

## Indicadores composicionales en la química de los ácidos grasos en el aceite de palma. ¿Qué tan relevante es el índice de yodo?\*

Compositional Indicators in Palm Oil Fatty Acid Chemistry. How Relevant is the Iodine Value?

**CITACIÓN:** González-D., A., García-N., J. A., Cortés-B., I. L., Díaz-O., J. & Dueñas-S., J. (2022). Indicadores composicionales en la química de los ácidos grasos en el aceite de palma. ¿Qué tan relevante es el índice de yodo? *Palmas*, 43(2), 26-39.

**PALABRAS CLAVE:** Aceite de palma crudo, Híbridos interespecíficos de palma de aceite, *Elaeis oleifera*, Ácidos grasos insaturados, Perfil de ácidos grasos.

**KEYWORDS:** Crude palm oil, Interspecific oil palm hybrids, *Elaeis oleifera*, Unsaturated fatty acids, Fatty acid profile.

\* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

**RECIBIDO:** abril 2022.

**APROBADO:** junio 2022.

**GONZÁLEZ DÍAZ, ALEXIS**  
Asistente de Investigación de Cenipalma  
Autor de correspondencia:  
agonzalezd@cenipalma.org

**GARCÍA NÚÑEZ, JESÚS A.**  
Coordinador de Programa de  
Procesamiento de Cenipalma  
Autor de correspondencia:  
jgarcia@cenipalma.org

**CORTÉS B., INGRID L.**  
Auxiliar de Investigación de Cenipalma

**DÍAZ O., JENIFER S.**  
Coordinador de Laboratorio de  
Guaicaramo S. A. S.

**DUEÑAS S. JAVIER**  
Director de Planta de  
Guaicaramo S. A. S.

## Resumen

Las diferentes especies de ácidos grasos que conforman las estructuras moleculares de los triglicéridos en el aceite de palma, en diferentes niveles de conjugaciones que varían entre cultivares *dura x pisifera* (D×P) y *oleifera x guineensis* (O×G) resultan ser indicadores químicos estrechamente relacionados con el índice de yodo, un parámetro de calidad que determina el grado de insaturaciones o el número promedio de dobles enlaces en aceites y grasas, con valores que pueden superar las 60 unidades en compuestos grasos ricos en ácidos grasos mono y poliinsaturados. En este estudio se conformaron mezclas entre aceite de palma crudo extraído de los

cultivares de palma tipo *tenera* D×P de *Elaeis guineensis* Jacq. y de cuatro cultivares de híbridos interespecíficos O×G, en diferentes niveles composicionales (0, 20, 40, 60, 80 y 100 % m/m-APC O×G). El perfil lipídico de los aceites puros y de las mezclas generadas bajo condiciones controladas de laboratorio fue establecido mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama, mientras que el índice de yodo fue calculado estequiométricamente a partir de los cromatogramas conseguidos. Los resultados fueron analizados para determinar la posible relación entre el índice de yodo y las variaciones químicas composicionales en el perfil lipídico logradas en el aceite de palma crudo (APC) con las mezclas, mediante regresiones lineales simples. De los resultados se destaca la obtención de 3 modelos de regresión lineal para las mezclas entre APC O×G Manaos × Compacta y APC D×P; entre APC O×G Coari × Super *tenera* y APC D×P; y entre APC O×G Coari × La Mé y APC D×P, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0,9852; 0,9845 y de 0,9871, correspondientemente.

## Abstract

The different species of fatty acids that comprise the molecular structures of the triglycerides in palm oil, at different conjugation levels that vary among cultivars (D×P and O×G), turn out to be chemical indicators closely related to the iodine value, a quality parameter that determines the degree of unsaturations or the average number of double bonds in oils and fats, with values that can exceed 60 units in fatty compounds with a high content of monounsaturated and polyunsaturated fatty acids. In this study, blends were formed between crude palm oil extracted from *tenera* D×P type palm cultivars of *Elaeis guineensis* Jacq. and from four cultivars of O×G interspecific hybrids, at different compositional levels (0, 20, 40, 60, 80 and 100 % m/m-CPO O×G). The lipid profile of pure oils and mixtures generated under controlled laboratory conditions was established by gas chromatography with flame ionization detector, while the iodine value was calculated stoichiometrically from chromatograms obtained. The results were analyzed to determine the possible relationship between the iodine value and the chemical compositional variations in the lipid profile achieved in the CPO with the mixtures, by means of simple linear regressions. From the results, three linear regression models were obtained for the mixtures between: CPO O×G Manaos × Compacta and CPO D×P; between CPO O×G Coari × Super *Tenera* and CPO D×P; and between CPO O×G Coari × La Mé and CPO D×P, with coefficients of determination ( $R^2$ ) of 0.9852, 0.9845 and 0.9871, respectively.

## 1. Introducción

Con base en el último informe del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, para finales de 2021, más de 75 millones de toneladas (Mt) de aceite de palma fueron producidas en todo el mundo (USDA-FAS, 2021). Indonesia 59 % (44.500 Mt), Malasia 25 % (18.700 Mt), Tailandia 4 % (3.120 Mt), Colombia 2 % (1.650 Mt) y Nigeria 2 % (1.400 Mt) encabezan la lista de países con mayor producción de este tipo de aceite a nivel mundial (USDA-FAS, 2021). En las plantas de beneficio de palma de aceite, el aceite de palma crudo (APC) es obtenido por medio del prensado mecánico, bajo condiciones específicas de presión y de temperatura, de los frutos maduros producidos por los cultivares de palma africana tipo *tenera* de *Elaeis guineensis* Jacq., cruce Dura × Pisifera (APC D×P) o por los híbridos interespecíficos entre las especies *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés y *Elaeis guineensis*

Jacq., conocidos de manera habitual como híbridos O×G (APC O×G).

*Elaeis oleifera*, endémica de América, es una palma del género *Elaeis* extendida por el sur y el centro del continente americano (Osorio-Guarín *et al.*, 2019). Esta se hibrida convenientemente con *Elaeis guineensis* Jacq. para ofrecer cultivares de palma de aceite híbridos con características vegetativas distintivas y provechosas para la cosecha (p. ej. lenta tasa de crecimiento) o para el cultivo (p. ej. resistencia a plagas y a enfermedades) (Almeida *et al.*, 2019). Razón por la que el híbrido O×G fue propuesto como una de las alternativas para el manejo integral de la problemática fitosanitaria ocasionada por la enfermedad de la Pudrición del cogollo (PC), a la que se le atribuye el daño causado, en diferentes grados de severidad, a cultivos de palma de aceite en distintas regiones de Colombia y de Latinoamérica (Corredor *et al.*, 2008; Meléndez y Ponce, 2016; Torres *et al.*, 2016).

