

Producción de aceite de palma alto oleico (APAO) a partir de frutos partenocárpicos en híbridos interespecíficos de palma de aceite utilizando ácido naftalenacético*

High-Oleic Palm Oil (HOPO) Production from Parthenocarpic Fruits in Oil Palm Interspecific Hybrids Using Naphthalene Acetic Acid

CITACIÓN: Romero, H. M., Daza, E., Ayala-Díaz, I. & Ruiz-Romero, R. (2021). Producción de aceite de palma alto oleico (APAO) a partir de frutos partenocárpicos en híbridos interespecíficos de palma de aceite utilizando ácido naftalenacético. (Traductor Arenas, C.) *Palmas*, 43(3), 18-39.

PALABRAS CLAVE: APAO, Polinización, Reguladores del crecimiento vegetal, Auxinas, Componentes del racimo, Perfil de ácidos grasos.

KEYWORDS: HOPO, Pollination, Plant growth regulators, Auxins, Bunch components, Fatty acid profile.

NOTA DEL EDITOR: MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.

DERECHOS DE AUTOR: © 2021 de los autores. License MDPI, Basel, Switzerland. Este artículo es de acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

* Traducido del original High-Oleic Palm Oil (HOPO) Production from Parthenocarpic Fruits in Oil Palm Interspecific Hybrids Using Naphthalene Acetic Acid, publicado en la revista *Agronomy* 2021, 11, 290. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020290>

ROMERO, HERNÁN MAURICIO

Programa de Biología y Mejoramiento Genético de la Palma de Aceite de Cenipalma, Bogotá 11121, Colombia. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 11132, Colombia
* Autor de correspondencia: hmromeroa@unal.edu.co

DAZA, EDISON

Programa de Biología y Mejoramiento Genético de la Palma de Aceite de Cenipalma, Bogotá 11121, Colombia.

AYALA DÍAZ, IVÁN

Programa de Biología y Mejoramiento Genético de la Palma de Aceite de Cenipalma, Bogotá 11121, Colombia.

RUÍZ ROMERO, RODRIGO

Programa de Biología y Mejoramiento Genético de la Palma de Aceite de Cenipalma, Bogotá 11121, Colombia.

Resumen

Los híbridos interespecíficos OxG de la palma africana *Elaeis guineensis* Jacq. y la palma americana *Elaeis oleifera* Cortés producen aceite de palma alto oleico (APAO) con bajo contenido de ácidos grasos saturados. Los híbridos OxG son altamente productivos, crecen lentamente y son resistentes a la Pudrición del cogollo. Sin embargo, el polen de los híbridos OxG presenta baja viabilidad y germinabilidad, haciendo necesaria la polinización asistida. Los híbridos pueden

producir frutos partenocárpicos o sin semillas con la aplicación exógena de reguladores del crecimiento vegetal. Por lo tanto, se evaluaron los efectos del ácido naftalenacético (ANA) en la inducción de frutos partenocárpicos, la formación de racimos y la calidad del aceite. Se utilizó el híbrido OxG Coari x La Mé. Se definieron las dosis, la frecuencia, el número de aplicaciones de ANA y los estadios fenológicos para los tratamientos. Una dosis total de 1.200 mg L^{-1} de ANA aplicado 3 o 4 veces produjo racimos con mejor cuajado de frutos, peso promedio de racimo similar y relación aceite a mesocarpio seco que los obtenidos mediante polinización asistida. A escala semicomercial, 1.200 mg L^{-1} de ANA indujeron racimos que tenían un 93 % o más de frutos sin semillas. El número de racimos (2.208 ± 84 frente a 1.690 ± 129) y de aceite a racimo ($32,2 \pm 0,7$ frente a $25,3 \pm 0,8$) fueron mayores en los racimos inducidos por ANA que en la polinización asistida. Sin embargo, el peso promedio de los racimos fue menor ($12,2 \pm 0,4$ frente a $14,9 \pm 0,6$). El ANA aumentó la relación de aceite a racimo en 36 % ($8,7 \pm 0,1$ frente a $6,4 \pm 0,3$). Así, con esta tecnología es plausible alcanzar más de 10 toneladas por hectárea por año de APAO. Potencialmente, sin aumentar el área plantada de palma de aceite, los híbridos de OxG y las aplicaciones de ANA podrían por sí solas satisfacer la demanda de grasas y aceites del mundo.

Abstract

Interspecific OxG hybrids of African palm *Elaeis guineensis* Jacq. and the American palm *Elaeis oleifera* Cortes produce high-oleic palm oil (HOPO) with low saturated fatty acid content. OxG hybrids are highly productive, grow slowly, and are resistant to bud rot disease. However, OxG hybrid pollen presents low viability and germinability, so assisted pollination is a must. Hybrids can produce parthenocarpic or seedless fruits, with the exogenous application of plant growth regulators. Thus, naphthalene acetic acid (NAA) effects on parthenocarpic fruits induction, bunch formation, and oil quality were evaluated. The OxG hybrid Coari x La Mé was used. NAA doses, frequency, number of applications, and the phenological stages for the treatments were defined. A total dose of 1200 mg L^{-1} NAA applied three or four times produced bunches with better fruit set, similar average bunch weight, and oil to dry mesocarp than those obtained with assisted pollination. At a semi-commercial scale, 1200 mg L^{-1} NAA induced bunches that consisted of 93% or more of seedless fruits. Bunch number (2208 ± 84 versus 1690 ± 129) and oil to bunch (32.2 ± 0.7 versus 25.3 ± 0.8) were higher in the NAA induced bunches than in the assisted pollination. However, the average bunch weight was lower (12.2 ± 0.4 versus 14.9 ± 0.6). NAA increased oil to bunch in 36% (8.7 ± 0.1 versus 6.4 ± 0.3). Thus, with this technology, it is plausible to reach more than 10 tons per hectare per year of HOPO. Potentially, without increasing the planted oil palm area, OxG hybrids and NAA applications could alone meet the world's fats and oil demands.

1. Introducción

La producción de semillas oleaginosas ha aumentado debido a la demanda de usos tradicionales (alimentos, piensos) y usos industriales (biocombustibles). Entre 1991 y 2018, la producción de aceites comestibles casi se triplicó, pasando de 84 millones de toneladas a 231 millones de toneladas [1]. Para el año 2030, el consumo de aceite comestible será de más de 300 millones de toneladas y para el 2045 será de 500 millones de toneladas [2]. El aceite de palma ha sido responsable de satisfacer una gran parte del aumento de la demanda de aceites comestibles. En 1990, representaba menos de 14 % de los aceites consumidos, en 2018 representaba 32 % y para 2050 representará

más de 50 %. Sin embargo, los hábitos de consumo y las políticas de salud han movido al mercado hacia el consumo de aceites especializados, en su mayoría altamente insaturados y ricos en ácido oleico.

Los aceites más importantes no son naturalmente ricos en ácido oleico. Para hacer frente a las demandas de los mercados, se han realizado esfuerzos de investigación para obtener aceites de soya, colza y camelina de alto contenido oleico [3], en la mayoría de los casos, a través de modificaciones genéticas y, más recientemente, edición genética. En la palma de aceite, los híbridos interespecíficos OxG fueron desarrollados a través del fitomejoramiento convencional para contrarrestar la Pudrición del cogollo. Algunos de los cultivares obtenidos fueron genotipos con alto

contenido oleico. Como resultado, se han desarrollado híbridos interespecíficos OxG que producen aceite con más de 55 % de contenido de ácido oleico y 33 % de contenido de ácido saturado [4,5].

Los híbridos interespecíficos OxG resultan del cruce de la palma de aceite americana *Elaeis oleifera* y la palma de aceite africana *Elaeis guineensis*. Estos representan el 12 % del área total sembrada de palma de aceite en Colombia [1]. Además son altamente productivos. En una región de Colombia, la producción promedio de todos los cultivadores es de 38 t ha⁻¹ año⁻¹ de racimos de fruta fresca (RFF), con algunas plantaciones que producen cerca de 45 t ha⁻¹ año⁻¹ [6]; además, los híbridos OxG tienen una tasa de crecimiento lenta junto a las características nombradas de la calidad del aceite. Sin embargo, tienen varias características que conducen a la obligación de realizar polinización asistida utilizando polen derivado de las palmas de *E. guineensis* como requisito previo para obtener racimos bien formados con un contenido de aceite cercano al de los cultivares de *E. guineensis* [7]. La polinización asistida requerida es un proceso costoso e intensivo en mano de obra, con un gasto anual estimado de aproximadamente el 18 % del costo total del cultivo [8], lo que afecta negativamente la competitividad del mismo.

La polinización natural de los híbridos OXG es limitada debido a problemas de fertilidad, muy probablemente derivados de algún tipo de incompatibilidad sexual entre las dos especies que resulta en muy baja viabilidad y germinabilidad del polen [9]. Además, la polinización anemófila y entomófila se ve afectada por características de inflorescencia femenina, como una bráctea peduncular larga y un alto número de bractéolas que reducen el acceso de polinizadores como *Elaeidobius subvittatus* y *Mystrops costaricensis* a las flores [10]. Además, el atractivo floral (volátiles emitidos) de *E. guineensis* y el híbrido OxG es diferente, y el número de polinizadores que visitan este último es escaso en comparación con *E. guineensis*.

En los híbridos OxG, el aceite final acumulado se produce por frutos fértiles (normales) y frutos partenocárpicos (sin semilla) [5]. En muchas especies de plantas es posible inducir la formación de frutos partenocárpicos mediante la aplicación exógena de reguladores del crecimiento vegetal [11-17]. Por lo tanto, el uso de estos para reemplazar la polinización asistida en los híbridos OxG puede convertirse en una tecnología esencial para la producción de palmas de aceite.

La partenocarpia es una estrategia para inducir la formación de frutos cuando las condiciones no son propicias. Por ejemplo, cuando el polen funcional es limitado, el número o la actividad de los polinizadores se reduce o la dispersión del polen es baja [18]. El cuajado del fruto y la regulación del desarrollo de frutos son procesos complejos en los que están involucradas varias hormonas vegetales, como auxinas, giberelinas y citoquininas que actúan como reguladores positivos, mientras que el ácido abscísico y el etileno funcionan más comúnmente como reguladores negativos [19].

La inducción de frutos partenocárpicos se ha logrado en cultivares de palma de aceite africana a través de auxinas [20,21]. Sin embargo, los frutos partenocárpicos de esos cultivares eran más pequeños y tenían un mesocarpio menor que el de los normales. Además, la síntesis del aceite del fruto se vio afectada, lo que resultaba en un bajo rendimiento de aceite [22], que es diferente de la producción de aceite observada en los frutos partenocárpicos de los híbridos OxG [7]. Así, un estudio reciente ha demostrado que racimos enteramente compuestos por frutos partenocárpicos aceitosos pueden obtenerse con aplicaciones de auxina [23].

La actividad auxínica del ácido naftalenacético (ANA) ha sido reconocida durante mucho tiempo [24]. Varios estudios han demostrado que la inducción de frutos partenocárpicos con ANA es superior a otras sustancias de tipo auxina u otras hormonas vegetales [25-27]. De esta forma, este estudio tuvo como objetivo desarrollar una tecnología para superar la polinización asistida que requieren los híbridos interespecíficos de palma de aceite OxG, mediante la inducción de frutos partenocárpicos utilizando ANA, sin afectar la calidad del aceite, como medio para producir el aceite alto oleico que los mercados demandan de manera competitiva. Además, el estudio involucró la estandarización de las dosis, el tiempo, la frecuencia y el modo de aplicación.

