra province* [Conference session]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/347/1/012045/pdf>

- Ngando, G. F., Dhouib, R., Carrière, F., Amvam, P.-H., & Arondel, V. (2006). Assaying lipase activity from oil palm fruit (*Elaeis guineensis* Jacq.) mesocarp. *Plant Physiology and Biochemistry*, 44(10), 611-617.
- Ngurah, I. G. B., Khoiruddin, K., Pratama, E. B., Prihartini, P. T., & Wenten, I. G. (2019). Simultaneous methyl ester production and carotene recovery from crude palm oil using membrane reactor. *Jurnal Teknologi*, 81(2), 27-38. <https://doi.org/10.11113/jt.v81.12539>
- Nimse, S. B., & Pal, D. (2015). Free radicals, natural antioxidants, and their reaction mechanisms. *RSC Advances*, 5(35), 27986-28006. <https://doi.org/10.1039/c4ra13315c>
- Nuno, M., Cerqueira, S. A., Oliveira, E. F., Gesto, D. S., Santos, D., Moreira, C., Moorthy, H. N., Ramos, M. J. & Fernandes, P. A. (2016). Cholesterol biosynthesis: A mechanistic overview. *Biochemistry*, 55(39), 5483-5506.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Organización Mundial de la Salud. (2019). *Codex Stan 210-1999: Normas para aceites vegetales especificados*.
- Pacetti, D., Gagliardi, R., Balzano, M., Frega, N. G., Ojeda, M. L., Borrero, M., Ruiz, A., & Lucci, P. (2016). Changes in the fatty acid profile and phospholipid molecular species composition of human erythrocyte membranes after hybrid palm and extra virgin olive oil supplementation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(27), 5499-5507.
- Pandey, A., Larroche, C., & Ricke, S. C. (Eds.). (2011). *Biofuels: alternative feedstocks and conversion processes*. Academic Press.
- Panpipat, W., & Chaijan, M. (2015). Palm phospholipids. In M. Ahmad & X. Xu (Eds.), *Polar lipids: Biology, chemistry, and technology* (pp. 77-90). AOCS Press.
- Paunović, D. M., Demin, M. A., Petrović, T. S., Marković, J. M., Vujasinović, V. B., & Rabrenović, B. B. (2020). Quality parameters of sunflower oil and palm olein during multiple frying. *Journal of Agricultural Sciences*, 65(1), 61-68. <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1450-8109/2020/1450-81092001061P.pdf>
- Peh, H. Y., Tan, W. S. D., Liao, W., & Wong, W. S. F. (2016). Vitamin E therapy beyond cancer: Tocopherol versus tocotrienol. *Pharmacology & Therapeutics*, 162, 152-169.
- Phoon, K. Y., Ng, H. S., Zakaria, R., Yim, H. S., & Mokhtar, M. N. (2018). Enrichment of minor components from crude palm oil and palm-pressed mesocarp fibre oil via sequential adsorption-desorption strategy. *Industrial Crops and Products*, 113, 187-195.
- Pleanjai, S., & Gheewala, S. H. (2009). Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand. *Applied Energy*, 86(Suppl. 1), S209-S214.

- Prabhu, A. V., Luu, W., Sharpe, L. J., & Brown, A. J. (2016). Cholesterol-mediated degradation of 7-dehydrocholesterol reductase switches the balance from cholesterol to Vitamin D synthesis. *Journal of Biological Chemistry*, 291(16), 8363-8373. <https://doi.org/10.1074/jbc.M115.699546>
- Prada, F., Ayala, I. M., Delgado, W., Ruiz, R., & Romero, H. M. (2011). Effect of fruit ripening on content and chemical composition of oil from three oil palm cultivars (*Elaeis guineensis* Jacq.) grown in Colombia. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(18), 10136-10142.
- Ramli, M. R., Siew, W. L., & Cheah, K. Y. (2008). Properties of high-oleic palm oils derived by fractional crystallization. *Journal of Food Science*, 73(3), c140-c145.
- Ramos, M. J., Fernández, C. M., Casas, A., Rodríguez, L., & Pérez, Á. (2009). Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology*, 100(1), 261-268.
- Resolución 182087 de 2007: Por la cual se modifican los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diésel como componente de la mezcla con el combustible diésel de origen fósil en procesos de combustión. *Diario Oficial* n.º 46.849 del 21 de diciembre de 2007. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minambientevdt_182087_2007.htm
- Resolución 2154 de 2012: Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los aceites y grasas de origen vegetal o animal que se procesen, envasen, almacenen, transporten, exporten, importen y/o comercialicen en el país, destinados para el consumo humano y se dictan otras disposiciones. *Ministerio de Salud y Protección Social*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-2154-de-2012.pdf>
- Ribeiro, D., Freitas, M., Silva, A. M. S., Carvalho, F., & Fernandes, E. (2018). Antioxidant and pro-oxidant activities of carotenoids and their oxidation products. *Food and Chemical Toxicology*, 120, 681-699.
- Rincón, S. M., Hormaza, P. A., Moreno, L. P., Prada, F., Portillo, D. J., García, J. A., & Romero, H. M. (2013). Use of phenological stages of the fruits and physico-chemical characteristics of the oil to determine the optimal harvest time of oil palm interspecific OxG hybrid fruits. *Industrial Crops and Products*, 49, 204-210.
- Rincón, L. E., Moncada, J., & Cardona, C. A. (2014). Analysis of potential technological schemes for the development of oil palm industry in Colombia: A biorefinery point of view. *Industrial Crops and Products*, 52, 457-465.
- Rincón, S. M. y Martínez, D. M. (2009). Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *Palmas*, 30(2), 11-24. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1432/1432>