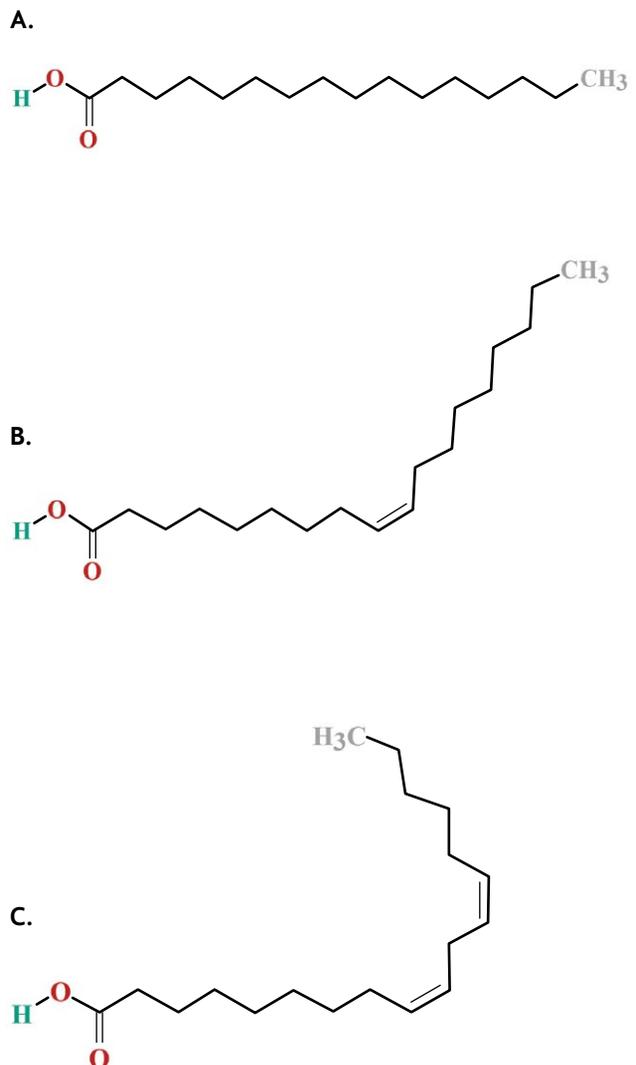
Al igual que en el APC D×P, trece especies de ácidos grasos (AG) tipifican la matriz lipídica del APC O×G: [láurico (C12:0), mirístico (C14:0), pentadecanoico (C15:0), palmítico (C16:0), palmitoleico (C16:1), margárico (C17:0), esteárico (C18:0), oleico (C18:1n9c), vaccénico (C18:1n7c), linoleico (C18:2n6c),  $\alpha$ -linolénico (C18:3n3), araquídico (C20:0) y gondoico (C20:1n9)]. El ácido palmítico (Figura 1a), un ácido graso saturado (AGS), otorga a una fracción del APC (~50 %), un aspecto sólido a temperatura ambiente (~20 °C), al estar presente en una medida superior de concentración que otras de las especies de ácidos grasos saturados en la matriz oleosa. En contraste, los ácidos grasos oleico (ácido graso monoinsaturado (AGMI) (Figura 1-B) y linoleico (ácido graso poliinsaturado (AGPI) (Figura 1-C)), en mayor grado, confieren a la otra fracción del APC un aspecto líquido cuando este se almacena bajo las mismas condiciones de temperatura. Los AGS son ácidos carboxílicos de cadena larga con enlaces simples entre sus átomos de carbono (i.e., C-C). Por el contrario, los AGMI y los AGPI, comprenden uno o más dobles enlaces entre los átomos de carbono en su estructura molecular (i.e., -HC=CH-), correspondientemente. La Figura 1 muestra la estructura molecular de los ácidos grasos de mayor influencia en las características fisicoquímicas del APC de distinto origen.

Por otra parte, la mezcla entre APC D×P y APC O×G es una práctica muy común actualmente en las plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia, llevada a cabo por la creciente oferta de racimos de fruta fresca (RFF) de los distintos cultivares de híbridos O×G, sembrados en las distintas zonas palmeras del país, por la dificultad que representa el rastreo de RFF de distinta procedencia en las tolvas; por la facilidad o no de separar, por origen, el aceite de palma durante su procesamiento y almacenamiento; o por la factibilidad o no de vender aceites mezclados. Dicha práctica puede disminuir el contenido de ácidos grasos libres e incrementar el valor del índice de deterioro a la blanqueabilidad en el APC resultante de la mezcla, pero a su vez, genera cambios importantes a nivel de la composición química de la matriz lipídica resultante (González-Díaz *et al.*, 2019). En las refinadoras, un aceite con un alto contenido de APC O×G en mezcla con APC D×P, requiere ser procesado bajo condiciones diferentes a las convencionalmente establecidas para el procesamiento del APC D×P puro, lo que resulta en cambios imprevistos en las operaciones estandarizadas en las refinadoras, además, en

efectos negativos sobre la calidad de la oleína y de la estearina que se producen en estas mismas industrias.

En otra medida, el índice de yodo (o valor de adsorción de yodo o número de yodo, comúnmente abreviado como IY) es un parámetro de calidad que determina el grado de insaturaciones o el número promedio de dobles enlaces en aceites y grasas (Adevale *et al.*, 2014; Lam *et al.*, 2020). Tanto en el APC D×P, como en el APC O×G, el comportamien-

**Figura 1.** Ácidos grasos de mayor preponderancia en el APC. **A.** ácido palmítico, C16:0; **B.** ácido oleico, C18:1n9c; **C.** ácido linoleico, C18:2n6c. Estructuras desarrolladas utilizando el software ChemSketch (Advanced Chemistry Development Inc. (ACD/Labs), 2018).



to del IY se ve influenciado de manera significativa por la química que establece el contenido porcentual másico de los AGMI y de los AGPI en cada matriz lipídica (González-Díaz *et al.*, 2019). Razón por la cual el IY resulta ser una variable realmente útil durante la evaluación de la calidad, cuando se habla en términos de pureza, de una grasa o de un aceite de origen vegetal o animal.

El objetivo de este estudio ha sido determinar el efecto de los cambios composicionales de los ácidos grasos insaturados en el APC, conseguidos en laboratorio por medio de mezclas generadas entre APC D×P y APC O×G, sobre el valor del IY en las matrices lipídicas resultantes.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Muestreo

Las muestras de APC D×P ( $n=40$ ) y de APC O×G del cultivar Coari × La Mé (APC O×G C×L) ( $n=40$ ) fueron recolectadas en la planta de beneficio de Guaicaramo S. A. S., Barranca de Upía-Meta. Las muestras de APC O×G de los cultivares Brasil × Djongo (APC O×G B×D) ( $n=15$ ), Coari × *Super tenera* (APC O×G C×ST) ( $n=15$ ) y Manaos × Compacta (APC O×G M×C) ( $n=15$ ) fueron extraídas de RFF, siembra 2011-2013, recolectados en la Finca Experimental La Providencia de la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma), Tumaco-Nariño. Todo lo anterior siguiendo los lineamientos descritos en las secciones C1-47 y Ba 1-38 del manual de métodos oficiales y prácticas recomendadas de la American Oil Chemists' Society (AOCS, 2010). Las muestras puras y las mezclas conformadas entre ellas (Tabla 1) fueron analizadas en el Laboratorio de Procesamiento de Cenipalma, ubicado en el Campo Experimental Palmar de las Corocoras, Paratebueno-Cundinamarca.