2. Materiales y métodos

2.1. Ubicación y material vegetal

La investigación se realizó en plantaciones de palma de aceite ubicadas en la Zona Central de Colombia. La temperatura media fue de 26 °C y la precipitación media anual de 2.200 mm/año. Se utilizaron híbridos interespecíficos OxG de 5 y 6 años de edad, cultivar

Coari x La Me obtenido del cruce de *E. oleifera* ecotipo Coari (Brasil) y *E. guineensis* de la estación de La Mé (Costa de Marfil). A esta edad, las características del desarrollo floral y el crecimiento del fruto se han estabilizado [7]. Las palmas se sembraron con una densidad de 115 palmas por hectárea (experimentos 1 y 2) o 128 palmas por hectárea (experimento 3). Los tratamientos se aplicaron a las inflorescencias en etapas fenológicas específicas (Figura 1) de acuerdo con la escala de fenología BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt y Chemische Industrie) [7].

2.2. Tratamientos

Se realizaron 2 experimentos en los que se identificaron las inflorescencias en el estadio fenológico previo

a la antesis (EF 601) [7], se retiraron las brácteas pedunculares y se aislaron las inflorescencias utilizando una bolsa de poliéster (PBS International, Eastfield, Reino Unido) que bloqueó la entrada de polen transportado por el viento o por insectos polinizadores. En un tercer experimento, se utilizaron condiciones semicomerciales en las que las inflorescencias se trataron como antes pero sin aislamiento con bolsas de poliéster. Los tratamientos consistieron en una mezcla de ANA (número de producto N0640 Sigma Aldrich, Merck KGaA, Darmstadt, Alemania) con 0,25 % de adyuvante; 0,2 % de Tween 80; y 2,5 % de etanol en agua en todos los experimentos. Se asperjó una dosis total de 200 mL por inflorescencia.

El experimento uno se diseñó para definir el estadio fenológico en el que se desencadenó la formación de frutos partenocárpicos. Además, se determinó la

Figura 1. Estadios fenológicos (EF) utilizados en los diferentes experimentos. **A.** EF 603 (preantesis III); **B.** EF 607 (antesis); **C.** EF 609 (postantesis, 7 días después de la antesis); y **D.** EF 703 (postantesis, 14 días después de la antesis). Los estadios fenológicos se definieron de acuerdo con la escala fenológica de BBCH desarrollada por [7].



EF 603 preantesis III
50 % a 70 % de la bráctea peduncular está desgarrada. Las raquillas están más separadas. Los botones florales se observan fácilmente y los estigmas están cerrados.



EF 607 antesis
Los estigmas de las flores femeninas se abren en el exterior, mostrando la superficie papilar con un exudado de pectinas, azúcares y proteínas que estimulan la germinación del polen. La flor es completamente receptiva al polen.



EF 609 postantesis
La antesis ha terminado. El color de los lóbulos del estigma es marrón o negro, lo que indica que las flores ya no son receptivas al polen. Por lo general, este estadio es completamente visible siete días después de la antesis.



EF 703 postantesis
Los lóbulos del estigma son negros. Si la polinización fue exitosa, el ovario empieza el proceso de crecimiento, lo que indica el inicio del desarrollo del fruto. Por lo general, esto ocurre 14 días después de la antesis.

concentración de ANA más eficaz para inducir los frutos partenocárpicos en una sola aplicación. Se usaron diferentes soluciones de ANA cuando las inflorescencias aisladas alcanzaron los estadios fenológicos indicados en la Tabla 1. La descripción completa de los estadios fenológicos utilizados se muestra en la Figura 1.

El experimento 2 se realizó para determinar el mejor momento (estadio fenológico) y la frecuencia de aplicación utilizando las concentraciones del re-

gulador del crecimiento vegetal definidas en el experimento anterior (Tabla 2).

El experimento 3 se creó para probar la eficacia de la tecnología a escala semicomercial. Para ello, se utilizaron parcelas de 2 ha (3 parcelas por tratamiento). El tratamiento consistió en el regulador del crecimiento vegetal aplicado en la dosis y frecuencia definidas como las mejores en los experimentos anteriores (1.200 mg L⁻¹ de ANA aplicado 3 veces). La primera aplicación de ANA se realizó a las inflorescencias en

Tabla 1. Tratamientos para determinar el estadio fenológico y la concentración de ácido naftalenacético (ANA) para desencadenar la formación de frutos partenocárpicos en híbridos OxG (Coari x La Mé). Se aplicaron soluciones de ANA, una vez, en diferentes estadios fenológicos. El tratamiento de polinización asistida se realizó solo en inflorescencias en antesis (estadio fenológico 607).

ANA mg L ⁻¹	Estadio fenológico de la aplicación			
	EF 603	EF 607	EF 609	EF 703
50	X			
100	X			
200	X			
300	X			
600	X			
1.200	X			
50		X		
100		X		
200		X		
300		X		
600		X		
1.200		X		
50			X	
100			X	
200			X	
300			X	
600			X	
1.200			X	
50				X
100				X
200				X
300				X
600				X
1.200				X
PA		X		

ANA= ácido 1-naftalenacético; PA = polinización asistida.

estadios fenológicos EF 603, EF 607 o EF 609. Luego, la solución de ANA se usó 2 veces más en las mismas inflorescencias a intervalos de 7 días. Las inflorescencias en EF 607 fueron polinizadas de forma asistida con una mezcla de talco: polen 9:1 como control. En todos los experimentos, los racimos se cosecharon en

el punto de cosecha óptimo [5], alrededor de 5,5 a 6 meses después de las aplicaciones de ANA.

El experimento 3 se llevó a cabo aplicando los tratamientos en cada inflorescencia de las parcelas durante 12 meses continuos, con una duración total de experimento de alrededor de 18 meses.

Tabla 2. Tratamientos para determinar el estadio fenológico y la concentración de ácido naftalenacético (ANA) para desencadenar la formación de frutos partenocárpico en híbridos OxG (Coari x La Mé). Se aplicaron soluciones de ANA una, dos, tres o cuatro veces en diferentes estadios fenológicos. El tratamiento de polinización asistida se realizó solo en inflorescencias en antesis (estadio fenológico 607).

Tratamientos	ANA mg L ⁻¹	Estadio fenológico de la aplicación			
		1 EF 603	2 EF 607	3 EF 609	4 EF 703
1		X			
2			X		
3				X	
4					X
5		X	X		
6		X		X	
7		X			X
8	600		X	X	
9			X		X
10				X	X
11		X	X	X	
12		X	X		X
13		X		X	X
14			X	X	X
15		X	X	X	X
16		X			
17			X		
18				X	
19					X
20		X	X		
21		X		X	
22		X			X
23	1200		X	X	
24			X		X
25				X	X
26		X	X	X	
27		X	X		X
28		X		X	X
29			X	X	X
30		X	X	X	X
31	AP		X		

ANA = ácido 1-naftalenacético; PA = polinización asistida.

2.3. Análisis de calidad del racimo y del aceite

Los racimos se cosecharon en el punto de cosecha óptimo [5] para maximizar el potencial de aceite. Los análisis de los componentes del racimo se realizaron de acuerdo con [28] para registrar el peso del racimo (PR), la relación aceite a racimo (A/R), contenido de aceite por racimo (CA), la relación aceite por mesocarpio a seco (Ac/Ms), peso promedio de frutos partenocárpicos (PPFP) y cuajado del fruto. Para probar el efecto del ANA en los parámetros de calidad del aceite, el perfil de ácidos grasos se midió de acuerdo con [23], la vitamina E, los carotenoides y los ácidos grasos libres se determinaron de acuerdo con [29] en los racimos cosechados del experimento dos.

2.4. Diseño experimental y análisis estadístico

En los experimentos 1 y 2 se utilizó un diseño de bloques completos aleatorizados con 20 repeticiones por tratamiento. La unidad experimental se definió como una inflorescencia femenina de diferentes palmas. Por lo tanto, en cada experimento se seleccionaron 20 palmas diferentes por tratamiento y, en cada palma, solo se utilizó una inflorescencia para evitar cualquier interacción entre las inflorescencias y las palmas. En el experimento 3 se utilizaron parcelas de 2 ha, 3 parcelas por tratamiento. Las variables se midieron en los racimos producidos por todas las palmas de la parcela. Las variables de respuesta se sometieron a un análisis de la varianza de una vía (ANOVA) y una prueba de comparación de medias utilizando la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) ($p \leq 0,05$) para el experimento 1 y la prueba de Dunnett para el experimento 2, utilizando el *software* estadístico SAS versión 9.1.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, EE. UU.). En el experimento 3, el tratamiento con ANA se comparó con la polinización asistida mediante la prueba *t* de muestras independientes ($p \leq 0,05$), utilizando el *software* estadístico Jamovi, versión 1.2.27.0.

3. Resultados

3.1. Experimento 1. Determinación del estadio fenológico y concentración de ANA para desencadenar la formación de frutos partenocárpicos en híbridos interespecíficos de OxG

3.1.1. Efecto de las aplicaciones individuales de diferentes concentraciones de ANA en la formación de racimos

En el experimento 1, las aplicaciones únicas de soluciones de ANA en diferentes concentraciones desencadenaron la formación de racimos de frutos partenocárpicos cuando se aplicaron en diferentes estadios fenológicos. Sin embargo, hubo diferencias dependiendo de la dosis de ANA. El porcentaje más bajo de racimos formados se obtuvo con 50 mg L⁻¹ de ANA (30 % a 55 %) (Tabla 3). Las dosis de 600 mg L⁻¹ de ANA y 1.200 mg L⁻¹ de ANA indujeron 90 % y 100 % de una formación de racimo similar al porcentaje de racimos formados cuando se utilizó polinización asistida. Además, estos 2 últimos tratamientos de ANA fueron eficaces para inducir un alto porcentaje de formación de racimos en todos los estadios fenológicos, EF 603 (antes de la antesis), EF 607 (antesis), EF 609 (7 días después de la antesis) y EF 703 (14 días después de la antesis).

3.1.2. Efecto de las aplicaciones individuales de diferentes concentraciones de ANA en la formación de racimos

El peso de los racimos aumentó en respuesta a las aplicaciones de ANA con valores entre 11,5 ± 0,8 kg y 12,7 ± 0,7 kg para 600 mg L⁻¹ de ANA y entre 13,1 ± 0,7 kg y 15 ± 0,8 kg para 1.200 mg L⁻¹ de ANA. Sin embargo, en comparación con la polinización asistida (18,9 ± 1,0 kg) una única aplicación de ANA dio como resultado una reducción significativa en el PR, independientemente del estadio fenológico en el que se realizó la aplicación (Figura 2A).

Los tratamientos con ANA impactaron fuertemente la relación aceite a racimo (A/R), con incrementos de hasta 6 puntos porcentuales en racimos inducidos por ANA en comparación con los producidos por la polinización asistida. Los mejores resultados se obtuvieron con 600 mg L⁻¹ de ANA y 1.200 mg L⁻¹ de ANA aplicados en EF 609, con 30 ± 1,0 % y 31 ± 1,3 % A/R. La A/R para la polinización asistida fue de 25 ± 1,1 % (Figura 2B). La A/R aumentó con la concentración de ANA, un efecto que se mantuvo antes de la antesis (EF 603) y hasta 14 días después de la antesis (EF 703).