- Rodríguez, J. C., Gómez, D., Pacetti, D., Núñez, Ó, Gagliardi, R., Frega, N. G., Ojeda, M. L., Loizzo, M. R., Tundis, R., & Lucci, P. (2016). Effects of the fruit ripening stage on antioxidant capacity, total phenolics, and polyphenolic composition of crude palm oil from interspecific hybrid *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(4), 852-859.
- Rohman, A. (2017). Infrared spectroscopy for quantitative analysis and oil parameters of olive oil and virgin coconut oil: A review. *International Journal of Food Properties*, 20(7), 1447-1456. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1213742>
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., Sing, K. S. W., Llewellyn, P., & Maurin, G. (Eds.). (2014). *Adsorption by powders and porous solids: Principles, methodology and applications*. (2nd Ed.). Elsevier.
- Sambanthamurthi, R., Sundram, K., & Tan, Y. (2000). Chemistry and biochemistry of palm oil. *Progress in Lipid Research*, 39(6), 507-558.
- Sampaio, K. A., Vila, J., Van Hoed, V., Monteiro, S., Ceriani, R., Verhé, R., & Meirelles, A. J. A. (2017). Impact of crude oil quality on the refining conditions and composition of nutraceuticals in refined palm oil. *Journal of Food Science*, 82(8), 1842-1850.
- Sanagi, M. M., See, H. H., Ibrahim, W. A. W., & Naim, A. A. (2005). Determination of carotene, tocopherols and tocotrienols in residue oil from palm pressed fiber using pressurized liquid extraction-normal phase liquid chromatography. *Analytica Chimica Acta*, 538(1-2), 71-76.
- Sangkharak, K., Pichid, N., Yunu, T., & Kingman, P. (2016). Separation of carotenes and vitamin E from palm oil mill effluent using silica from agricultural waste as an adsorbent. *Walailak Journal of Science and Technology*, 13(11), 939-947. <https://www.thaiscience.info/journals/Article/WJST/10983596.pdf>
- Sawadikiat, P., Setwipattanachai, P., Chaiseri, S., & Hongsprabhas, P. (2015). Rice phytochemicals concentrated by molecular distillation process and their use as co-surfactant in water dispersion. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 8014-8022.
- Sierra-Cantor, J. F., & Guerrero-Fajardo, C. A. (2017). Methods for improving the cold flow properties of biodiesel with high saturated fatty acids content: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 774-790.
- Singh, I., Nair, R. S., Gan, S., Cheong, V., & Morris, A. (2019). An evaluation of crude palm oil (CPO) and tocotrienol rich fraction (TRF) of palm oil as percutaneous permeation enhancers using full-thickness human skin. *Pharmaceutical Development and Technology*, 24(4), 448-454.

- Šošić-Jurjević, B., Lütjohann, D., Jarić, I., Miler, M., Vojnović, D., Filipović, B., Ajdžanović, V., Renko, K., Wirth, E. K., Janković, S., Köhrle, J., & Milošević, V. (2017). Effects of age and soybean isoflavones on hepatic cholesterol metabolism and thyroid hormone availability in acyclic female rats. *Experimental Gerontology*, 92, 74-81.
- Szydłowska-Czerniak, A., & Łaszewska, A. (2015). Effect of refining process on antioxidant capacity, total phenolics and prooxidants contents in rapeseed oils. *LWT - Food Science and Technology*, 64(2), 853-859. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.069>
- Szydłowska-Czerniak, A., Trokowski, K., Karlovits, G., & Szlyk, E. (2011). Effect of refining processes on antioxidant capacity, total contents of phenolics and carotenoids in palm oils. *Food Chemistry*, 129(3), 1187-1192.
- Tan, C. H., Ariffin, A. A., Ghazali, H. M., Tan, C. P., Kuntom, A., & Choo, A. C. Y. (2017). Changes in oxidation indices and minor components of low free fatty acid and freshly extracted crude palm oils under two different storage conditions. *Journal of Food Science and Technology*, 54(7), 1757-1764.
- Tan, C. H., Ghazali, H. M., Kuntom, A., Tan, C. P., & Ariffin, A. A. (2009). Extraction and physicochemical properties of low free fatty acid crude palm oil. *Food Chemistry*, 113(2), 645-650.
- Teh, S. S., Hock, A. S., & Mah, S. H. (2017). Recovery and utilization of palm oil mill effluent source as value-added food products. *Journal of Oleo Science*, 66(11), 1183-1191. <https://doi.org/10.5650/jos.ess17078>
- Teh, S. S., Hock, A. S., Choo, Y. M., & Mah, S. H. (2018). sn-2 hypothesis: A review of the effects of palm oil on blood lipid levels. *Journal of Oleo Science*, 67(6), 697-706. <https://doi.org/10.5650/jos.ess18009>
- Tehlah, N., Kaewpradit, P., & Mujtaba, I. M. (2017). Development of molecular distillation based simulation and optimization of refined palm oil process based on response surface methodology. *Processes*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/pr5030040>
- Tomkins, T., & Drackley, J. K. (2010). Applications of palm oil in animal nutrition. *Journal of Oil Palm Research*, 22, 835-845.
- Torres, J. y Durán, S. D. (2015). Fosfolípidos: propiedades y efectos sobre la salud. *Nutricion Hospitalaria*, 31(1), 76-83. <https://doi.org/10.3305/nh.2015.31.1.7961>
- Torres, G. A., Sarria, G. A., Martínez, G., Varón, F., Drenth, A., & Guest, D. I. (2016). Bud rot caused by *Phytophthora palmivora*: A destructive emerging disease of oil palm. *Phytopathology*, 106, 320-329. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-15-0243-RVW>