### 2.2. Preparación de las mezclas entre APC D×P y APC O×G

A partir de las muestras recolectadas de APC de distinto origen (numeral 2.1), se prepararon mezclas en diferentes niveles porcentuales de concentración entre los aceites obtenidos de los diferentes cultivares de palma (Tabla 1) empleando una balanza analítica Ohaus (Ohaus Scale Corp. Florham Park, NJ, USA) con precisión de  $0,0000 \pm 0,0001$  g y un horno de ca-

lentamiento Memmert con control de temperatura ( $60 \pm 0,5$  °C) (Mempert™, Alemania). En la Tabla 1 se presentan las matrices lipídicas recolectadas, conformadas y caracterizadas en este estudio.

### 2.3. Perfil de ácidos grasos e índice de yodo en las muestras de APC

La determinación del perfil de ácidos grasos (PAG) de las muestras de APC se llevó a cabo mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID por sus siglas en inglés), de acuerdo con los métodos AOCS Ce 2-66 y Ce 1-62 (AOCS, 2010). Se empleó un cromatógrafo de gases GC-7890A-FID (Agilent Technologies, USA), equipado con un puerto de inyección automático Split-Splitless (50:1) y una columna en sílice fundida DB-23 (60 m × 0,25 mm (ID) × 0,25 μm (f.t)), recubierta con una fase estacionaria de 50 % cianopropil-metilpolisiloxano. El gas de arrastre implementado fue nitrógeno grado 5,0 (pureza  $\geq 99,995$  %) con un flujo volumétrico de  $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ . Las condiciones de temperatura del horno de calentamiento fueron programas de 50 °C (1 min) @  $25 \text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$  hasta 175 °C (0 min), luego, @  $4 \text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$  hasta 230 °C (6,3 min). El volumen de inyección fue de 1 μL, las temperaturas del inyector y del detector se fijaron ambas en 250 °C. La concentración porcentual másica de las especies de AG en los perfiles cromatográficos se estableció por comparación directa y a partir de los tiempos de retención y áreas delimitadas implementando un estándar certificado (Supelco® 37 Component FAME Mix-Sigma Aldrich). El IY se calculó directamente y a partir de la composición de los AG en los PAG logrados por cromatografía, de acuerdo con el método AOCS Cd 1c-85 (AOCS, 2010). Los reactivos implementados en las determinaciones cromatográficas (metanol, n-hexano, hidróxido de potasio y trifluoruro de boro en metanol) fueron todos grado analítico (EMSURE®) y cromatográfico (LiChrosolv®, SupraSolv®) marca MERCK.

### 2.4. Análisis estadístico

Los resultados se presentan como medias aritméticas calculadas a partir de los resultados obtenidos en la caracterización de las muestras de aceites analizadas por cultivar (Tabla 1) y sus respectivas desviaciones estándar ( $\pm$ ). Se determinaron otros valores estadísticos descriptivos como: mínimos, máximos, el error

**Tabla 1.** Proporción de mezcla entre APC D×P y APC O×G.

Grupo de análisis	Matriz de análisis	APC D×P (% m/m)	APC O×G C×L (% m/m)	n=
1: mezcla entre APC D×P y APC O×G C×L	APC D×P	100	0	40
	Mezcla 1	80	20	40
	Mezcla 2	60	40	40
	Mezcla 3	40	60	40
	Mezcla 4	20	80	40
	APC O×G C×L	0	100	40
2: mezcla entre APC D×P y APC O×G C×ST	Matriz de análisis	APC D×P (% m/m)	APC O×G C×ST (% m/m)	n=
	APC D×P	100	0	15
	Mezcla 1	80	20	15
	Mezcla 2	60	40	15
	Mezcla 3	40	60	15
	Mezcla 4	20	80	15
APC O×G C×ST	0	100	15	
3: mezcla entre APC D×P y APC O×G M×C	Matriz de análisis	APC D×P (% m/m)	APC O×G M×C (% m/m)	n=
	APC D×P	100	0	15
	Mezcla 1	80	20	15
	Mezcla 2	60	40	15
	Mezcla 3	40	60	15
	Mezcla 4	20	80	15
APC O×G M×C	0	100	15	
4: mezcla entre APC D×P y APC O×G B×D	Matriz de análisis	APC D×P (% m/m)	APC O×G B×D (% m/m)	n=
	APC D×P	100	0	15
	Mezcla 1	80	20	15
	Mezcla 2	60	40	15
	Mezcla 3	40	60	15
	Mezcla 4	20	80	15
APC O×G B×D	0	100	15	

C×L: Coari x La Mé; C×ST: Coari x Super *tenera*; M×C: Manaos x Compacta; B×D: Brasil x Djongo.

estándar y las medianas. El tratamiento y el análisis de los datos y resultados obtenidos, y las regresiones lineales entre el IY y el grupo de muestras analizadas fueron llevados a cabo mediante la interfaz Rstudio del *software* estadístico R.

### 3. Resultados y discusión

Antes de entrar en materia, se considera necesario presentar una breve, pero muy nutrida discusión, sobre los factores de mayor relevancia en la química que

influyen en el comportamiento de los ácidos grasos en los triglicéridos que componen el aceite de palma crudo y de su estrecha relación con el estado físico de este tipo de materias primas. Por lo tanto, en el numeral 3.1 se describe la relación existente entre el valor del índice de yodo y la cantidad de insaturaciones en un sustrato lipídico y, en el numeral 3.2, se presenta la conceptualización teórica, en términos técnicos de laboratorio, de las interacciones químicas que hacen posible la determinación del índice de yodo en aceites, grasas y ceras. Todo lo anterior, como un preám-

bulo de los resultados logrados en este estudio que se muestran en los numerales 3.3 y 3.4.

### 3.1. Química de los ácidos grasos en el aceite de palma y su relación con el valor del IY

Las grasas constituyen una fracción fundamental en la dieta humana. Además de ser fuente de energía, de ácidos grasos esenciales y de actuar como compuestos de estructura y de reserva a nivel celular, son necesarias para el transporte y la asimilación de compuestos biológicamente activos como: vitamina A (retinol, retinal, ácido retinoico y varios carotenoides provitamina A como el  $\alpha$ - y el  $\beta$ -caroteno) (Haaker *et al.*, 2020); vitamina D (vitamina D3, conocida como colecalciferol y vitamina D2, también llamada ergocalciferol) (Chang y Lee, 2019); vitamina E ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - y  $\delta$ -tocotrienol y  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - y  $\delta$ -tocoferol) (Azzi, 2019); vitamina K (filoquinona (vitamina K1) y una serie de menaquinonas (vitamina K2), además de otros) (Ivanova *et al.*, 2018); hormonas, y otros compuestos indispensables para el correcto funcionamiento de los organismos.

Las especies de ácidos grasos que constituyen las moléculas de los triglicéridos desempeñan un rol determinante en las características fisicoquímicas de una grasa o de un aceite. Los aceites, compuestos grasos de apariencia líquida a temperatura ambiente (alrededor de 20 °C) se caracterizan por presentar un contenido superior de AGMI y de AGPI a nivel estructural, mientras que las grasas disponen de una mayor cantidad de AGS, lo que hace que estas últimas sean sólidas bajo las mismas condiciones de temperatura antes mencionadas.