El ANA en dosis de 600 mg L⁻¹ y 1.200 mg L⁻¹ indujo el mayor contenido de aceite por racimo (CA) entre los tratamientos reguladores de plantas, con va-

Tabla 3. Efecto de las aplicaciones individuales de ANA en la proporción de racimos formados. Se usaron diferentes concentraciones de ANA a inflorescencias femeninas en cuatro estadios fenológicos para inducir la partenocarpia en los híbridos OxG (Coari x La Mé).

EF	ANA Mg L ⁻¹	Número de racimos			Racimos formados (%)
		Formados	Racimos malogrados	Total	
EF 603	50	9	11	20	45 %
	100	15	5	20	75 %
	200	18	2	20	90 %
	300	14	6	20	70 %
	600	20	0	20	100 %
	1.200	19	1	20	95 %
EF 607	50	6	14	20	30 %
	100	9	11	20	45 %
	200	17	3	20	85 %
	300	18	2	20	90 %
	600	20	0	20	100 %
	1.200	20	0	20	100 %
EF 609	50	9	11	20	45 %
	100	12	8	20	60 %
	200	16	4	20	80 %
	300	16	4	20	80 %
	600	16	3	20	90 %
	1.200	19	1	20	95 %
EF 703	50	11	9	20	55 %
	100	14	6	20	70 %
	200	12	8	20	60 %
	300	16	4	20	80 %
	600	18	2	20	90 %
	1.200	19	1	20	95 %
EF 607	PA	20	0	20	100 %

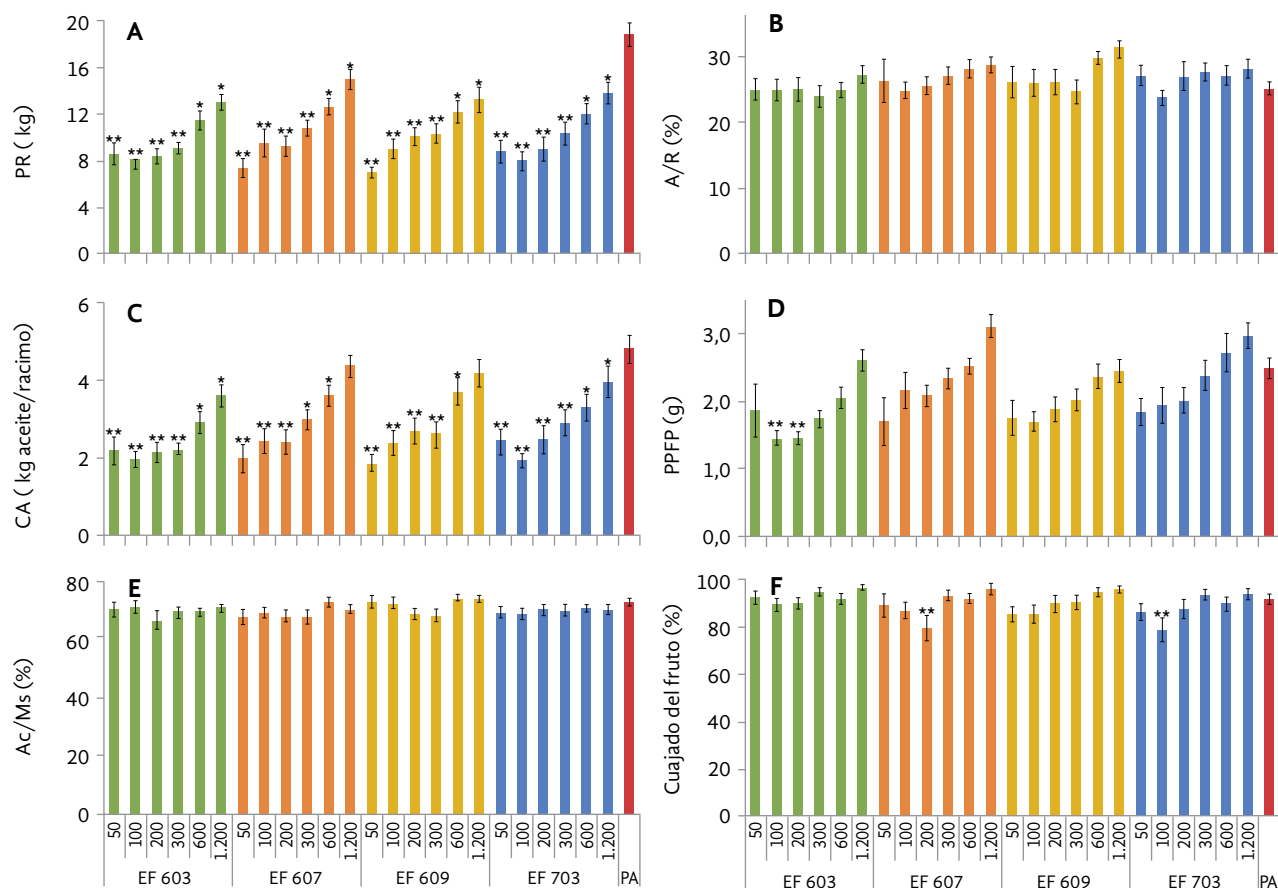
ANA = ácido naftalenacético; PA = polinización asistida; EF = estadios fenológicos para la aplicación.

lores que fluctuaron entre $2,9 \pm 0,3$ kg y $3,7 \pm 0,3$ kg con 600 mg L^{-1} de ANA, y entre $3,6 \pm 0,3$ kg y $4,3 \pm 0,3$ kg con 1.200 mg L^{-1} de ANA. Sin embargo, la polinización asistida presentó el mayor CA, con $5,2 \pm 0,4$ kg de aceite por racimo, una diferencia que se relacionó principalmente con el mayor peso del racimo del tratamiento de polinización asistida (Figura 2C).

El peso promedio de los frutos partenocárpicos (PPFP) aumentó con la concentración de ANA. Fue

significativamente mayor que la polinización asistida solo en tratamientos con 1.200 mg L^{-1} de ANA cuando se aplicó en la EF 607 o EF 703. Sin embargo, a partir de 600 mg L^{-1} de ANA, el PPFP fue similar o mayor que en los racimos obtenidos por polinización asistida (Figura 2D). Por otro lado, el ANA no cambió la proporción de aceite a mesocarpio seco (Ac/Ms) en comparación con la polinización asistida, con un valor promedio de 70 % (Figura 2E).

Figura 2. Efecto de aplicaciones individuales de diferentes concentraciones de ANA en los componentes del grupo en híbridos OxG (Coari x La Mé). Se aplicaron las soluciones de ANA una vez en diferentes estadios fenológicos (EF) (603, 607, 609, 703), representadas por los diferentes colores. El tratamiento de polinización asistida se realizó solo en inflorescencias en antesis (estadio fenológico 607), representado por la barra roja. A. Peso promedio del racimo (PR); B. Relación aceite a racimo (A/R); C. Contenido de aceite por racimo (CA); D. Peso promedio de frutos partenocárpicos (PPFP); E. Aceite a mesocarpio seco (Ac/Ms); F. Cuajado del fruto. Las diferencias estadísticamente significativas entre la polinización asistida (PA) como control comercial y los tratamientos de ANA a través de dosis/EF se indican por asteriscos (ANOVA de una vía, prueba de Dunnett, * = $p < 0,05$, ** = $p < 0,01$)



En cuanto al cuajado del fruto, a nivel general se observó una alta proporción de frutos formados (>90 %) con la mayoría de las concentraciones de ANA evaluadas. Los racimos inducidos por una aplicación de 1.200 mg L⁻¹ de ANA mostraron la mejor conformación, con valores de cuajado del fruto que fluctuaron entre 94 ± 1,9 % y 97 ± 1,1 % dependiendo del estadio fenológico en el que se realizó la primera aplicación de ANA. En el tratamiento de polinización asistida, el cuajado del fruto fue de 92 % (Figura 2F).

3.2. Experimento 2: Determinación de la frecuencia de aplicación de soluciones de ANA para inducir frutos partenocárpicos

3.2.1. Efecto de múltiples aplicaciones de 600 mg L⁻¹ de ANA y 1.200 mg L⁻¹ de ANA en la formación de racimos

La mayoría de los tratamientos de ANA indujeron una alta proporción de racimos, con valores entre el

80 % y el 100 %, similares a la polinización asistida (Tabla 4). Cuando se utilizó una dosis única de 600 mg L⁻¹ de ANA, se formaron 100 % de los racimos aplicando el ANA durante EF 603 y EF 607 (tratamientos 1 y 2). Las aplicaciones individuales en EF 609 (tratamiento 3) y EF 703 (tratamiento 4) produjeron la formación de racimos más baja, con 80 % y 90 %, respectivamente. Las aplicaciones únicas de 1.200 mg L⁻¹ de ANA indujeron entre 95 % y 100 %

de formación de racimos (tratamientos 16 a 19). Para múltiples aplicaciones de 600 mg L⁻¹ de ANA, el tratamiento 7 (2 aplicaciones en EF 603 y EF 703) indujeron el menor número de racimos (85 %). En comparación, con 1.200 mg L⁻¹ de ANA, los valores más bajos se obtuvieron con 2 aplicaciones en EF 607 y EF 703 (tratamiento 24), y con 3 aplicaciones en EF 603, EF 607 y EF 703 (tratamiento 27) con un valor de 90 % en ambos casos.

Tabla 4. Efecto de las aplicaciones individuales de ANA en la proporción de racimos formados. Se aplicaron dosis de 600 mg L⁻¹ o 1.200 mg L⁻¹ de ANA de 1 a 4 veces a inflorescencias femeninas en diferentes estadios fenológicos (EF) para inducir la partenocarpiencia en los híbridos OxG (Coari x La Mé).

Tratamiento	ANA mg L ⁻¹	EF	Número de racimos			Racimos formados (%)
			Formados	Malogrados	Total	
1	600	1	20	0	20	100
2		2	20	0	20	100
3		3	16	4	20	80
4		4	18	2	20	90
5		1, 2	18	2	20	90
6		1, 3	19	1	20	95
7		1, 4	17	3	20	85
8		2, 3	20	0	20	100
9		2, 4	20	0	20	100
10		3, 4	18	2	20	90
11		1, 2, 3	20	0	20	100
12		1, 2, 4	18	2	20	90
13		1, 3, 4	20	0	20	100
14		2, 3, 4	19	1	20	95
15		1, 2, 3, 4	20	0	20	100
16	1.200	1	19	1	20	95
17		2	20	0	20	100
18		3	19	1	20	95
19		4	19	1	20	95
20		1, 2	20	0	20	100
21		1, 3	20	0	20	100
22		1, 4	19	1	20	95
23		2, 3	20	0	20	100
24		2, 4	18	2	20	90
25		3, 4	19	1	20	95
26		1, 2, 3	20	0	20	100
27		1, 2, 4	18	2	20	90
28		1, 3, 4	19	1	20	95
29		2, 3, 4	20	0	20	100
30		1, 2, 3, 4	20	0	20	100
31	PA	2	20	0	20	100

ANA = ácido naftalenacético; PA = polinización asistida; EF = estadios fenológicos para la aplicación: 1 = EF 603; 2 = EF 607; 3 = EF 609; 4 = EF 703.