- Tsai, C. E., & Lin, L. H. (2019). DPPH scavenging capacity of extracts from *Camellia* seed dregs using polyol compounds as solvents. *Heliyon*, 5(8), e02315. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02315>
- Uddin, S., Sarker, Z. I., Ferdosh, S., Akanda, J. H., Easmin, M. S., Shamsudin, S. H., & Yunus, K. (2015). Phytosterols and their extraction from various plant matrices using supercritical carbon dioxide: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(7), 1385-1394.
- Wai, W. T., Saad, B., & Lim, B. P. (2009). Determination of TOTOX value in palm oleins using a FI-potentiometric analyzer. *Food Chemistry*, 113(1), 285-290.
- Winkler, J. K. & Mehta, B. M. (2015). Chemical composition of fat and oil products. In P. C. Keung & B. M. Mehta (Eds.), *Handbook of Food Chemistry* (pp. 365-402). Springer.
- Wondi, M. H., Shamsudin, R., Yunus, R., Alsultan, G. A., & Iswardi, A. H. (2020). Centrifugal separation-assisted and extraction of crude palm oil from separated mesocarp fiber: Central composite design optimization. *Journal of Food Process Engineering*, 43(7), e13426.
- Woyann, L. G., Meira, D., Zdziarski, A. D., Matei, G., Milioli, A. S., Rosa, A. C., Madella, L. A., & Benin, G. (2019). Multiple-trait selection of soybean for biodiesel production in Brazil. *Industrial Crops and Products*, 140, 111721.
- Xie, Q., Cai, L., Xia, F., Liang, X., Wu, Z., Liu, Y., Li, X., Lu, M. Nie, Y., & Ji, J. (2019). High vacuum distillation for low-sulfur biodiesel production: From laboratory to large scale. *Journal of Cleaner Production*, 223, 379-385.
- Yeong, S. K., Idris, Z., & Hassan, H. A. (2012). Palm oleochemicals in non-food applications. In O. M. Lai, C. P. Tan, & C. C. Akoh (Eds.), *Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses* (pp. 587-624). AOCS Press.
- Zerbinati, C., & Iuliano, L. (2017). Cholesterol and related sterols autoxidation. *Free Radical Biology and Medicine*, 111, 151-155.
- Zhang, G., Li, P., Zhang, W., & Zhao, J. (2017). Analysis of multiple soybean phytonutrients by near-infrared reflectance spectroscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 409(14), 3515-3525.
- Zhang, Y.-L., Gong, C., Pei, X.-L., Han, Y.-L., Huang, Y.-Y., & Xu, X. (2018). Rapid quantitative determination of triglycerides in edible oils by matrix-assisted laser desorption/ionisation Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry using pencil graphite combined with 2,5-dihydroxybenzoic acid as matrix. *International Journal of Mass Spectrometry*, 431, 56-62.

- Zhu, Z., Chen, S., Wu, X., Xing, C., & Yuan, J. (2018). Determination of soybean routine quality parameters using near-infrared spectroscopy. *Food Science and Nutrition*, 6(4), 1109-1118. <https://doi.org/10.1002/fsn3.652>
- Ziolkowska, J. R. (2020). Biofuels technologies: An overview of feedstocks, processes, and technologies. In J. Ren, A. Scipioni, A. Manzardo, & H. Liang (Eds.). *Biofuels for a more sustainable future: Life cycle sustainability assessment and multi-criteria decision making* (pp. 1-19). Elsevier.
- Zuleta, E. C., Ríos, L. A. y Calderón, J. A. (2012). Estudio de la estabilidad oxidativa de biodiésel de aceite de palma en contacto con materiales metálicos y poliméricos automotrices (sic). *Ingeniería y Competitividad*, 14(1), 9-22. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/25841/1/ZuletaErnesto_2012_EstabilidadOxidativaBiodiesel.pdf