El punto de fusión, particular para cada una de las especies de ácidos grasos que conforman los triglicéridos en los aceites y grasas, aumenta con el incremento en el número de átomos de carbono específico que constituye la estructura de cada uno de estos compuestos, con excepciones claras a la anterior regla, cuando se trata de los AGMI y de los AGPI. Lo inmediatamente anterior obedece, en principio, a la presencia de dobles enlaces entre átomos de carbono en las cadenas que componen las configuraciones moleculares de estos compuestos (Wood *et al.*, 2007). En los ácidos grasos insaturados con enlaces en configuración *cis*, como el ácido oleico, la distancia entre los átomos de carbono que forman la cadena carbonada saturada ( $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ ) no es la misma que la

que se encuentra entre los átomos de carbono en la insaturación *cis*-9- ( $-\text{CH}=\text{CH}-$ ), ni tampoco los ángulos de torsión (133°) (Kaneko y Yanotj, 1998). Esto es lo que ocasiona que dichas moléculas presenten un grado mayor de dificultad para establecer entre ellas interacciones de *Van der Waals* (Lupi *et al.*, 2016). A lo anterior, puede atribuirse el hecho de que los ácidos grasos insaturados suelen encontrarse en estado líquido a temperatura ambiente o por debajo de esta (< 20 °C). En contraste, los enlaces C-C en los AGS, como el palmítico y el esteárico, son enlaces simples (enlaces covalentes), con la misma distancia entre ellos (1,54 Å) y el mismo ángulo de torsión (110°). Dicha circunstancia permite el “empaquetamiento” de varias moléculas mediante interacciones de *Van der Waals* (Israelachvili, 1974). Cuanto mayor es la cadena carbonada en un AGS, mayor es la posibilidad de que se presenten estas atracciones débiles, por ello, a temperatura ambiente, los AGS suelen encontrarse en estado sólido.

Así pues, el ácido oleico (Figura 1B), un ácido graso de la serie omega 9 ( $\omega$ -9), conformado por 18 átomos de carbono y un doble enlace C=C entre las posiciones 9 y 10 de la cadena, tiene un punto de fusión entre los 13-14 °C (National Center for Biotechnology Information, 2022b). De manera análoga, el ácido linoleico (Figura 1C), un ácido graso de la serie omega 6 ( $\omega$ -6), compuesto por la misma cantidad de átomos de carbono que el ácido oleico, cuenta con 2 dobles enlaces entre átomos de carbono a nivel molecular, entre las posiciones 9 y 10 y 11 y 13, y un punto de fusión de -5 °C (National Center for Biotechnology Information, 2022c). En contraste, el ácido palmítico (Figura 1A), un AGS, estructuralmente constituido por 16 átomos de carbono, se caracteriza por presentar un punto/intervalo de fusión entre 60-65 °C (National Center for Biotechnology Information, 2022a).

La química que gobierna el comportamiento y las características físicas y químicas de los ácidos grasos en los aceites y las grasas es responsable de que los sustratos oleosos ricos en AGMI y en AGPI, presenten, además de una apariencia líquida a temperatura ambiente y bajos puntos de fusión, altos valores en el IY (p. ej. aceite de maíz: 103-135; de almendras: 85-109; de maní: 77-107; de oliva: 75-94; de palma con mayor contenido de ácido oleico: > 68) (FAO/WHO, 2013, 2019). Por el contrario, los compuestos grasos con alto contenido de AGS presentarán mayor rigidez, puntos de fusión más elevados y valores en el

IY inferiores (p. ej. aceite de palmiste: 14,1-21; de babasú: 10-18; de coco: 6,3-10,6) (Ministerio de Salud y Protección Social, 2012).

### 3.2. La química que determina el comportamiento del IY en muestras de laboratorio

Desde el punto de vista químico, ¿cómo es que el IY, calculado mediante una determinación volumétrica en laboratorio, puede representar una escala para establecer el grado de insaturaciones presentes en un sustrato orgánico que contenga enlaces diénicos (=) o triénicos (≡), como un aceite, una grasa o una cera? En síntesis, el proceso se fundamenta en la adición electrofílica de halógenos sobre los dienos (-CH=CH-) presentes, por ejemplo, en los AGMI y en los AGPI en los triglicéridos de los aceites y las grasas, por la adición del reactivo de Wijs (yodo mono-cloruro en ácido acético glacial), hasta la formación de compuestos interhalógenos (Figura 2). Una vez finalizada la reacción, el exceso de yodo mono-cloruro se descompone en yodo (I<sub>2</sub>) al agregar una solución sobresaturada de yoduro de potasio (KI). Posteriormente, el yodo libre es valorado con una solución estándar de tiosulfato de sodio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en presencia de un indicador de almidón, como se muestra en la Figura 2.

Por último, el valor del IY es calculado estequiométricamente al relacionar la diferencia entre los volúmenes consumidos de tiosulfato de sodio estándar en la titulación de una muestra y de un blanco de reactivos, y la normalidad de la solución de tiosulfato de sodio, con la cantidad de muestra empleada para la determinación de esta variable.

Ahora bien, dado por entendido el anterior contexto, a continuación, se presentan los resultados de mayor preponderancia encontrados en el desarrollo experimental de este trabajo.

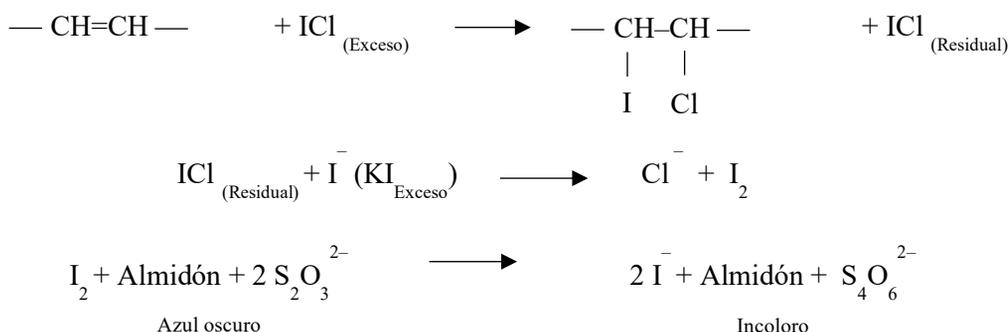
### 3.3. Perfil de ácidos grasos y cambios composicionales de las especies de ácidos grasos en los triglicéridos del APC de distinto origen

La Figura 3 muestra el comportamiento de las especies de ácidos grasos de mayor relevancia en el APC puro, extraído de los diferentes cultivares de híbridos interespecíficos O×G, caracterizados en este estudio, y de *E. guineensis* D×P.