3.2.2. Efecto de múltiples aplicaciones de 600 mg L⁻¹ de ANA y 1.200 mg L⁻¹ de ANA en los componentes del racimo

Los racimos de polinización asistida (tratamiento 31) mostraron $91,5 \pm 2,2$ % de cuajado del fruto (Tabla 5), similar al obtenido en el experimento anterior (Figura 2F). Solo cuando se aplicaron 600 mg L⁻¹ de ANA una vez en EF 703 (tratamiento 4), el cuajado del fruto ($89,4 \pm 3,1$ %) se redujo en comparación con la PA. La misma concentración de ANA aplicada una vez en EF 603 o EF 607 indujo un cuajado del fruto similar a la PA (91,6 %). El resto de los tratamientos de ANA arrojaron un mayor cuajado del fruto que la PA. El mejor se alcanzó cuando se aplicaron 1.200 mg L⁻¹ de ANA 3 o 4 veces; por lo tanto, el tratamiento 27 (aplicaciones en EF 603, EF 607 y EF 703) y el tratamiento 30 (aplicaciones en EF 603, EF 607, EF 609 y EF 703) fueron los mejores con valores de cuajado del fruto cercanos a 99 %. Uno de los componentes del grupo impactado negativamente cuando los tratamientos de ANA reemplazaron la PA fue el PR (Figura 3, Tabla 5). Las aplicaciones únicas del regulador de crecimiento vegetal dieron como resultado racimos de 5 kg (1.200 mg L⁻¹ de ANA) o 6 kg (600 mg L⁻¹ de ANA) más ligeros que los producidos cuando se utilizó la polinización asistida. Fue así como 3 aplicaciones (tratamientos 11, 12 y 14) o 4 (tratamiento 15) de 600 mg de L⁻¹ de ANA indujeron racimos 3 kg más ligeros que la PA. Sin embargo, cuando se aplicaron 1.200 mg L⁻¹ de ANA, el PR tuvo una correlación positiva con el número de aplicaciones. Cuantas más veces se usaba el regulador de plantas, más masivos eran los racimos. Por lo tanto, el peso de los racimos inducidos con 3 (tratamientos 26 a 29) o 4 (tratamiento 30) aplicaciones de ANA no fue significativamente diferente del PR obtenido cuando se utilizó la PA. Además, el PR de los tratamientos 28 (aplicaciones de ANA en EF 603, EF 607 y EF 703) y 29 (aplicaciones de ANA en EF 607, EF 609 y EF 703) estuvieron muy cerca del PR de la PA ($18,6 \pm 0,8$ kg; $18,5 \pm 1,1$ kg; y $18,9 \pm 1,0$ kg, respectivamente).

Las aplicaciones de ANA aumentaron consistentemente la proporción A/R en comparación con la PA (Tabla 5). La proporción A/R en el tratamiento de PA ($25,2 \pm 1,1$ %) fue similar a la obtenida en el experimento anterior (25 %), y solo el tratamiento 1 (600 mg L⁻¹ de ANA aplicado una vez) dio como resultado una A/R ligeramente menor ($25 \pm 1,1$ %). La mayoría de los tratamientos de ANA resultaron en

una A/R estadísticamente más alta que en el tratamiento de PA. Doce de los tratamientos de ANA acumularon 4 o 5 puntos porcentuales más de aceite que la PA. Además, 2 de los tratamientos con 600 mg L⁻¹ de ANA (8, 14) y 3 con 1.200 mg L⁻¹ de ANA (18, 23, 25) acumularon 6 puntos porcentuales más de aceite que el tratamiento de PA con valores de la A/R superiores al 3 %. (Tabla 3).

En los tratamientos con ANA, el contenido de aceite en racimo (CA) fue estadísticamente similar o mayor que la polinización asistida ($4,4 \pm 0,3$ kg). Solo 3 tratamientos con 600 mg L⁻¹ de ANA (1, 2 y 4) fueron significativamente más bajos que la PA. Por otro lado, 3 de los tratamientos con 1.200 mg L⁻¹ de ANA (28, 29 y 30) fueron significativamente más altos que la PA, con contenidos de aceite de $5,6 \pm 0,3$ kg, $6,1 \pm 0,4$ kg y $5,4 \pm 0,3$ kg por grupo, respectivamente (Tabla 5).

El PFP en los tratamientos con ANA fue similar o superior a la PA (Tabla 5). En general, el PFP aumentó con el número de aplicaciones y fue mayor en los tratamientos con 1.200 mg L⁻¹ de ANA que en los tratamientos con 600 mg L⁻¹ de ANA. Por lo tanto, el PFP en los tratamientos con 600 mg de L⁻¹ de ANA de una sola aplicación (tratamientos 1 a 4) estuvo entre $2,1 \pm 0,2$ g y $2,7 \pm 0,3$ g por fruto; con 2 aplicaciones (tratamientos 5 a 10), estuvo entre $2,6 \pm 0,2$ g y $3,1 \pm 0,1$ g por fruto, y con 3 aplicaciones (tratamientos 11 a 14), estuvo entre $2,7 \pm 0,2$ g y $3,2 \pm 0,2$ g por fruto. Con 4 aplicaciones de 600 mg L⁻¹ de ANA, el PFP (tratamiento 15) alcanzó $3,2 \pm 0,1$ g. Cuando se aplicaron 1.200 mg L⁻¹ de ANA, se observó la misma tendencia, en la que el PFP aumentó con el número de aplicaciones, con valores que oscilaron entre $2,4 \pm 0,2$ g y $3,1 \pm 0,2$ g por fruto con 1 sola aplicación (tratamientos 16 a 19); $2,7 \pm 0,2$ g y $3,6 \pm 0,2$ g por fruto con 2 aplicaciones (tratamientos 20 a 25); y $3,2 \pm 0,2$ g y $3,6 \pm 0,1$ g por fruto con 3 aplicaciones (tratamientos 26 a 29). En el caso de las 4 aplicaciones, el PFP no aumentó más, sino que se redujo a $3,2 \pm 0,2$ g por fruto, que es un valor similar al obtenido con 4 aplicaciones de 600 mg L⁻¹ de ANA pero, en cualquier caso, significativamente superior a los $2,5 \pm 0,2$ g por fruto obtenidos con PA (Tabla 5).

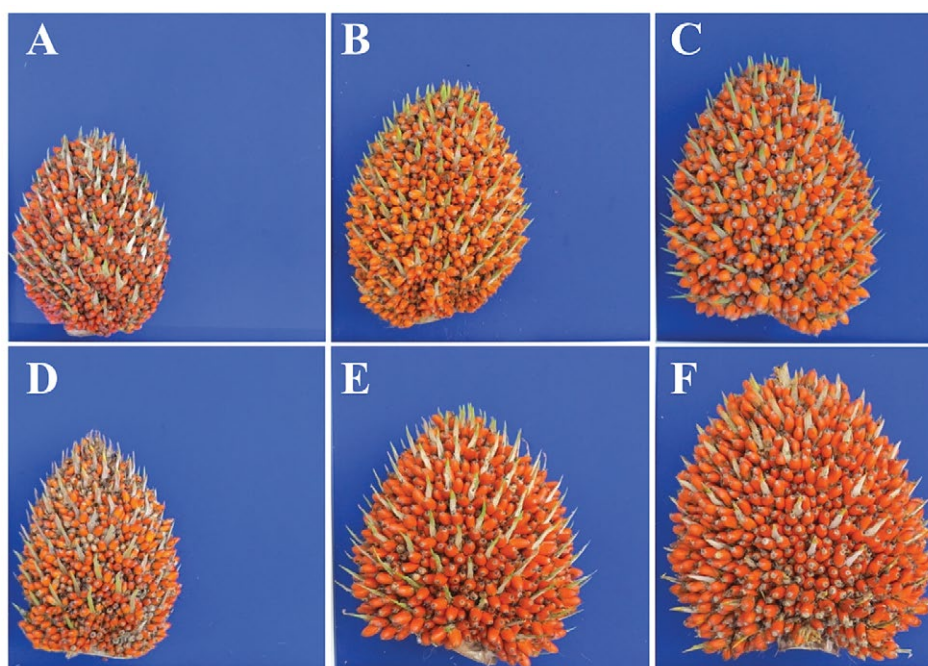
Finalmente, como en el experimento anterior, la relación Ac/Ms no se vio afectada por las aplicaciones de ANA. No se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos de ANA y la PA, con valores cercanos a 70 % en todos los casos (Tabla 5).

Tabla 5. Componentes del racimo en híbridos OxG (Coari x La Mé) tratados con 600 mg L⁻¹ o 1.200 mg L⁻¹ de ANA para inducir la partenocarpia. Se aplicaron soluciones de ANA 1, 2, 3 o 4 veces en diferentes estadios fenológicos (603, 607, 609, 703). El tratamiento de polinización asistida se realizó solo en inflorescencias en antesis (estadio fenológico 607).