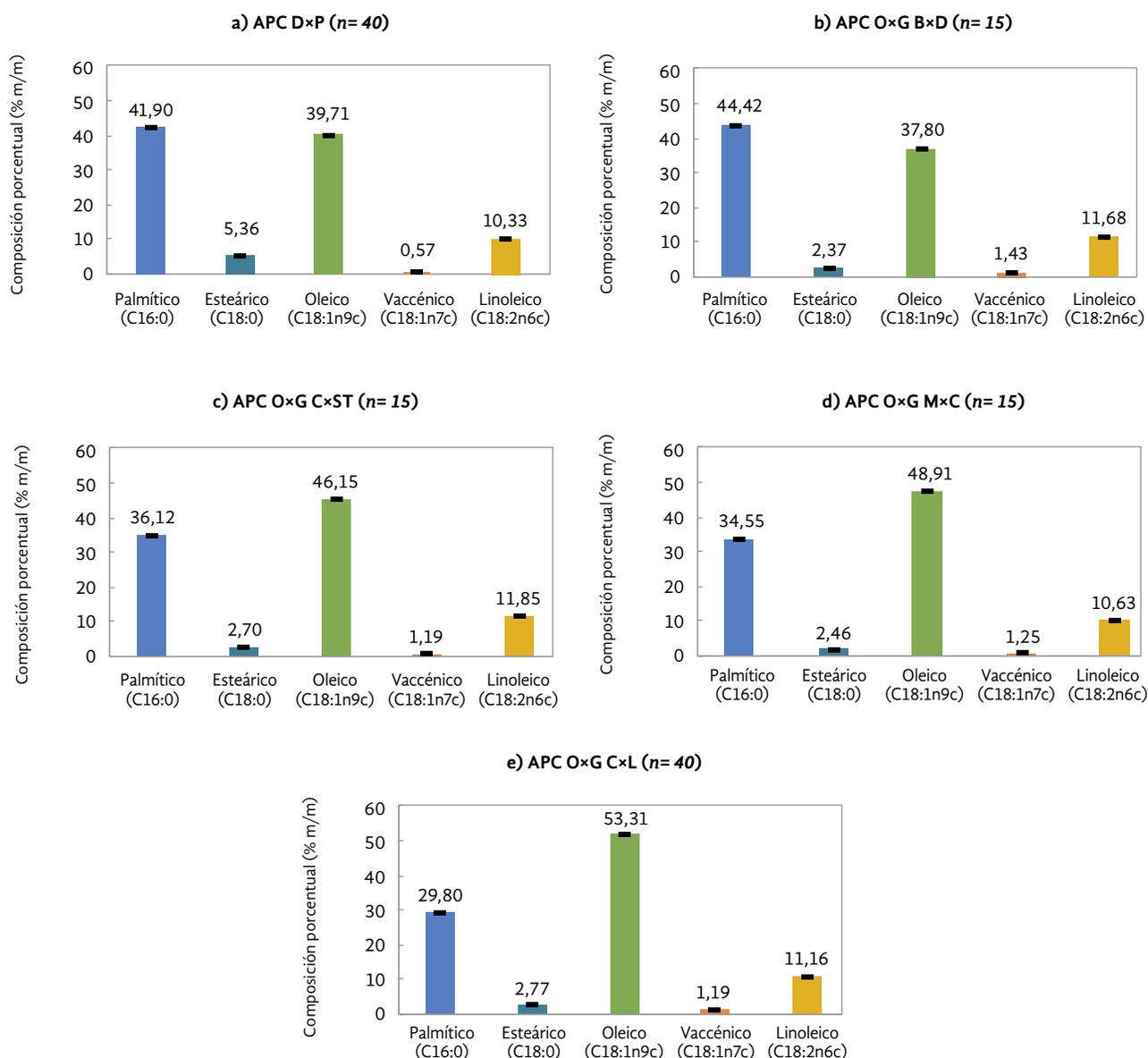
El contenido promedio de ácido oleico en las muestras de APC O×G C×L caracterizadas en el presente estudio fue de 53,31±0,48 % m/m, con valores mínimos de 52,62 % m/m y máximos de 54,37 % m/m (Figura 3E). Asimismo, el ácido linoleico, en las mismas muestras, resultó en un contenido promedio de 11,16 % m/m, con un mínimo de 10,93 % m/m y un máximo de 11,48 % m/m; mientras que el ácido palmítico fue determinado en una concentración porcentual másica promedio de 29,80 % m/m, con 28,92 % m/m como contenido mínimo y 30,40 % m/m como contenido máximo. Resultados similares pudieron ser encontrados en otros estudios desarrollados por distintos autores (Astorkia *et al.*, 2019; de Almeida *et al.*, 2021; Morcillo *et al.*, 2021).

Por el contrario, los ácidos grasos oleico y linoleico en el PAG del APC D×P representaron un promedio de 39,71±0,44 % m/m (mínimo: 38,71 % m/m;

**Figura 2.** Reacciones químicas involucradas en la determinación del IY en compuestos orgánicos con enlaces diénicos o triénicos por el método de Wijs.



**Figura 3.** Composición porcentual másica de las especies de ácidos grasos de mayor relevancia en el APC de distinto origen. Las barras de error corresponden al error estándar de la media.



máximo: 40,42 % m/m) y de 10,33±0,32 % m/m (mínimo: 9,67 % m/m; máximo: 10,70 % m/m), respectivamente. En adición a lo anterior, el contenido de ácido palmítico en las mismas muestras de aceite fue establecido en una media de 41,90±1,22 % m/m, con un valor mínimo de 40,62 % m/m y un máximo de 44,84 % m/m (Figura 3A). Valores semejantes de composición fueron reportados para este mismo ácido graso, en el APC D×P, en estudios por (Dos Santos *et al.*, 2019; Mulia *et al.*, 2018; Tan *et al.*, 2021).

De los resultados en la Figura 3 se destaca, además, que el contenido porcentual másico de cada una de las especies de ácidos grasos que constituyen cerca del 98% del PAG de cada uno de los aceites caracterizados en este trabajo, presentó variaciones importantes cuando se realizaron comparaciones entre los resultados logrados de la caracterización de las diferentes matrices lipídicas en estudio. De este modo, el contenido de AGMI (ácido oleico + ácido vaccénico, principalmente) fue en promedio superior

en los cultivares híbrido C×L (≈54 % m/m), M×C (≈50 % m/m) y C×ST (≈47 % m/m), seguido por los cultivares D×P (≈40 % m/m), y menor en el cultivar O×G B×D (≈39 % m/m). Por otra parte, los AGPI (linoleico, mayormente) comprendieron, en promedio, una mayor medida en el APC de los cultivares O×G C×ST (≈12 % m/m), seguido por el APC extraído de los cultivares O×G B×D (≈12 % m/m), O×G C×L (≈11 % m/m), O×G M×C (≈11 % m/m) y por el APC de los cultivares D×P (≈10 % m/m). De otro lado, los ácidos grasos palmítico y esteárico, que en conjunto representan la mayor parte del contenido de AGS en el APC de distinto origen, se encontraron, en promedio, en un mayor porcentaje en el APC extraído de los cultivares D×P (≈47 % m/m), seguido por los cultivares de híbrido O×G B×D (≈47 % m/m), O×G C×ST (≈39 % m/m), O×G M×C (≈37 % m/m) y O×G C×L (≈33 % m/m) (Figura 3). Resultados similares han sido reportados en trabajos desarrollados por (González-Díaz *et al.*, 2020; Urrego *et al.*, 2019).

Como se mencionó anteriormente (numeral 3.1), el número total de dobles enlaces en los ácidos grasos, que conforman los triglicéridos de un aceite o una grasa, está directamente relacionado con el valor determinado en laboratorio para la variable índice de yodo. Considerando dicha aseveración, en este estudio, el aceite de los cultivares O×G C×L en estado puro, es decir, sin mezclar, alcanzó el valor más alto para el parámetro IY, con un promedio de 68,52±0,53 (mínimo: 68,06; máximo: 68,93); seguido por los aceites extraídos de los cultivares O×G M×C (IY= 63,20±0,30. Mínimo: 62,15; máximo: 63,37); O×G C×ST (IY= 62,92±0,22. Mínimo: 62,52; máximo: 63,15); O×G B×D (IY= 55,10±0,04. Mínimo: 55,04; máximo: 55,23); y, por último, el APC del cultivar D×P con un valor promedio de IY de 52,35±0,68 (mínimo: 51,05; máximo: 49,92). Cadena *et al.* (2013) y Chin Soh *et al.* (2017), encontraron resultados comparables con los presentados anteriormente.

### 3.4. Modelos de regresión lineal simple construidos a partir del estudio de las variables relacionadas: APC O×G en mezcla con APC D×P e IY en la mezcla resultante

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización del grupo de muestras en la Tabla 1 y de un análisis de regresión para estimar posibles correspondencias entre las variables de estudio, pudo en-

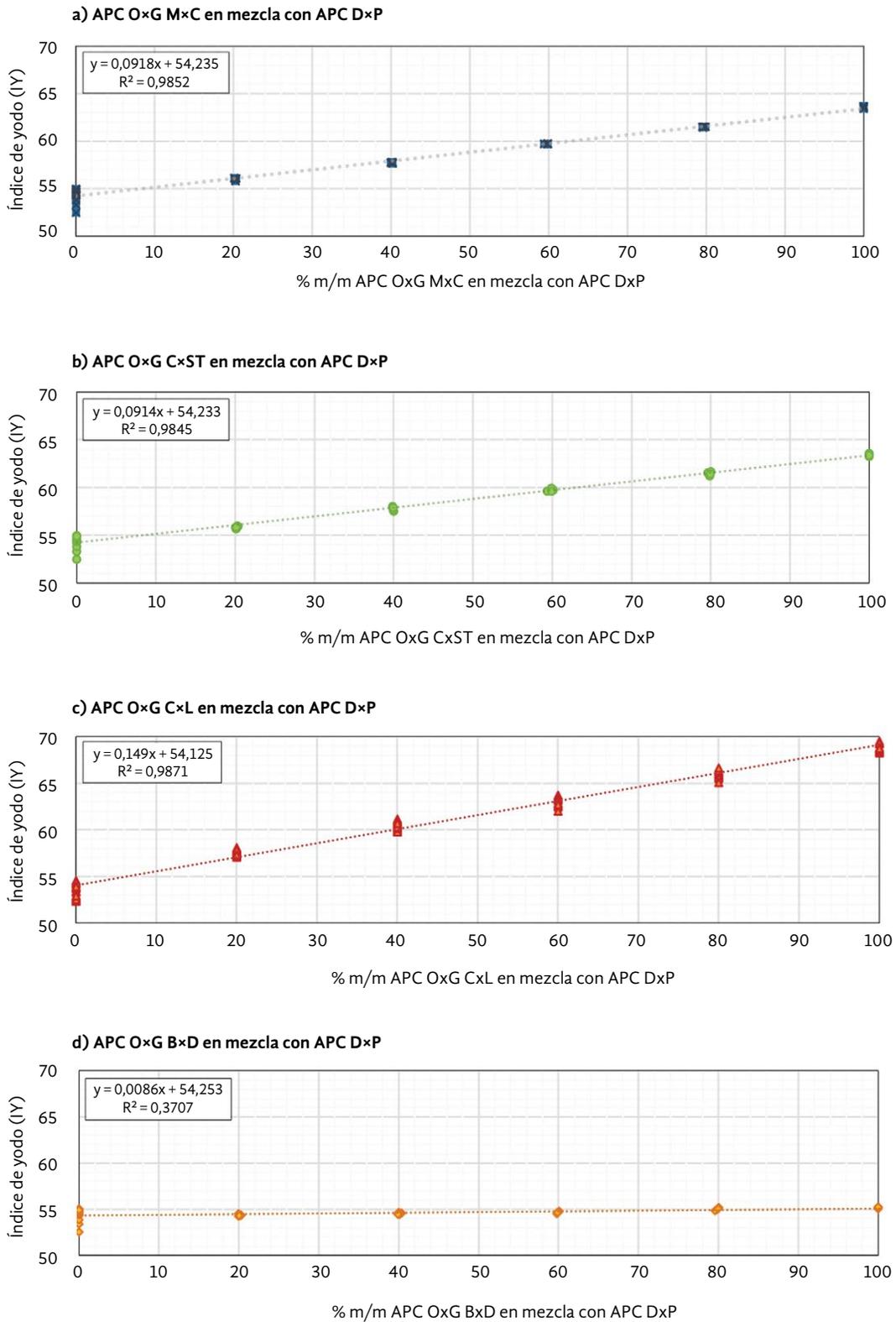
contrarse una relación importante entre el contenido porcentual en masa del APC extraído de ciertos cultivares híbrido O×G, cuando es mezclado con APC D×P, y el valor del índice de yodo calculado a partir del perfil de ácidos grasos de las muestras analizadas. Como era de esperarse, la composición química de los aceites resultantes correspondió a una mixtura molecular entre los triglicéridos que constituyen los aceites puros de los cultivares de palma procedentes, para cada caso (Tabla 1). De los resultados puede destacarse, además, que la serie conformada por las trece especies de AG que constituyen comúnmente el perfil lipídico del APC de distinto origen, permaneció constante entre los diferentes cultivares de palma estudiados, así como entre las mezclas entre APC D×P y O×G procesadas en este trabajo. No obstante, se evidenciaron variaciones composicionales (% m/m), entre cada una de las especies de ácidos grasos que componen los triglicéridos del APC D×P y del APC de cada uno de los cultivares de híbrido O×G caracterizados, y a su vez, entre todos los grupos de mezclas analizadas en este trabajo (Tabla 1 y Figura 3). Lo anterior, como consecuencia de la alteración que sufre el PAG natural de cada tipo de aceite extraído de cada cultivar O×G al ser mezclado con APC D×P. La Figura 4 representa los modelos de regresión lineal simple desarrollados a partir de los resultados obtenidos en la caracterización del grupo de muestras de APC puro de los cultivares O×G y D×P y de las mezclas procesadas a partir de estas mismas muestras de aceite (Tabla 1).

Las relaciones encontradas entre el índice de yodo calculado y las mezclas compuestas entre el APC D×P y el APC de los diferentes cultivares de híbrido O×G, permitieron ajustar los siguientes modelos:

$IY = 0,0918x_1 + 54,235$	$R^2 = 0,9852$	<b>Modelo 1.</b> Para el APC O×G M×C en mezcla con APC D×P.
$IY = 0,0914x_2 + 54,233$	$R^2 = 0,9845$	<b>Modelo 2.</b> Para el APC O×G C×ST en mezcla con APC D×P.
$IY = 0,149x_3 + 54,125$	$R^2 = 0,9871$	<b>Modelo 3.</b> Para el APC O×G C×L en mezcla con APC D×P.
$IY = 0,0086x_4 + 54,253$	$R^2 = 0,3707$	<b>Modelo 4.</b> Para el APC O×G B×D en mezcla con APC D×P.