Tratamiento	ANA	EF	N	Cuajado del fruto (%)	PR		Ac/Ms (%)	A/R	CA		PPFP			
	(mg L ⁻¹)				(kg)	(%)		(kg)	(g)					
1		1	20	91,6±2,3	cdef	11,5±0,8	n	68,1±1,4	25,0±1,1	f	2,9±0,3	m	2,1±0,2	ml
2		2	20	91,6±1,8	cdef	12,7±0,7	lmn	71,4±1,5	28,3±1,5	bcde	3,4±0,3	lm	2,5±0,1	klm
3		3	16	94,5±1,9	abcde	12,3±1,0	mn	72,9±1,0	29,9±1,0	abcde	3,7±0,3	ijklm	2,4±0,2	lm
4		4	15	89,4±3,1	f	12,1±0,9	mn	69,4±1,3	27,2±1,5	def	3,5±0,4	klm	2,7±0,3	hijkl
5		1,2	18	94,3±2,6	abcde	13,4±0,8	ijklmn	69,3±1,5	28,3±1,2	bcde	3,8±0,3	ijklm	2,7±0,2	hijkl
6		1,3	19	93,6±2,2	bcdef	13,6±0,9	ijklmn	69,2±1,6	28,6±1,1	abcde	4,0±0,4	hijkl	2,9±0,2	efghijk
7		1,4	17	96,8±1,0	ab	14,0±0,8	ghijklm	70,5±1,5	29,5±1,2	abcde	4,2±0,4	ghijkl	2,6±0,2	ijkl
8	600	2,3	19	97,6±0,7	ab	16,0±0,5	cdefgh	70,5±1,4	31,3±0,9	ab	5,0±0,2	bcdeg	3,1±0,1	cdefhij
9		2,4	19	90,3±2,7	ef	13,2±0,8	ijklmn	69,2±1,3	27,3±1,0	cdef	3,6±0,3	ijklm	2,8±0,2	efghijk
10		3,4	17	96,8±1,8	ab	13,4±0,6	ijklm	67,1±1,5	29,9±1,1	abcde	4,0±0,3	hijkl	2,9±0,2	defghijk
11		1,2,3	19	97,3±1,0	ab	15,1±1,0	efghijk	71,1±0,7	29,4±1,1	abcde	4,2±0,3	ghijkl	3,1±0,2	abcdefghi
12		1,2,4	18	96,1±1,2	abcd	15,2±0,5	efghijk	69,7±1,5	29,0±0,7	abcde	4,4±0,2	deghijk	3,0±0,2	cdefhij
13		1,3,4	20	94,0±1,9	abcdef	13,9±1,2	hijklm	69,1±1,0	26,8±1,1	ef	3,9±0,4	hijkl	2,7±0,2	hijkl
14		2,3,4	19	95,5±1,7	abcd	15,5±0,8	defghijk	71,2±1,1	31,1±1,0	ab	4,8±0,3	bcdegh	3,2±0,2	abcdefg
15		1,2,3,4	20	96,8±2,0	ab	15,6±0,9	cdefghij	69,6±1,2	29,2±1,2	abcde	4,7±0,4	bcdeghi	3,2±0,1	abcdefg
16		1	19	96,5±1,1	abc	13,1±0,7	klmn	69,3±1,5	27,3±1,3	cdef	3,6±0,3	klm	2,6±0,2	jkl
17		2	19	95,8±2,5	abcd	15,0±0,8	efghijkl	69,0±1,5	28,8±1,1	abcde	4,3±0,3	efghijkl	3,1±0,2	cdefghi
18		3	17	95,6±1,5	abcd	13,3±1,1	ijklmn	72,4±1,2	31,2±1,3	ab	4,1±0,4	ghijkl	2,4±0,2	lm
19		4	17	93,6±2,3	bcdef	13,9±0,9	hijklmn	68,9±1,8	28,2±1,5	bcdef	4,0±0,4	hijkl	3,0±0,2	cdefghijk
20		1,2	18	97,1±1,8	ab	16,8±1,0	abcdef	69,2±1,7	28,6±1,7	abcde	4,8±0,4	bcdegh	3,1±0,2	abcdefgh
21		1,3	20	95,5±1,6	abcd	17,2±0,9	abcdef	69,3±1,6	29,1±1,2	abcde	5,1±0,4	bcde	3,1±0,2	abcdefghi
22		1,4	18	97,6±1,9	ab	14,9±0,7	efghijkl	71,0±1,4	29,3±1,0	abcde	4,4±0,3	deghijk	2,7±0,2	ghijkl
23	1200	2,3	20	96,9±1,8	ab	15,1±0,8	efghijk	72,6±1,3	31,0±1,3	ab	4,8±0,4	bcdegh	3,1±0,2	bcdefghi
24		2,4	17	96,3±2,2	abcd	15,7±0,9	cdefghi	67,3±1,7	28,3±1,1	bcde	4,5±0,4	cdeghij	3,6±0,2	ab
25		3,4	19	97,4±1,3	ab	16,3±0,9	bcdefg	71,2±1,4	31,8±1,2	a	5,3±0,4	abcd	3,4±0,2	abcd
26		1,2,3	19	97,9±1,1	ab	17,4±0,8	abcde	70,4±1,4	28,9±1,0	abcde	5,1±0,3	bcde	3,4±0,2	abcd
27		1,2,4	17	98,8±0,4	a	17,9±1,0	abc	71,1±1,9	29,3±1,4	abcde	5,2±0,3	abcde	3,3±0,1	abcde
28		1,3,4	19	97,5±1,5	ab	18,6±0,8	ab	71,0±1,2	30,2±1,0	abcd	5,6±0,3	ab	3,4±0,2	abc
29		2,3,4	19	96,3±1,7	abcd	18,5±1,1	ab	70,5±1,2	30,7±1,2	ab	6,1±0,4	a	3,6±0,1	a
30		1,2,3,4	19	98,9±0,5	a	17,8±0,8	abcd	71,6±1,4	30,5±0,8	abc	5,4±0,3	abc	3,2±0,2	abcdef
31	pa	2	19	91,5±2,2	def	18,9±1,0	a	71,4±1,3	25,2±1,1	def	5,2±0,4	abcde	2,5±0,2	klm
LSD/significancia		-		5,0	**	2,4	***	ns	3,2	***	1,0	***	0,5	***

ANA = ácido naftalenacético; PA = polinización asistida; EF = estadio fenológico para la aplicación: 1 = EF 603; 2 = EF 607; 3 = EF 609; 4 = EF 703; PR = peso medio del racimo; A/R = porcentaje de aceite en racimo; Ac/Ms = porcentaje de aceite en el mesocarpio seco; CA = contenido de aceite por racimo; PPFP = peso medio de los frutos partenocárpicos. Los valores corresponden al promedio ± error estándar de al menos 15 racimos por tratamiento. Los valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) ($p < 0,05$); ns: no significativo, ** = $p < 0,01$, *** = $p < 0,001$.

Figura 3. Racimos formados por aplicaciones de 600 mg L⁻¹ o 1.200 mg de L⁻¹ de ANA en híbridos OxG (Coari x La Mé). Conformación de racimos mejorada con múltiples aplicaciones hormonales. Los racimos se componían solo de frutos partenocárpicos aceitosos. Las imágenes son de racimos representativos seleccionados de tratamientos iniciados en diferentes estadios fenológicos. A. Una dosis de 600 mg L⁻¹ de ANA aplicado 1 vez; B. Una dosis de 600 mg L⁻¹ de ANA aplicado 2 veces; C. Una dosis de 600 mg de L⁻¹ de ANA aplicado 3 veces; D. Una dosis de 1.200 mg L⁻¹ de ANA aplicado 1 vez; E. Una dosis de 1.200 mg L⁻¹ de ANA aplicado 2 veces; F. Una dosis de 1.200 mg L⁻¹ de ANA aplicado 3 veces.



3.2.3. Efecto de múltiples aplicaciones de 600 mg L⁻¹ de ANA y 1.200 mg de L⁻¹ de ANA en la calidad del aceite

El ANA no cambió el perfil de ácidos grasos en comparación con la polinización asistida (Tabla 6). No hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos en los diferentes ácidos grasos saturados e insaturados. Por lo tanto, en el tratamiento de PA, el contenido de ácido palmítico fue de $28,9 \pm 0,5$ %, y en los tratamientos de ANA, este ácido graso fluctuó entre $24,7 \pm 1,0$ % y $31,6 \pm 1,4$ %. El ácido oleico en los racimos de PA fue de $54,4 \pm 1,0$ %, mientras que en los tratamientos de ANA osciló entre $51,6 \pm 1,2$ % y $58,8 \pm 0,7$ %. El contenido de ácido esteárico estuvo entre $2,2 \pm 0,1$ % y $2,9 \pm 0,5$ %, mientras que el contenido de ácido linoleico fluctuó entre $8,7 \pm 2,2$ % y $11,4 \pm 0,8$ %. El total de ácidos grasos saturados osciló entre $28,4 \pm 0,8$ % y $35,0 \pm 1,4$ %, con un valor de $31,1 \pm 0,2$ % para PA. El total de ácidos grasos

insaturados osciló entre $65,0 \pm 1,4$ % y $71,6 \pm 0,8$ % en los tratamientos de ANA, mientras que en la polinización asistida representó $68,9 \pm 0,2$ % para los ácidos grasos (Tabla 6).

3.2.4. Efecto de múltiples aplicaciones de 600 mg L⁻¹ de ANA y 1.200 mg L⁻¹ de ANA en los ácidos grasos libres, vitamina E y carotenos

Los ácidos grasos libres (AGL), la vitamina E y el contenido de caroteno fueron altamente variables dentro de todos los tratamientos. No hubo diferencias estadísticas en ninguno de estos parámetros (Tabla 7). Se observaron niveles bajos de AGL con valores que oscilaron entre $0,90 \pm 0,90$ y $1,88 \pm 1,43$ (como porcentaje de ácido palmítico). Los AGL en la PA fueron de $1,17 \pm 0,51$, con el valor más alto alcanzado con 1.200 mg L⁻¹ de ANA aplicado 4 veces en EF 603, EF 607, EF 609 y EF 703 (tratamiento 30), mientras que el valor

Tabla 6. Perfil de ácidos grasos en híbridos OxG (Coari x La Mé) tratados con 600 mg de L⁻¹ o 1.200 mg L⁻¹ de ANA para inducir la partenocarpia. Se aplicaron soluciones de ANA 1, 2, 3 o 4 veces en diferentes estadios fenológicos (603, 607, 609, 703). El tratamiento de polinización asistida se realizó solo en inflorescencias en antesis (estadio fenológico 607).

Tratamiento	ANA (mg L ⁻¹)	EF	Ácido palmítico C16:0 (%)	Ácido oleico C18:1 (%)	Ácido Esteárico C18:0 (%)	Ácido linoleico C18:2 (%)	ΣAGS	ΣAGI
1		1	26,4 ± 1,7	57,9 ± 1,5	2,7 ± 0,4	10,3 ± 0,2	29,9 ± 1,56	70,1 ± 1,5
2		2	27,7 ± 0,4	55,7 ± 0,3	2,6 ± 0,4	10,9 ± 0,3	31,1 ± 0,3	68,9 ± 0,3
3		3	31,6 ± 1,4	51,9 ± 1,3	2,4 ± 0,2	10,9 ± 0,4	35,0 ± 1,4	65,0 ± 1,4
4		4	29,6 ± 1,0	54,5 ± 1,1	2,2 ± 0,1	10,5 ± 0,3	32,6 ± 1,1	67,4 ± 1,1
5		1, 2	28,2 ± 1,2	55,7 ± 2,0	2,4 ± 0,1	10,7 ± 0,7	31,4 ± 1,3	68,6 ± 1,3
6		1, 3	24,7 ± 1,0	58,8 ± 0,7	2,3 ± 0,6	8,7 ± 2,2	28,4 ± 0,8	71,6 ± 0,8
7		1, 4	27,3 ± 1,7	57,7 ± 2,0	2,9 ± 0,2	9,4 ± 0,4	31,0 ± 1,7	69,0 ± 1,7
8	600	2, 3	28,1 ± 0,9	55,6 ± 1,4	2,4 ± 0,2	10,8 ± 0,7	31,3 ± 0,8	68,7 ± 0,8
9		2, 4	29,8 ± 1,2	54,4 ± 1,5	2,4 ± 0,2	10,2 ± 0,5	33,0 ± 1,2	67,0 ± 1,2
10		3, 4	28,6 ± 1,3	55,1 ± 1,1	2,9 ± 0,5	10,3 ± 0,5	32,3 ± 1,0	67,7 ± 1,0
11		1, 2, 3	27,0 ± 1,2	57,6 ± 1,7	2,4 ± 0,2	9,9 ± 0,8	30,3 ± 1,3	69,7 ± 1,3
12		1, 2, 4	28,5 ± 0,6	56,2 ± 0,6	2,4 ± 0,2	10,0 ± 0,2	31,6 ± 0,8	68,4 ± 0,8
13		1, 3, 4	27,9 ± 0,9	55,4 ± 1,3	2,7 ± 0,2	11,0 ± 0,6	31,4 ± 1,1	68,6 ± 1,1
14		2, 3, 4	28,9 ± 1,2	55,0 ± 1,4	2,6 ± 0,2	10,2 ± 0,2	32,5 ± 1,4	67,5 ± 1,4
15		1, 2, 3, 4	28,3 ± 1,3	56,1 ± 1,2	2,4 ± 0,2	10,2 ± 0,3	31,5 ± 1,4	68,5 ± 1,4
16		1	27,8 ± 0,6	55,9 ± 0,8	2,3 ± 0,2	10,9 ± 0,4	30,9 ± 0,7	69,1 ± 0,7
17		2	27,1 ± 0,8	57,0 ± 0,6	2,5 ± 0,1	10,8 ± 0,7	30,5 ± 0,8	69,5 ± 0,8
18		3	28,4 ± 1,3	55,0 ± 2,1	2,3 ± 0,1	10,6 ± 0,7	31,5 ± 1,3	67,9 ± 1,3
19		4	30,3 ± 0,7	52,7 ± 0,8	2,4 ± 0,3	11,3 ± 0,6	32,3 ± 1,3	67,7 ± 1,3
20		1, 2	28,2 ± 1,3	55,5 ± 1,8	2,5 ± 0,2	10,7 ± 0,4	31,6 ± 1,3	68,4 ± 1,3
21		1, 3	27,4 ± 0,8	56,3 ± 1,5	2,6 ± 0,3	10,5 ± 0,8	30,9 ± 1,0	69,1 ± 1,0
22		1, 4	28,9 ± 1,4	55,3 ± 1,2	2,3 ± 0,2	10,3 ± 0,5	32,0 ± 1,4	68,0 ± 1,4
23	1.200	2, 3	29,5 ± 0,6	55,3 ± 0,8	2,3 ± 0,1	9,5 ± 0,4	32,6 ± 0,6	67,4 ± 0,6
24		2, 4	28,6 ± 0,6	55,1 ± 0,7	2,4 ± 0,1	10,8 ± 0,3	31,9 ± 0,6	68,1 ± 0,6
25		3, 4	28,2 ± 1,0	56,0 ± 1,1	2,7 ± 0,2	10,2 ± 0,4	31,7 ± 1,0	68,3 ± 1,0
26		1, 2, 3	29,3 ± 1,8	54,7 ± 2,1	2,4 ± 0,2	10,4 ± 0,4	32,6 ± 1,8	67,4 ± 1,8
27		1, 2, 4	29,4 ± 1,2	53,4 ± 1,5	2,6 ± 0,4	11,4 ± 0,8	33,0 ± 1,6	67,0 ± 1,6
28		1, 3, 4	30,1 ± 1,0	53,4 ± 1,1	2,2 ± 0,1	11,0 ± 0,4	33,2 ± 1,1	66,8 ± 1,1
29		2, 3, 4	31,0 ± 1,4	51,6 ± 1,2	2,5 ± 0,2	11,4 ± 1,0	34,5 ± 1,4	65,5 ± 1,4
30		1, 2, 3, 4	29,4 ± 1,6	55,0 ± 1,2	2,7 ± 0,4	10,0 ± 0,4	32,9 ± 1,5	67,1 ± 1,5
31	PA	-	28,9 ± 0,5	54,4 ± 1,0	2,8 ± 0,3	10,9 ± 0,4	31,1 ± 0,2	68,9 ± 0,2
Significancia		-	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ANA = ácido naftalenacético; PA = polinización asistida; EF = estadio fenológico para la aplicación: 1 = EF 603; 2 = EF 607; 3 = EF 609; 4 = EF 703. ΣAGS, total ácidos grasos saturados; ΣAGI, total ácidos grasos insaturados. Los valores corresponden al promedio ± error estándar de al menos 15 racimos por tratamiento. Los valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) ($p < 0,05$), ns: no significativo.