Para cada uno de los modelos desarrollados, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) explica la variabilidad

**Figura 4.** Modelos de regresión lineal simple que relacionan el valor del índice de yodo y la composición porcentual másica del APC de los cultivares O×G, en mezcla con APC D×P.



de los datos de respuesta (IY) en torno a su media en un 98,52 % para el Modelo 1: APC O×G M×C en mezcla con APC D×P; en un 98,45 % para el Modelo 2: APC O×G C×ST en mezcla con APC D×P; en un 98,71 % para el Modelo 3: APC O×G C×L en mezcla con APC D×P; y en un 37,07 % para el Modelo 4: APC O×G B×D en mezcla con APC D×P. Indicando, además, buenos ajustes (asociación lineal entre las variables) para los Modelos 1 a 3 y un ajuste “cuestionable” o “bajo” para el Modelo 4. Esto, con base en lo descrito por McDonald (2009). Adicionalmente, los coeficientes de regresión entregados por los Modelos 1 a 3 (0,0918, 0,0914 y 0,149, correspondientemente) demostraron una alta significancia estadística ( $p < 0,05$ ), indicando, además, que por cada unidad que se cambia en la mezcla, el valor de la variable IY incrementará en 0,0918, 0,0914 y 0,149 unidades, respectivamente. A diferencia de lo anterior, puede establecerse que, bajo las condiciones de este estudio, el Modelo 4 no puede explicar, en una medida confiable, la variabilidad en los datos obtenidos para la variable IY. Luego, la variable % m/m APC O×G B×D en mezcla con APC D×P no puede utilizarse para predecir el comportamiento del IY en este tipo de mezclas. Esto pudo atribuirse a que el contenido porcentual másico de las especies de AGMI (ácido oleico + ácido vaccénico) y de AGPI (linoleico) en las muestras de estudio, resultó ser bastante similar entre el APC O×G B×D (AGMI  $\approx$  39 % m/m; AGPI  $\approx$  12 % m/m;  $IY_{\text{promedio}} = 55,17$ ) y el APC D×P (AGMI  $\approx$  40 % m/m; AGPI  $\approx$  10 % m/m;  $IY_{\text{promedio}} = 54,31$ ) (Figura 3); con un intervalo para el valor del IY entre 52,49 y 55,23, determinado en las muestras puras y en las mezclas conformadas entre ambos tipos de aceite (Tabla 1, Grupo de análisis: 4).

A nivel práctico, los Modelos 1 a 3 pueden ser empleados por las plantas de beneficio y refinadoras de APC, para la estimación del porcentaje en masa de APC O×G que se encuentre en mezcla con APC D×P. Esto, a partir de un valor de IY determinado en laboratorio para una muestra de APC (p. ej., Método de Wijs) y el despeje de la variable  $x$  del modelo correspondiente a cada mezcla, así:

$$x_1 = \frac{IY - 54,235}{0,0918} \quad x_1 = \% \text{ m/m APC O} \times \text{G M} \times \text{C en mezcla con APC D} \times \text{P.}$$

$$x_2 = \frac{IY - 54,233}{0,0914} \quad x_2 = \% \text{ m/m APC O} \times \text{G C} \times \text{ST en mezcla con APC D} \times \text{P.}$$

$$x_3 = \frac{IY - 54,125}{0,149} \quad x_3 = \% \text{ m/m APC O} \times \text{G C} \times \text{L en mezcla con APC D} \times \text{P.}$$

## 4. Conclusiones

La química en los ácidos grasos que componen las estructuras moleculares de los triglicéridos en el APC de distinta procedencia, juega un papel determinante en las propiedades fisicoquímicas de este tipo de aceites de origen vegetal, que pueden ser críticas para la obtención de los productos esperados mediante las operaciones de refinación, blanqueo, desodorizado y fraccionamiento en las refinadoras de APC (oleína y estearina de palma) o para la producción de biodiésel de palma en las refinerías encargadas de esta labor.

El contenido de ácidos grasos insaturados en el APC puede ser un factor decisivo para el direccionamiento comercial de cada tipo de aceite que pueda ser extraído de cada uno de los diferentes cultivares de híbridos interespecíficos O×G, que son sembrados en Colombia. Asimismo, la determinación del índice de yodo puede ser una herramienta valiosa para el control de la calidad de este tipo de materias primas.

Bajo las condiciones de este trabajo, el IY permite conocer, de manera aproximada, la presencia de mezclas entre APC de distinta procedencia, a partir de la caracterización de una muestra de material por medio de metodologías analíticas convencionalmente empleadas en los laboratorios de las plantas de beneficio en Colombia.

En las plantas de beneficio de palma de aceite, los modelos conseguidos a partir de las regresiones lineales simples logradas en este estudio para las mezclas entre: APC O×G M×C y APC D×P; APC O×G C×ST y APC D×P y APC O×G C×L y APC D×P, pueden ser considerados como herramientas útiles que permiten establecer, de manera fácil y con un buen nivel de confiabilidad, el cumplimiento de los límites máximos permisibles para mezclas entre APC D×P y O×G, que puedan ser acordados durante las negociaciones con los clientes.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo de Fomento Palmero (FFP), administrado por Fedepalma, por la financiación de este estudio; a la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma) y a la planta de beneficio de Guaicaramo S. A. S. por las muestras de aceite utilizadas en este estudio.

## 6. Referencias

- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2014.02.016>
- Advanced Chemistry Development Inc. (ACD/Labs). (2018). *ACD/ChemSketch* (2018.1).
- Almeida, R. F., Santos, I. R., Meira, F. S., Grynberg, P., Lopes, R., da Cunha, R. N. V., Franco, O. L., Scherwinski-Pereira, J. E. & Mehta, A. (2019). Differential Protein Profiles in Interspecific Hybrids Between *Elaeis oleifera* and *E. guineensis* with Contrasting Responses to Somatic Embryogenesis Competence Acquisition. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 137(1), 11-21. doi: <https://doi.org/10.1007/s11240-018-01545-8>
- AOCS. (2010). *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS* (D. F. Mehlenbacher, E. M. Sallee, T. H. Hopper, W. E. Link, R. O. Walker, Ed.; 6th ed.).
- Astorkia, M., Hernández, M., Bocs, S., de Armentia, E. L., Herrán, A., Ponce, K., León, O., Morales, S., Quezada, N., Orellana, F., Wendra, F., Sembiring, Z., Asmono, D. & Ritter, E. (2019). Association Mapping Between Candidate Gene SNP and Production and Oil Quality Traits in Interspecific Oil Palm Hybrids. *Plants*, 8(10). doi: <https://doi.org/10.3390/plants8100377>
- Azzi, A. (2019). Tocopherols, Tocotrienols and Tocomonoenols: Many Similar Molecules But Only One Vitamin E. *Redox Biology*, 26, Elsevier B. V. doi: <https://doi.org/10.1016/j.redox.2019.101259>
- 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 O×G (*E. oleifera* × *E. guineensis*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(3), 674-680. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.5940>
- Chang, S. W. & Lee, H. C. (2019). Vitamin D and Health-The Missing Vitamin in Humans. *Pediatrics and Neonatology* (Vol. 60, Issue 3, pp. 237-244). Elsevier (Singapore) Pte Ltd. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pedneo.2019.04.007>
- Chin Soh, A., Mayes, S., Barcelos, E., Amblard, P., Alvarado, A., Alvarado, J. H., Escobar, R., Sritharan, K., Subramaniam, M. & Arulandoo, X. (2017). *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* Interspecific Hybrid Improvement. En *Oil Palm Breeding* (1 st, pp. 283-297). CRC Press.
- Corredor, A., Martínez, G. & Carreño, Á. (2008). Problemática de la Pudrición del cogollo en Tumaco e instrumentos para su manejo y la renovación del cultivo. *Palmas*, 29, 11-16.
- De Almeida, E. S., da Silva Damaceno, D., Carvalho, L., Victor, P. A., dos Passos, R. M., de Almeida Pontes, P. V., Cunha-Filho, M., Sampaio, K. A. & Monteiro, S. (2021). Thermal and Physical Properties of Crude Palm Oil with Higher Oleic Content. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(15). doi: <https://doi.org/10.3390/app11157094>

- Dos Santos, L. K., Hatanaka, R. R., de Oliveira, J. E. & Flumignan, D. L. (2019). Production of Biodiesel From Crude Palm Oil by a Sequential Hydrolysis/Esterification Process Using Subcritical Water. *Renewable Energy*, 130, 633-640. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.102>
- FAO/WHO. (2013). *Norma para los Aceites de Oliva y Aceites de Orujo de Oliva-Codex Stan 33-1981*.
- FAO/WHO. (2019). *Draft Revision to the Standard for Named Vegetable Oils (Cxs 210-1999): Addition of Palm Oil With High Oleic Acid (Oxg)*. (Issue March).
- González-Díaz, A., García-Núñez, J. A. & Dueñas-Solarte, 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 OxG-“CxL” (Nº. 0123-8353 Índice). *Ceniavances*, 192.
- González-Díaz, A., Urrego, N. F., Díaz-Ayala, I. M., García-Núñez, J. A. & Romero, H. M. (2020). *Ácidos grasos mono y poliinsaturados: responsables de la variación en el valor del índice de yodo ( IY ) entre aceites de palma crudos procedentes de diferentes cultivares de híbridos OxG*. Fedepalma. Recuperado de <https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Cenipalma/Reunion-tecnica-2020/21Acidos%20grasos%20en%20la%20variacion%20del%20indice%20de%20yodo%20en%20aceite%20de%20palma.pdf>
- Haaker, M. W., Vaandrager, A. B. & Helms, J. B. (2020). Retinoids in Health and Disease: A Role for Hepatic Stellate Cells in Affecting Retinoid Levels. *Biochimica et Biophysica Acta-Molecular and Cell Biology of Lipids* (Vol. 1865, Issue 6). Elsevier B. V. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2020.158674>
- Israelachvili, J. N. (1974). The Nature of Van Der Waals Forces. *Contemporary Physics*, 15(2), 159-178. doi: <https://doi.org/10.1080/00107517408210785>
- Ivanova, D., Zhelev, Z., Getsov, P., Nikolova, B., Aoki, I., Higashi, T. & Bakalova, R. (2018). Vitamin K: Redox-Modulation, Prevention of Mitochondrial Dysfunction and Anticancer Effect. *Redox Biology*, 16, 52-358). Elsevier B. V. doi: <https://doi.org/10.1016/j.redox.2018.03.013>
- Kaneko, F. & Yanotj, J. (1998). Diversity in the Fatty-Acid Conformation and Chain Packing of Cis-Unsaturated Lipids. *Current Opinion in Structural Biology*, 8(4), 417-428. doi: [https://doi.org/10.1016/S0959-440X\(98\)80117-6](https://doi.org/10.1016/S0959-440X(98)80117-6)
- 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(October 2019), 103018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2019.103018>
- Lupi, F. R., Greco, V., Baldino, N., de Cindio, B., Fischer, P. & Gabriele, D. (2016). The Effects of Intermolecular Interactions on the Physical Properties of Organogels in Edible Oils. *Journal of Colloid and Interface Science*, 483, 154-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.08.009>
- Mcdonald, J. H. (2009). *Handbook of Biological Statistics* (2da ed.). Sparky House Publishing. Recuperado de <http://udel.edu/~mcdonald/statpermissions.html>

- Meléndez, M. R. & Ponce, W. P. (2016). Pollination in the Oil Palms *Elaeis guineensis*, *E. oleifera* and their Hybrids (OxG), in Tropical America. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 46(1), 102-110. doi: <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4638196>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2012). *Resolución 2154 de 2012* (p. 32).
- Morcillo, F., Vaissayre, V., Serret, J., Avallone, S., Domonhédó, H., Jacob, F. & Dussert, S. (2021). Natural Diversity in the Carotene, Tocochromanol and Fatty Acid Composition of Crude Palm Oil. *Food Chemistry*, 365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130638>
- Mulia, K., Adam, D., Zahrina, I. & Krisanti, E. A. (2018). Green Extraction of Palmitic Acid from Palm Oil Using Betaine-Based Natural Deep Eutectic Solvents. *International Journal of Technology*, 9(2), 335-344. doi: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i2.1008>
- National Center for Biotechnology Information. (2022a). *PubChem Compound Summary for CID 985, Palmitic acid*. Retrieved February 1, 2022. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/985>
- National Center for Biotechnology Information. (2022b). *PubChem Compound Summary for CID 445639, Oleic acid*. Retrieved February 1, 2022. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Oleic-acid>
- National Center for Biotechnology Information. (2022c). *PubChem Compound Summary for CID 5280450, Linoleic acid*. Retrieved February 1, 2022. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5280450>
- Osorio-Guarín, J. A., Garzón-Martínez, G. A., Delgadillo-Durán, P., Bastidas, S., Moreno, L. P., Enciso-Rodríguez, F. E., Cornejo, O. E. & Barrero, L. S. (2019). Genome-Wide Association Study (GWAS) for Morphological and Yield-Related Traits in an Oil Palm Hybrid (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*) population. *BMC Plant Biology*, 19(1), 1-11. doi: <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2153-8>
- Tan, C. H., Lee, C. J., Tan, S. N., Poon, D. T. S., Chong, C. Y. E. & Pui, L. P. (2021). Red Palm Oil: A Review on Processing, Health Benefits and its Application in Food. *Journal of Oleo Science*, 70 (9), 1201-1210). Japan Oil Chemists Society. doi: <https://doi.org/10.5650/jos.ess21108>
- 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(4), 320-329. doi: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-15-0243-RVW>
- Urrego-M., N. F., Ayala, I. M. & Romero, H. M. (2019). *Variación en la composición de ácidos grasos en cultivares híbridos entre Elaeis oleifera x Elaeis guineensis ( OxG ) sembrados en Colombia*.
- USDA-FAS. (2021, April 5). *Palm Oil Explorer*. Recuperado de [https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000&sel\\_year=2020&rankby=Production](https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000&sel_year=2020&rankby=Production)
- Wood, J. D., Enser, M., Richardson, R. I. & Whittington, F. M. (2007). Fatty Acids in Meat and Meat Products. *Fatty Acids in Foods and their Health Implications, Third Edition* (pp. 87-107). CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420006902.ch5>