más bajo se obtuvo con 3 aplicaciones de 1.200 mg L⁻¹ de ANA en EF 603, 607 y 703.

La vitamina E osciló entre 945 ± 368 mg kg⁻¹ cuando se aplicaron 1.200 mg L⁻¹ de ANA 2 veces en EF 603 y EF 607 (tratamiento 20), y 1.418 ± 188 mg kg⁻¹ con 600 mg L⁻¹ de ANA aplicado 3 veces en EF 607,

EF 609 y EF 703 (tratamiento 14). La vitamina E fue de 1.272 ± 298 mg kg⁻¹ en el tratamiento de polinización asistida. Los carotenos oscilaron entre 644 ± 267 mg kg⁻¹ (tratamiento 20) y 1.355 ± 274 mg kg⁻¹ (tratamiento 2). Para el tratamiento de PA, el contenido de carotenos fue de 838 ± 512 mg kg⁻¹ (Tabla 7).

Tabla 7. Contenido de ácidos grasos libres, vitamina E y carotenos en híbridos OxG (Coari x La Mé) tratados con 600 mg L⁻¹ o 1.200 mg L⁻¹ de ANA para inducir la partenocarpia. Se aplicaron soluciones de ANA 1, 2, 3 o 4 veces en diferentes estadios fenológicos (603, 607, 609, 703). El tratamiento de polinización asistida se realizó solo en inflorescencias en antesis (estadio fenológico 607).

Tratamiento	ANA Mg L ⁻¹	EF	AGL (% ácido palmítico)	Vitamina E mg kg ⁻¹	Carotenos mg kg ⁻¹
1		1	1,43 ± 1,24	1.247 ± 387	949 ± 395
2		2	1,13 ± 0,59	1.259 ± 312	1.355 ± 274
3		3	1,39 ± 1,06	1.309 ± 292	1.000 ± 176
4		4	1,14 ± 0,49	1.320 ± 227	1.041 ± 205
5		1, 2	0,99 ± 0,73	1.341 ± 259	1.002 ± 250
6		1, 3	1,04 ± 0,60	1.140 ± 101	998 ± 168
7		1, 4	1,48 ± 0,94	1.158 ± 109	1.048 ± 361
8	600	2, 3	0,92 ± 0,57	906 ± 350	968 ± 184
9		2, 4	1,29 ± 0,54	1.319 ± 131	725 ± 441
10		3, 4	0,94 ± 0,58	1.026 ± 103	1.007 ± 141
11		1, 2, 3	1,01 ± 0,39	1.209 ± 245	1.133 ± 120
12		1, 2, 4	0,99 ± 0,57	1.129 ± 163	946 ± 249
13		1, 3, 4	1,19 ± 0,49	1.299 ± 253	973 ± 426
14		2, 3, 4	1,45 ± 0,53	1.418 ± 188	689 ± 243
15		1, 2, 3, 4	1,45 ± 0,46	1.261 ± 257	818 ± 454
16		1	1,45 ± 0,36	1.167 ± 213	979 ± 139
17		2	1,16 ± 0,73	1.198 ± 309	1.098 ± 240
18		3	1,56 ± 1,06	1.361 ± 222	865 ± 183
19		4	1,20 ± 0,33	1.207 ± 473	1.109 ± 385
20		1, 2	1,15 ± 0,42	945 ± 368	644 ± 267
21		1, 3	1,54 ± 0,59	1.088 ± 476	865 ± 68
22		1, 4	1,32 ± 1,25	1.131 ± 151	865 ± 439
23	1.200	2, 3	1,11 ± 0,57	1.289 ± 338	1.132 ± 151
24		2, 4	1,48 ± 1,06	1.245 ± 470	761 ± 239
25		3, 4	1,58 ± 0,58	1.037 ± 240	947 ± 254
26		1, 2, 3	1,63 ± 0,80	1.093 ± 180	554 ± 130
27		1, 2, 4	0,90 ± 0,90	1.056 ± 285	765 ± 433
28		1, 3, 4	1,27 ± 0,41	1.064 ± 132	719 ± 222
29		2, 3, 4	1,38 ± 0,61	1.331 ± 511	1.093 ± 285
30		1, 2, 3, 4	1,88 ± 1,43	989 ± 103	897 ± 392
31	PA	-	1,17 ± 0,51	1.272 ± 298	838 ± 512
Significancia		-	ns	ns	ns

ANA = ácido naftalenacético; PA = polinización asistida; EF = estadio fenológico para la aplicación: 1 = EF 603; 2 = EF 607; 3 = EF 609; 4 = EF 703. Vitamina E = suma de tocotrienoles δ, β/γ, α más tocoferoles δ, β/γ, α; carotenos = suma de α más β-caroteno. Los valores corresponden al promedio ± error estándar de al menos 15 racimos por tratamiento. Los valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) (p < 0,05), ns: no significativo.

3.3. Experimento 3: Efecto de las aplicaciones de ANA en condiciones de escala semicomercial

La Tabla 8 muestra el efecto de las aplicaciones continuas de 1.200 mg L⁻¹ de ANA en las inflorescencias de las parcelas de 2 hectáreas. Después de 12 meses de uso de la tecnología, el cuajado del fruto en ambos tratamientos (ANA y PA) no mostró diferencias estadísticas, con 93,2 ± 1,1 % en el tratamiento de ANA y 90,8 ± 1,8 % en la PA. En el caso del NR, el tratamiento con ANA indujo la formación de un 30 % más de racimos que la PA (2.208 ± 84 racimos frente a 1.690 ± 129, respectivamente). Sin embargo, los racimos de tratamiento de ANA fueron, en promedio, 2,7 kg más ligeros que los de PA. Como resultado, los RFF no mostraron diferencias estadísticas entre los 2 tratamientos.

Como se observó en los experimentos 1 y 2, la acumulación de aceite se vio afectada positivamente por el tratamiento de ANA. El A/R en el tratamiento de ANA fue 7 puntos porcentuales más alto que en la PA (32,2 ± 0,7 % versus 25,3 ± 0,8 %). Lo que resultó en casi 36 % más de rendimiento de aceite en el tratamiento de ANA en comparación con la PA, con una producción de aceite adicional de 2,3 t ha⁻¹ año⁻¹ en el tratamiento de ANA, en comparación con la polinización asistida.

4. Discusión

El propósito principal de esta investigación fue desarrollar un sistema que pudiera reemplazar la polinización asistida, una tarea esencial para obtener

racimos de frutas a nivel comercial en los diferentes cultivares de OxG plantados en todo el mundo [30], induciendo la formación de frutos partenocárpico. Los resultados muestran que las aplicaciones exógenas de ANA en estadios fenológicos específicos de las inflorescencias dan frutos partenocárpico productores de aceite.

La inducción de frutos partenocárpico se logró con aplicaciones de ANA en diferentes momentos antes y después de la antesis. Los racimos se formaron cuando se aplicó ANA, independientemente del estadio fenológico en el que ocurrieron las aplicaciones. Por lo tanto, los racimos se indujeron con aplicaciones de ANA antes de la antesis (EF 603) y hasta 14 días después de la antesis (EF 703). Por el contrario, los diferentes modelos utilizados para estudiar la partenocarpia han mostrado un papel significativo de las auxinas en el cuajado del fruto y la partenocarpia justo antes o algunos días después de la antesis. Luego, la concentración de auxinas disminuye para permitir la acción de otras hormonas como las giberelinas [31]. Por ejemplo, en el tomate, los niveles de auxinas son bajos dos días antes de la antesis y comienzan a aumentar después de la antesis, alcanzando el valor máximo cuatro días después de la antesis (DDA) y disminuyendo rápidamente después de eso [32,33]. En la palma africana, las auxinas aplicadas no lograron inducir frutos partenocárpico productores de aceite [21], a pesar de que la partenocarpia se logró cuando la hormona se utilizó muy cerca de la antesis [34]. Por lo tanto, el momento de aplicación es fundamental no solo para inducir la formación de frutos, sino también para su crecimiento y la acumulación de aceite.

Tabla 8. Componentes del racimo en híbridos OxG (Coari x La Mé) tratados con 1.200 mg L⁻¹ de ANA para inducir la partenocarpia a nivel de plantación. Se aplicaron las soluciones de ANA 3 veces, comenzando en EF 607 y volviendo a aplicar en EF 609 y EF 703.

Tratamiento	Cuajado del fruto (%) ns	NR *	PR (kg) *	RFF (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	A/R (%) **	Rendimiento de aceite (t ha ⁻¹ año ⁻¹) **
ANA	93,2 ± 1,1	2.208 ± 84	12,2 ± 0,4	26,9 ± 1,6	32,2 ± 0,7	8,7 ± 0,1
PA	90,8 ± 1,8	1.690 ± 129	14,9 ± 0,6	25,2 ± 2,2	25,3 ± 0,8	6,4 ± 0,3

ANA= ácido naftalenacético; PA= polinización asistida; NR = número de racimos; PR = peso medio de los racimos; RFF= racimos de fruta fresca; A/R = porcentaje de aceite en racimo. Los valores corresponden al promedio ± error estándar de todos los racimos formados en 2 ha por réplica, 4 réplicas por tratamiento para un total de 8 ha. Las medias se compararon con las muestras independientes t-test. ns: no significativo, * p ≤ 0,05 ** p ≤ 0,01.

Los frutos de la palma de aceite completan su desarrollo y maduración en aproximadamente 160 días. Tienen un crecimiento bifásico, con un aumento inicial de la masa y el tamaño entre 30 días y 60 días después de la polinización. Posteriormente, existe un periodo de retardo de 40 días (60-100 DDA) en el que se reduce la tasa de crecimiento total. Finalmente, los frutos muestran un nuevo aumento de peso, particularmente entre 140 y 160 DDA, acompañado de un aumento en el tamaño [35]. Por esta razón, los tiempos seleccionados para las aplicaciones de ANA fueron los más adecuados, tanto en los estadios fenológicos antes de la antesis para desencadenar el inicio del fruto como durante los primeros 14 días después de la antesis, para la división y expansión celular.

Estos resultados indican un doble papel para el ANA. Activa la iniciación del fruto y luego induce y estabiliza el crecimiento de las células frutales evitando la abscisión prematura y conduciendo a una mayor acumulación de biomasa de mesocarpio. Además, el ANA desencadena una cascada de transducción de señales que libera el cuajado del fruto y el desarrollo partenocárpico en los híbridos OxG durante un periodo más prolongado que en la palma de aceite africana, lo que indica una ventana de competencia para la inducción de frutos más grande en estos híbridos que en otras especies. En este sentido, el estudio de Yeap, *et al.* [36] mostró que, en términos de regulación génica durante la producción de fruto normal de palma de aceite, existe una fase de retardo de desarrollo de mesocarpios en la que la auxina y la giberelina están en la concentración máxima. Según su análisis, esta fase podría durar hasta 14 semanas después de la polinización. Potencialmente, el estímulo adecuado cuando los ovarios aún son receptivos podría traducirse en el desarrollo del cuajado del fruto y el desarrollo partenocárpico durante una ventana de competencia más larga.

La inducción de frutos partenocárpico en diferentes estadios fenológicos contrasta con la limitación temporal de la aplicación de polen en la PA. En esta, el polen debe aplicarse en la antesis (EF 607) cuando las flores son receptivas al mismo. Cuando el polen se utiliza después de la antesis, no desencadena el cuajado y el desarrollo del fruto, lo que conduce a resultados indeseables que van desde el aborto por inflorescencia hasta los racimos con frutos de bajo relleno y poco desarrollados. Por lo tanto, utilizando ANA, los ciclos de aplicación para inducir la formación de frutos podrían ser más largos porque la inflo-

rescencia presenta una respuesta favorable a la formación de los frutos que no están circunscritos a EF 607. En consecuencia, la aplicación hormonal para inducir la partenocarpia se puede realizar una vez a la semana, en comparación con tres veces a la semana que se realiza en la PA. Como resultado, la mano de obra podría optimizarse, reduciendo los costos de producción y las pérdidas causadas por los racimos no formados típicos de la PA no realizada en EF 607.

Las hormonas vegetales generalmente se producen en bajas concentraciones en las células, por debajo de las de otros compuestos como nutrientes y vitaminas [37]. Dependiendo de su concentración, las hormonas vegetales estimulan o inhiben la misma respuesta [11]. Los resultados muestran que la formación de racimos está relacionada con la concentración de ANA aplicada en los diferentes estadios fenológicos. Por lo tanto, el éxito en la formación de racimos fue mayor con 600 mg L⁻¹ y 1.200 mg L⁻¹ de ANA, mientras que la formación de racimos más baja se alcanzó con 50 mg L⁻¹ de ANA. Los tratamientos con 1.200 mg L⁻¹ mostraron consistentemente los resultados más sobresalientes en la formación de racimos, los componentes de racimos y el rendimiento de aceite.

La inducción de frutos partenocárpico con hormonas vegetales generalmente conduce al desarrollo anormal de órganos y productos más pequeños y malformados [31]. Además, las aplicaciones de auxina o giberelina para este fin desencadenan la abscisión prematura con los consiguientes porcentajes bajos de cuajado del fruto [18]. En los híbridos OxG con 1.200 mg L⁻¹ de ANA aplicados 3 veces a las inflorescencias no mostraron esos inconvenientes típicos, pero dieron como resultado un cuajado de frutos alto (96 % a 99 %), con frutos que fueron 30 % más pesados que los producidos con PA.

Una consecuencia de los frutos partenocárpico más grandes inducidos por ANA fue el aumento del rendimiento de aceite. Debido a que había más mesocarpio por fruto, la producción total fue mayor a pesar de que el aceite en el mesocarpio seco no cambió. Por lo tanto, las múltiples aplicaciones de ANA fueron fundamentales para obtener altas proporciones de aceite a racimo. En este sentido, el bajo rendimiento de aceite obtenido en los frutos inducidos por auxinas en *E. guineensis* [21] podría haber sido el resultado de no usar la auxina adecuada o no usarla en los estadios fenológicos correctos. Además, las aplicaciones repetidas no se realizaron en esos ex-

perimentos tempranos y no se obtuvieron frutos más grandes ni un cuajado del fruto más alto. Los resultados abren una puerta para revisar la posibilidad de inducir frutos partenocárpicos en *E. guineensis*. Es plausible que estos puedan reproducirse en la palma de aceite africana ajustando las dosis y los tiempos de aplicación. Esta tecnología es atractiva porque los programas de mejoramiento de *E. guineensis* están produciendo cada vez más cultivares altamente femeninos en los que la polinización natural está restringida debido a la falta de inflorescencias que generen polen masculino. Además, las poblaciones de polinizadores naturales han ido disminuyendo con consecuencias sustanciales en la formación de racimos, el aborto en racimos y el rendimiento total de aceite [38].

Es plausible que los inconvenientes atribuidos a la inducción de frutos con hormonas [18] sean el resultado de no usar la concentración correcta en los estadios fenológicos apropiados, abriendo una puerta para más investigaciones con el fin de definir mejor las dosis, las frecuencias y el tiempo de aplicación. El resultado podría ser la producción comercial de frutos partenocárpicos de diferentes especies.

Los resultados muestran que el ANA podría usarse en condiciones comerciales. Los tratamientos hormonales aplicados durante un año dieron como resultado frutos más grandes, más racimos por hectárea de mejor conformación y un mayor cuajado del fruto que la polinización asistida. En las condiciones semicomerciales del experimento 3, los racimos de ANA produjeron hasta un 36 % más de aceite que la PA, con una relación de aceite a racimo mayor que el 32 %. Como consecuencia, fue posible obtener más de 2 toneladas adicionales de aceite por hectárea por año. Sin embargo, algunos parámetros de productividad fueron más bajos en las condiciones semicomerciales que en los experimentos 1 y 2. Por ejemplo, en el experimento 2, la reducción en el peso promedio de los racimos (PR) fue mínima con 1.200 mg L⁻¹ de ANA aplicado 3 veces, en comparación con la polinización asistida. Los racimos en las condiciones semicomerciales del experimento 3 fueron, en promedio, 2,7 kg más ligeros. En los experimentos 1 y 2, se midieron cuajados del fruto de hasta 99 %, mientras que en condiciones semicomerciales este se acercó a 93 %. Por lo tanto, a pesar de la alta cantidad de aceite a racimo obtenida y la alta cantidad de racimos, el aumento de 36 % en el rendimiento de aceite en las condiciones semicomerciales del experimento 3 po-

dría mejorarse, aún más con una aplicación de ANA más cuidadosa.

Una de las principales características de los híbridos OxG es su calidad de aceite en términos de alto porcentaje de ácido oleico y un contenido considerable de fitonutrientes como la vitamina E y los carotenos [39]. Los resultados muestran que los frutos partenocárpicos inducidos por las aplicaciones de ANA producen aceite de la misma calidad que cuando se utiliza la polinización asistida. Un aceite que se considera alto oleico (más del 55 % de ácido oleico) y rico en fitonutrientes, con bajos niveles de AGL.

El uso comercial de los híbridos está limitado por un bajo llenado y maduración, la necesidad de una costosa polinización asistida y bajos rendimientos de aceite [4]. Mediante la aplicación de ANA se superan esas limitaciones, dejando a la industria de la palma de aceite con un cultivo resistente a enfermedades como la Pudrición del cogollo, que tiene una vida comercial más larga debido a su baja tasa de crecimiento y que produce un aceite de muy alta calidad, lleno de antioxidantes y fitonutrientes.

Los híbridos de OxG son altamente productivos. Las plantaciones comerciales pueden producir más de 40 t ha⁻¹ año⁻¹ de RFF, lo que, junto con el alto rendimiento de aceite obtenido usando ANA (aproximadamente 27 % de tasa de extracción de aceite o más), da como resultado más de 10 t ha⁻¹ año⁻¹ de aceite de palma alto oleico. Si esta tecnología se implementa en el área plantada de palma de aceite en todo el mundo, la producción de aceite estaría cerca de las 250 millones de toneladas por año, satisfaciendo la demanda de grasas y aceites del mundo sin utilizar tierras cultivables adicionales.

Aportes de los autores: conceptualización, H. M. R.; metodología, H. M. R., E. D.; análisis formal, H. M. R., E. D., I. A.-D., R. R.-R.; investigación, H. M. R., E. D., I. A.-D., R. R.-R.; escritura del primer borrador, H. M. R., E. D., I. A.-D., R. R.-R.; escritura, revisión y edición, H. M. R., I. A.-D. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: esta investigación fue financiada por el Fondo de Fomento Palmero (FFP), administrado por Fedepalma.

Declaración de disponibilidad de datos: los datos presentados en este estudio están disponibles a petición enviada al autor correspondiente. Los datos no están disponibles públicamente debido a restricciones de privacidad.

Reconocimientos: los autores agradecen al personal del Programa de Biología y Reproducción de Cenipalma. También desean agradecer a las plantaciones Villa Claudia S. A. y Monterrey S. A. por proporcionar sus instalaciones, apoyo técnico y personal para llevar a cabo este estudio de investigación.

Conflicto de intereses: los autores declaran que no hay conflicto de intereses. Los financiadores no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio; en la recolección, análisis o interpretación de datos; en la redacción del manuscrito; o en la decisión de publicar los resultados.

Abreviaturas

ANA	Acido 1-naftalenacético
APAO	Aceite de palma alto oleico

OxG	Híbridos interespecíficos de palma de aceite entre <i>Elaeis oleifera</i> × <i>Elaeis guineensis</i>
EF	Estadios fenológicos
PA	Polinización asistida
PR	Peso del racimo
NR	Número de racimos
RFF	Racimos de fruta fresca
A/R	Relación aceite a racimo (%)
CA	Contenido de aceite por racimo (kg de aceite/racimo)
Ac/Ms	Relación aceite a mesocarpio seco (%)
PPFP	Peso promedio de frutos partenocárpico (g)
DDA	Días después de la antesis
AGS	Ácidos grasos saturados
AGI	Ácidos grasos insaturados
AGL	Ácidos grasos libres

Referencias

1. Fedepalma. *Anuario estadístico 2019 La Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia y el Mundo 2014-2018*; Federación Colombiana de Cultivadores de Palma de Aceite: Bogotá, Colombia, 2019; p. 236.
2. Oil World. *Oil World Annual*; ISTA Mielke GmBH: Hamburgo, Alemania, 2018.
3. Faure, J.-D.; Napier, J.A. Point of View: Europe's first and last field trial of gene-edited plants? *eLife* **2018**, *7*, e42379. [CrossRef] [PubMed]
4. Mozzon, M.; Foligni, R.; Mannozi, C. Current knowledge on interspecific hybrid palm oils as food and food Ingredient. *Foods* **2020**, *9*, 631. [CrossRef]
5. Rincón, S.M.; Hormaza, P.A.; Moreno, L.P.; Prada, F.; Portillo, D.J.; García, J.A.; Romero, H.M. Use of phenological stages of the fruits and physicochemical characteristics of the oil to determine the optimal harvest time of oil palm interspecific OxG hybrid fruits. *Ind. Crops Prod.* **2013**, *49*, 204-210. [CrossRef]
6. Mosquera-Montoya, M.; Ruiz, E.; Munévar-Martínez, D.E.; Castro, L.; Moreno, L.P.; López-Alfonso, D.F. Oil palm agroindustry 2019 production costs: A benchmarking study among companies that have adopted good practices. *Rev. Palmas* **2020**, *41*, 4-14.
7. Hormaza, P.; Fuquen, E.M.; Romero, H.M. Phenology of the oil palm interspecific hybrid *Elaeis oleifera* *Elaeis guineensis*. *Sci. Agric.* **2012**, *69*, 275-280. [CrossRef]

8. Mosquera-Montoya, M.; Ruíz-Álvarez, E.; Castros-Zamudio, L.E.; López-Alfonso, D.F.; Munévar-Martínez, D.E. Estimación del costo de producción para productores de palma de aceite de Colombia que han adoptado buenas prácticas agrícolas. *Rev. Palmas* **2019**, *40*, 3-15.
9. Criollo-Escobar, H.; Domínguez, J.J. Germinability and pollen viability of four improved cultivars of palm oil under laboratory conditions. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* **2018**, *71*, 8395-8405. [CrossRef]
10. Meléndez, M.R.; Ponce, W.P. Pollination in the oil palms *Elaeis guineensis*, *E. oleifera* and their hybrids (OxG), in tropical America. *Pesqui. Agropecuaria Trop.* **2016**, *46*, 102-110. [CrossRef]
11. Davies, P.J. Regulatory factors in hormone action: Level, location and signal transduction. En *Plant Hormones*, Revised 3rd ed.; Davies, P.J., Ed.; Springer: New York, NY, USA, 2010; pp. 16-35. [CrossRef]
12. Tu, D.P.; Luo, Z.L.; Wu, B.; Ma, X.J.; Shi, H.W.; Mo, C.M.; Huang, J.; Xie, W.J. Developmental, chemical and transcriptional characteristics of artificially pollinated and hormone-induced parthenocarpic fruits of *Siraitia grosvenorii*. *RSC Adv.* **2017**, *7*, 12419-12428. [CrossRef]
13. Lu, L.; Liang, J.J.; Zhu, X.; Xiao, K.; Li, T.Z.; Hu, J.F. Auxin- and cytokinin-induced berries set in grapevine partly rely on enhanced gibberellin biosynthesis. *Tree Genet. Genom.* **2016**, *12*. [CrossRef]
14. Tang, N.; Deng, W.; Hu, G.J.; Hu, N.; Li, Z.G. Transcriptome profiling reveals the regulatory mechanism underlying pollination dependent and parthenocarpic fruit set mainly mediated by auxin and gibberellin. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0125355. [CrossRef] [PubMed]
15. Niu, Q.F.; Wang, T.; Li, J.Z.; Yang, Q.Q.; Qian, M.J.; Teng, Y.W. Effects of exogenous application of GA(4+7) and N-(2-chloro-4pyridyl)-N'-phenylurea on induced parthenocarpy and fruit quality in *Pyrus pyrifolia* 'Cuiguan'. *Plant Growth Regul.* **2015**, *76*, 251-258. [CrossRef]
16. Hikosaka, S.; Sugiyama, N. Effects of exogenous plant growth regulators on yield, fruit growth, and concentration of endogenous hormones in gynocious parthenocarpic cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Hortic. J.* **2015**, *84*, 342-349. [CrossRef]
17. Boyaci, H.F.; Oguz, A.; Yazici, K.M.; Eren, A. The efficacy of endogenous gibberellic acid for parthenocarpy in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Afr. J. Biotechnol.* **2011**, *10*, 6522-6528. [CrossRef]
18. Subbaraya, U.; Rajendran, S.; Simeon, S.; Suthanthiram, B.; Marimuthu Somasundram, S. Unravelling the regulatory network of transcription factors in parthenocarpy. *Sci. Hort.* **2020**, *261*. [CrossRef]
19. McAtee, P.; Karim, S.; Schaffer, R.; David, K. A dynamic interplay between phytohormones is required for fruit development, maturation, and ripening. *Front. Plant Sci.* **2013**, *4*. [CrossRef]

20. Keong, W.C. Development of parthenocarpic fruits in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) due to application of herbicides. *Planter* **1987**, 63, 90-95.
21. Thomas, R.L.; Seth, A.K.; Chan, K.W.; Ooi, S.C. Induced parthenocarpy in the oil-palm. *Ann. Bot.* **1973**, 37, 447-452. [CrossRef]
22. Corley, R.H.V.; Tinker, P.B. *The Oil Palm*, 4th ed.; Blacwell, S., Ed.; Blacwell Science: Oxford, UK, 2003; volumen 83, pp. 221-222.
23. Daza, E.; Ayala-Díaz, I.; Ruíz-Romero, R.; Romero, H.M. Effect of the application of plant hormones on the formation of parthenocarpic fruits and oil production in oil palm interspecific hybrids (*Elaeis oleifera* Cortés x *Elaeis guineensis* Jacq.). *Plant Prod. Sci.* **2020**, 1-9. [CrossRef]
24. Avery Jr., G.; Berger, J.; Shalucha, B. Comparative activity of synthetic auxins and derivatives. *Bot. Gaz.* **1942**, 104, 281-287. [CrossRef]
25. Aliyu, O.M.; Adeigbe, O.O.; Awopetu, J.A. Foliar application of the exogenous plant hormones at pre-blooming stage improves flowering and fruiting in cashew (*Anacardium occidentale* L.). *J. Crop. Sci. Biotechnol.* **2011**, 14, 143-150. [CrossRef]
26. Qian, C.; Ren, N.; Wang, J.; Xu, Q.; Chen, X.; Qi, X. Effects of exogenous application of CPPU, NAA and GA4+ 7 on parthenocarpy and fruit quality in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Food Chem.* **2018**, 243, 410-413. [CrossRef]
27. Hassan, J.; Miyajima, I. Induction of parthenocarpy in pointed gourd (*Trichosanthes dioica* Roxb.) by application of plant growth regulators. *J. Hortic. Plant Res.* **2019**, 8, 13. [CrossRef]
28. Prada, F.; Romero, H.M. Muestreo y análisis de racimos en el cultivo de la palma de aceite. Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite, guía de facilitadores; Cenipalma: Bogota, Colombia, 2012; p. 158.
29. Prada, F.; Ayala-Díaz, I.M.; Delgado, W.; Ruíz-Romero, R.; Romero, H.M. Effect of fruit ripening on content and chemical composition of oil from three oil palm cultivars (*Elaeis guineensis* Jacq.) grown in Colombia. *J. Agric. Food Chem.* **2011**, 59, 10136-10142. [CrossRef]
30. Sánchez, A.; Daza, E.; Ruiz, R.; Romero, H.M. Polinización asistida en palma de aceite. Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite: guía para facilitadores; Cenipalma: Bogotá, Colombia, 2011; p. 167.
31. Sotelo-Silveira, M.; Marsch-Martínez, N.; de Folter, S. Unraveling the signal scenario of fruit set. *Planta* **2014**, 239, 1147-1158. [CrossRef]
32. Kim, J.S.; Ezura, K.; Lee, J.; Kojima, M.; Takebayashi, Y.; Sakakibara, H.; Ariizumi, T.; Ezura, H. The inhibition of SLIAA9 mimics an increase in endogenous auxin and mediates changes in auxin and gibberellin signalling during parthenocarpic fruit development in tomato. *J. Plant Physiol.* **2020**, 252. [CrossRef] [PubMed]

33. Shinozaki, Y.; Beauvoit, B.P.; Takahara, M.; Hao, S.; Ezura, K.; Andrieu, M.H.; Nishida, K.; Mori, K.; Suzuki, Y.; Kuhara, S.; *et al.* Fruit setting rewires central metabolism via gibberellin cascades. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2020**, *117*, 23970-23981. [CrossRef]
34. Somyong, S.; Walayaporn, K.; Jomchai, N.; Naktang, C.; Yodyingyong, T.; Phumichai, C.; Pootakham, W.; Tangphatsornruang, S. Transcriptome analysis of oil palm inflorescences revealed candidate genes for an auxin signaling pathway involved in parthenocarpy. *PeerJ* **2018**, *2018*. [CrossRef]
35. Tranbarger, T.J.; Dussert, S.; Joet, T.; Argout, X.; Summo, M.; Champion, A.; Cros, D.; Omore, A.; Nouy, B.; Morcillo, F. Regulatory mechanisms underlying oil palm fruit mesocarp maturation, ripening, and functional specialization in lipid and carotenoid metabolism. *Plant Physiol.* **2011**, *156*, 564-584. [CrossRef]
36. Yeap, W.C.; Lee, F.C.; Shan, D.K.S.; Musa, H.; Appleton, D.R.; Kulaveerasingam, H. WRI1-1, ABI5, NF-YA3 and NF-YC2 increase oil biosynthesis in coordination with hormonal signaling during fruit development in oil palm. *Plant J.* **2017**, *91*, 97-113. [CrossRef] [PubMed]
37. Izumi, Y.; Okazawa, A.; Bamba, T.; Kobayashi, A.; Fukusaki, E. Analytica chimica acta development of a method for comprehensive and quantitative analysis of plant hormones by highly sensitive nanoflow liquid chromatography-electrospray ionization-ion trap mass spectrometry. *Anal. Chim. Acta* **2009**, *648*, 215-225. [CrossRef] [PubMed]
38. Yousefi, M.; Rafie, A.S.M.; Abd Aziz, S.; Azrad, S. Introduction of current pollination techniques and factors affecting pollination effectiveness by *Elaeidobius kamerunicus* in oil palm plantations on regional and global scale: A review. *S. Afr. J. Bot.* **2020**, *132*, 171-179. [CrossRef]
39. Lucci, P.; Pacetti, D.; Frega, N.G.; Mozzon, M. Phytonutrient concentration and unsaturation of glycerides predict optimal harvest time for *Elaeis oleifera* × *E. guineensis* palm oil hybrids. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* **2015**, *117*, 1027-1036. [CrossRef]